

La Energía Nuclear

By Walter C Patterson

Prólogo a la edición española¹

Pedro Costa Morata

Esta obra de Walter Patterson es importante. Aunque está fechada a principios de 1975, en un momento relativamente lejano si hemos de tener en cuenta el intenso caudal de acontecimientos posteriores, el análisis de los orígenes y de la situación de la energía nuclear constituye un paso fundamental para entender la evolución de los acontecimientos, dentro de este mundo tan conflictivo, y para contrastar las previsiones que ya entonces se hacían con la realidad de los momentos actuales. En su postdata, Patterson echa una ojeada a algunas de las novedades más destacables ocurridas en los cinco años siguientes.

Este libro es netamente descriptivo; un verdadero manual para interesados. La información detallada que se da sobre el ciclo del combustible nuclear y sobre el nacimiento y la primera juventud de los reactores puede resultar, en algún momento, prolija; pero viene bien. El estilo antinuclear español ha sido predominantemente ideológico, y en esa tónica se han venido produciendo los todavía escasos trabajos editados sobre el tema. Por contraste, el trabajo de Patterson viene desprovisto, casi totalmente, de ideología (si es que es posible decir esto, tratándose de la evolución tan peculiar de esta tecnología) y únicamente puede captarse, de forma clara, un llamamiento a esa *ética* necesaria, para enfocar críticamente esta energía tan conflictiva. Falta, en todo caso, el análisis de las causas - los intereses - que mueven y determinan el negocio nuclear; pero como esto mismo es lo que ya hemos señalado y denunciado, en tantas ocasiones, diversos antinucleares españoles, no tiene gran interés advertir de esta *insuficiencia*, que soslayamos fácilmente.

En plena “era nuclear”: antes y después de Harrisburg

En 1974 el mercado interno norteamericano había absorbido 30 pedidos de nuevos reactores, con una potencia total de 49.000 MWe. A partir de este momento, los pedidos se redujeron drásticamente (4 unidades en 1975, 3 en 1976) hasta hacerse cero en 1979 y 1980. La crisis de la industria nuclear ha ido apareciendo antes, incluso, de que esta energía se afirmara y, lo que es más curioso, de forma exactamente simultánea con la crisis del petróleo, ante la que, todavía, muchos siguen considerando el átomo como alternativa insustituible.

No es exagerado decir que la actividad industrial nuclear norteamericana está, en el plano interno,

1

Los puntos de vista expresados en este prólogo a la edición española son, desde luego, de quien lo firma, y no coinciden necesariamente con los del autor de la obra. Lo mismo cabe decir del contenido de las notas a pie de página, que se deben todas al traductor y prologuista, Pedro Costa Morata (N. del Ed.).

prácticamente congelada; y únicamente se mantiene por los pedidos del exterior. Aunque de forma menos acusada, buena parte de los países occidentales sufren este mismo *shock*. Hay que señalar, entre los países con la actividad nuclear ralentizada, los casos de Gran Bretaña, Alemania Federal y Suecia, todos ellos abocados, por motivos distintos, a renunciar a las aspiraciones grandilocuentes de principios de los 70. Hay que señalar, también, la “exaltación” nuclear que viven los gobiernos francés y japonés, con cifras en continuo aumento y planes que van materializándose con demoledora contundencia. Si hubiera que hablar de un “fascismo nuclear” (imposición autoritaria y frenética de los programas nucleares) habría que atribuirlo a Francia y a Japón; y a la Unión Soviética, en otro marco conceptual, ya que las autoridades soviéticas parecen querer -y pueden, bien es verdad- vencer a Occidente en la carrera energética nuclear, no vacilando en exponer, frente a la contestación nuclear fuera de su área, opiniones y condenas del más clásico estilo reaccionario.

En 1981 hemos de constatar, desde luego, la caída de las esperanzas más fervientes puestas, hace tan sólo 8 ó 10 años, en los usos energéticos de la fisión nuclear. Veamos las causas de esta “decadencia”.

- Los problemas *económicos*. En los últimos ocho años los costes de instalación se han multiplicado 10 ó 15 veces, aún advirtiendo que *nunca* se han conocido, ni se conocen, los costes reales globales de un proyecto nuclear, a nivel de contabilidad nacional. Hoy nadie puede dudar de que una central nuclear de 1.000 MWe cuesta no menos de 2.000 millones de dólares a cualquier empresa, y no menos de 3.000 millones a la sociedad que la alberga (que encaja numerosos costes ajenos a las empresas explotadoras). Solamente en Estados Unidos los pedidos anulados de centrales nucleares se han igualado, en los últimos años, a las cifras correspondientes a proyectos en construcción.

- Los problemas *tecnológicos*. Que están en el origen del incremento espectacular de los costes, tanto de instalación como de explotación. En contra de lo que se ha venido diciendo, no estamos ante una tecnología excepcionalmente segura o depurada hasta el punto de que el ciudadano haya de confiar tranquilamente en ella. A la larga serie de incidentes que Walter Patterson recoge, habría que añadir una lista aún más extensa y preocupante, desde principios de 1975 (año inaugurado con el espectacular incendio de *Browns Ferry*) hasta el momento actual. Pero el verdadero punto de referencia, como el autor también señala, ha sido el accidente de la central norteamericana de *Three Mile Island*, cerca de *Harrisburg (Pennsylvania)*. La historia de la energía nuclear “pacífica” se divide ahora en dos períodos: el de antes y el de después de Harrisburg. Como se recordará, el 28 de marzo de 1979, a las 3 de la madrugada, se inició el accidente más serio de todos los producidos hasta ahora en los reactores de potencia. El problema estuvo originado en la obstrucción de un filtro que hizo detenerse la turbina, con el recalentamiento del agua del reactor (del tipo PWR, construido por *Babcock & Wilcox*) y la apertura automática de una válvula de seguridad que, de forma fatal, permaneció abierta, quizás bloqueada. Pese a la entrada correcta del sistema de refrigeración de emergencia, el agua radiactiva del interior del reactor salió hacia afuera y, pese a la parada casi instantánea del reactor, continuó el recalentamiento del núcleo, la emisión de agua y gases radiactivos y, sobre todo, la formación imprevista (si es que algo de lo que sucedió estaba previsto) de una *burbuja* de gas hidrógeno en la parte superior del reactor, resultado de la descomposición del agua ligera por el sobrecalentamiento de algunas vainas de los elementos combustibles (algunos de los cuales se fundieron). Las alarmas, las contraórdenes, las emergencias, las ocultaciones y manipulaciones informativas y el ridículo general de la industria nuclear configuraron un cuadro grotesco y criminal del que los habitantes de *Pennsylvania*, y de buena parte del mundo occidental, sabrán guardar recuerdo constante. Como resultado inmediato, el reactor (*Three Mile Island-2*, que acababa de entrar en funcionamiento, ¡tres meses antes!) fue precintado; la compañía propietaria, multada; todas las nuevas licencias, suspendidas por varios meses; los reactores gemelos, de otras centrales, parados; y las normas federales de seguridad, de la NRC, reforzadas y revisadas. Después

de sucesivos engaños, se ha hecho saber que este reactor no quedará descontaminado y listo para volver a funcionar, antes de 1987, si es que al final lo hace; los gastos de descontaminación y demás supondrán ¡2.000 millones de dólares!. Pero muy pocos piensan que vuelva a funcionar, siendo lo normal que permanezca “encementado” y vigilado para siempre, como pirámide de la estupidez tecnológica. Aunque la industria nuclear ha hecho de tripas corazón y ha querido capitalizar este accidente (prueba de seguridad, incapaz de producir una sola muerte, etc.) el golpe ha sido muy grave; mortal, en el caso norteamericano.

- Los problemas de *opinión pública*. La desconfianza ante los programas nucleares sigue, en todo el mundo, en aumento, y se consolida a medida que estas centrales no consiguen comportarse de la forma esperada. Una de las formas más espectaculares de rechazo viene consistiendo en los referéndums que vienen celebrándose. El 5 de noviembre de 1978, los austriacos dijeron *no* a la central nuclear de *Zwentendorf*, cuando sólo necesitaba entrar en funcionamiento. Antes, en 1976, diversos estados norteamericanos dijeron *si* a [a instalación de centrales nucleares, después de un forcejeo desigual, resuelto en estricta proporción al dinero invertido por cada facción (puede adivinarse, sin embargo, cuál sería el resultado, ahora, de un referéndum en Pennsylvania, entre la población afectada por el “síndrome de Harrisburg”). En 1979, también los ciudadanos suizos se expresaron frente a la energía nuclear, con un resultado aparentemente desfavorable, pero que ha influido en el casi congelamiento del programa oficial. Pero el caso más interesante de entre estas consultas populares, es, sin duda, el de Suecia, donde la principal cuestión política - el debate nuclear - hizo eclosión el 23 de marzo de 1980, con un resultado clara y abiertamente hostil frente al programa nuclear. Es de resaltar que la inmensa mayoría de los medios de comunicación manipularon y deformaron estos resultados. Estas eran las tres opciones:

a) La *línea 1*, que planteaba mantener los seis reactores ya en funcionamiento y completar el programa con los otros seis en construcción. La defendía el Partido Conservador y la industria en pleno. Recibió el 19 por 100 de los votos.

b) La *línea 2*, propugnaba completar todo el programa –es decir, los doce reactores - pero con la adopción de las medidas que hagan posible cerrarlos todos ellos en el plazo de 25 años. La defendía el Partido Liberal y el Socialdemócrata. Fue la más votada, con casi el 39 por 100 del total.

c) La *línea 3*, netamente antinuclear, proponía el desmantelamiento de los seis reactores en funcionamiento antes de 1990 y la liquidación del programa nuclear global. La defendían el Partido del Centro (del primer ministro *Falldin*), el Partido Comunista y las organizaciones ecologistas y ciudadanas. Recibió el 38 por 100.

La interpretación de la prensa fue la del *sí* a la energía nuclear, la realidad es que nadie posee fundamento alguno para pensar que una sola nueva central nuclear haya de añadirse al programa de *doce* reactores, lo que significa una congelación evidente y una victoria de la postura crítica. Inmediatamente después del referéndum, el Gobierno autorizó la entrada en funcionamiento de los reactores número 7 (Forsmark-1) y número 8 (Ringals-3); los problemas más arduos se plantearán cuando llegue el momento de poner en marcha los números 9 (Forsmark-2) y 10 (Ringals-4) previstos para 1981 y 1982, ya que la Administración sueca aceptó el compromiso de no autorizarlos sin un plan riguroso y claro de gestión de los residuos radiactivos.

Hay que advertir, en 1981, que la llegada de Mr Reagan a la Casa Blanca, con su formidable programa de reacción y conspiración universales, ha hecho suspirar de alivio a la industria nuclear de todo el mundo - sobre todo, a la yanqui -, al mismo tiempo que a todos los dictadores del ancho mundo. Ya ha iniciado su administración la adopción de medidas para “estimular” a los fabricantes

de equipo y explotadores de centrales; entre estas medidas de incluye el cese del endurecimiento normativo y la mayor flexibilidad en las autorizaciones, además de un nuevo impulso al papel federal (técnico y financiero) en el ciclo nuclear.

La proliferación nuclear, a toda marcha

Aunque después de la explosión nuclear india de mayo de 1974, no se ha reconocido “oficialmente” a ninguna otra potencia nuclear, Patterson también alude a la casi certeza de que tanto *Israel* como *Sudáfrica* poseen ya el arma atómica. En enero de 1978 se supo que la CIA había deducido, en 1974, que Israel poseía bombas atómicas. En el mismo informe se anunciaba que, prácticamente, esta era la situación de *Taiwan* y *Sudáfrica*, lo que parece haberse confirmado después de la explosión “a tres” de septiembre de 1979. En marzo de 1980, el semanario alemán *Stern* informó que Israel ya poseía su bomba antes de la guerra del “*Yom Kippur*”, en la que hubiera podido emplearla de verse obligada.

Aquel mismo documento de la CIA situaba en trance de conseguir la bomba a España, Irán, Egipto, Pakistán, Brasil y Corea del Sur; el tiempo ha confirmado casi exactamente estas informaciones. Se considera poco menos que inminente un “signo” externo suficiente como para concluir en que *Irak* posee armamento nuclear, quizás por la presencia de Israel, quizás por las pretensiones hegemónicas del régimen de Bagdad, el caso es que esto se da por inminente, pese a los daños que parece haber sufrido el centro nuclear de Tamuz con motivo de un misterioso bombardeo en los primeros días de esa guerra infame que sostienen, desde hace meses, Irak e Irán. *Pakistán* es el otro aspirante a la primicia de la “bomba atómica islámica”; sus preocupaciones ante el avance nuclear indio han impulsado su desarrollo militar y se espera que sea en 1981 cuando pueda considerarse a este país incluido en el “club atómico”. *Egipto* parece también en condiciones de acceder, pronto a este grupo cada vez menos selecto de naciones atómicas; sus problemas con Israel resultan una “justificación” muy convincente... *Siria*, que no podía ser menos, está ligada, desde noviembre de 1980, a la URSS mediante un pacto militar secreto en el que, se dice, figura la cobertura nuclear necesaria y, es de esperar, la asistencia técnica cualificada.

Otra área caliente es el Cono Sur latinoamericano. Tanto *Brasil* como, sobre todo, *Argentina*, están en condiciones de acceder, en plazo inmediato, al arma atómica. *Chile* no anda muy atrás, así como *Méjico* y *Cuba*. Curiosamente, Brasil e Irak han firmado acuerdos de cooperación nuclear “pacífica”. Todos estos países en trance de nuclearización militar, se han beneficiado de la ayuda técnica y material de países desarrollados, como es el caso de Alemania, para Brasil y Sudáfrica o Francia, para Pakistán e Irak.

La conclusión de este programa de frenética proliferación nuclear es esta: ni las salvaguardias de la OIEA, ni las restricciones del TNP sirven para impedir la multiplicación de instalaciones nucleares militares y la aparición de nuevas bombas atómicas. El firmar o no firmar, el aceptar o no las cláusulas de acuerdos o tratados internacionales no alivian en nada la angustia de un mundo que corre abocado a su destrucción.

La España nuclear

En el apéndice E-IV expresamos la evolución del rendimiento de las tres centrales nucleares españolas, que han tenido su peor año (después de dos años de descenso en la producción) en 1980: Un factor de carga del 53,1 por 100 es una vergüenza y un desastre económico. La culpable esta vez, la central de Sta. María de Garoña, no ha ido nunca bien; y sí ha sido denunciada

continuamente por los críticos nucleares. Cuando es inminente - dicen - la entrada en funcionamiento del primer reactor de la “nueva generación”, el de Almaraz-1, cabe preguntarse qué sorpresa agradable puede proporcionarnos esta ampliación del programa nuclear español, con centrales de 900/1.000 MWe, si las tres actuales, de reducida potencia y mayor flexibilidad de funcionamiento, van tan mal.

Efectivamente, el caso español no es sino el reflejo, a escala, de la crisis nuclear generalizada: ninguna previsión de los primeros años 60 se ve confirmada, los costes suben sin cesar, los fallos, paradas e interrogantes fuerzan a la prudencia a los responsables oficiales, la opinión pública se subleva cada vez más, etc. A diferencia del caso norteamericano, sin embargo, cabe la sospecha de que aún después de un “pepinazo” tipo Harrisburg, en algunas de las centrales, actuales o inminentes, nuestras autoridades nucleares seguirán proclamando la inevitabilidad de esta energía, el necesario margen de riesgo, etc.

El Apéndice E-V ser)ala algo significativo: después de la aprobación del Plan Energético Nacional “definitivo” (el PEN-79), se ha autorizado la construcción de cinco reactores de los que tres poseen importante participación del sector público (INI). Está muy claro: el negocio de las instalaciones nucleares está tan de capa caída que es el Estado el que acude a ayudar al sector eléctrico privado, que ahora siente más interés por las centrales térmicas de carbón; para esto se ha montado una descarada operación de “prestigio” de la Empresa Nacional de Electricidad, para que se acepte de buen grado su entrada en el sector eléctrico nuclear. Esta maniobra habrá de verse confirmada en la más o menos próxima autorización definitiva de las centrales de Sayago, Vandellós-3 y Xove. Una central nuclear cuesta a la economía nacional 300.000 millones de pesetas de 1981, desmenuzando costes no empresariales, privilegiados, subvencionados y demás prebendas económicas, financieras, políticas y sociales. Otro dato de interés se deduce de la lista de centrales no autorizadas: allí donde la opinión pública se mantuvo, firmemente en contra, en los años 1974-76, los proyectos quedaron congelados; el gobierno solamente ha autorizado los proyectos que cayeron en la ignorancia o la indiferencia.

En cuanto a las previsiones energéticas del PEN-79, cabe decir que no se cumplirán, tampoco esta vez, en el capítulo de la generación eléctrica nuclear. Hoy resulta gracioso recordar cómo el PEN-75, sólo levemente más autocrítico y mediocre que los posteriores, preveía una producción de energía eléctrica nuclear, en 1980, de 39.000 millones de kWh (la realidad ha sido algo inferior: 5.200 millones). Los dos o tres proyectos anteriores al PEN-79, aprobado definitivamente, fueron reduciendo esta expectativa para 1987; según este plan, la producción de energía eléctrica nuclear en 1987 será de unos 57.000 millones de kWh, lo que - nos atrevemos a predecir - supone algo así como el *doblo* de lo que, en realidad, se producirá. El análisis minucioso de nuestro programa nuclear no permite esperar que haya, en esa fecha, más de 8.000 MWe instalados, y no funcionarán, desde luego, con un alto rendimiento. Al futuro nos remitimos.

Por otra parte, tampoco la hora de las energías alternativas parece haber sonado en serio para nuestra Administración, que sigue entreteniéndose en proyectos sin más interés que el que suscita para las firmas de ingeniería o el sector de bienes de equipo: tanto la central solar de Tabernas, que se pretende produzca energía eléctrica, como la central eólica de Tarifa constituyen ejemplos de cerrilismo industrialista y concentrador. A diferencia de la gran mayoría de los países de Europa (generalmente menos dotados de recursos naturales alternativos), España no utilizará ni un 1 por 100 de su consumo energético en 1990 en fuentes de este tipo; la política oficial actual, en este sentido, va claramente orientada a retardar en lo posible la utilización masiva de energía solar y eólica de fácil tecnología y empleo generalizado.

Puede resumirse el meollo de la problemática energética española en estos puntos:

- Las previsiones nucleares han sido siempre excesivas (y exageradas), resultando evidente que la realidad industrial, técnica, económica, política y social “rebaja” muy notablemente los altos vuelos de gobierno y sector eléctrico. De las previsiones de 1975 a la realidad de 1980 y a lo que vemos venir para 1985 y 1990 hay tanta distancia que aquellos “planificadores” debieran de sentir rubor de haber dejado su nombre vinculado a tales Planes. Pese a todo, estos sectores interesados insisten siempre en lo mismo, hasta el empacho.
- No hay ninguna voluntad de reducir el consumo de petróleo, como demuestra la permanente tendencia a instalar industrias para consumidores de este tipo de recurso. También aquí la diferencia entre previsiones y realidad resulta grotesca.
- El sector eléctrico mantiene su liderazgo como núcleo irresponsable de la economía nacional. Cuando le pareció bien abandonó los aprovechamientos hidroeléctricos en pos de una energía “prometedora”, la del fueloil; antes de que se hubieran puesto en funcionamiento alguna de las más potentes centrales de este tipo, ya se habla iniciado la escalada nuclear, y, ahora, cuando todavía no se ha logrado poner en funcionamiento ninguna de las nuevas centrales nucleares, ya ha vuelto a cambiar otra vez su rumbo, con la reciente moda del carbón.
- En todo caso, se ha considerado que una política seria de ahorro era un *atentado* al desarrollo económico (más bien a intereses económicos concretos), por lo que, en este campo, no se ha hecho más que hablar y despistar.
- En concreto, la cuestión energética nuclear es, en nuestro caso, un fraude global manifiesto, ya que ni se obtiene ningún resultado objetivamente positivo, ni se garantiza un nivel de costes soportable, ni se logra la aceptación social.
- La cuestión energética debiera tener un objetivo básico incuestionable: se trata de consumir, lo menos posible, recursos preferiblemente propios, a costes relativamente aceptables, con el empleo de tecnología fácil y de la infraestructura empresarial más sencilla y nítida posible.

A la búsqueda de la bomba atómica española

Aparte de la confirmación, por parte de observadores extranjeros, de la próxima capacidad atómica de España, nuestros propios responsables, civiles y militares, insisten en este hecho. Desde mediados de 1976, la Prensa viene recogiendo numerosas declaraciones en este sentido que expresan algo más que una voluntad de poseer este armamento. La última declaración ((atómica)) española data de diciembre de 1980 y corresponde al Sr. Rodríguez Sahagún, entonces Ministro de Defensa (“España tiene capacidad suficiente para construir una bomba atómica”).

Las instalaciones que permitirán un programa nuclear civil “avanzado” y militar son las previstas para el Centro de Investigación Nuclear de Soria, otro de los temas-escándalo de nuestra particular polémica nuclear. Ocultando cínicamente los objetivos y autorizando de forma irregular fondos y trámites administrativos, el gobierno español mantiene su proyecto nuclear de Soria contra la voluntad de las poblaciones afectadas y la mínima legalidad del PEN-79, que no prevé nada concreto sobre el tema. En Soria se trabajará con reactores rápidos experimentales, con planta de reprocesamiento de combustible (también “experimentales”) y con plutonio: todos los ingredientes necesarios para acometer un programa nuclear militar. No olvidemos que los sucesivos gobiernos se niegan sistemáticamente a firmar el TNP, alegando razones de “interés y soberanía nacional”.

Mientras tanto, se va completando el ciclo nuclear: al intenso programa de exploraciones mineras se ha de añadir la nueva planta de fabricación de combustible de Juzbado, en Salamanca, cuya autorización también se ha otorgado entre irregularidades y protestas. Aunque en este momento sólo se explotan minas de uranio en las provincias de Salamanca y Badajoz, las tradicionales buenas perspectivas de nuestro suelo ha hecho que las multinacionales acudan, una vez más, a nuestro suelo; esta vez son dos viejas conocidas, las “petrolíferas” (energéticas, en general) Exxon y Chevron, que se han consorciado con el sector público para explorar la mayor parte del territorio español. En torno a la minería del uranio se han venido obteniendo, desde hace no mucho tiempo, datos extraoficiales de la incidencia dañina de la radiactividad existente entre los trabajadores. En concreto, parece evidente que después de un periodo de 12-15 años, los mineros del uranio contraen *radiosilicosis*, enfermedad que no reconocen nuestras autoridades y que consiste en la silicosis convencional asociada con algún tipo de cáncer (de riñón, de estómago, de pulmón). Las denuncias, solamente hechas a nivel de prensa, no han hecho inmutarse a la Administración, que continúa sin reconocer que el uranio produce radiaciones, lo que somete a los trabajadores de las minas a riesgos específicos y a nuevas enfermedades profesionales. A principios de 1980, la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA) recibió todas las competencias que, en materia de minería, concentración del uranio, etc. poseía la Junta de Energía Nuclear (JEN); ya no es fácil exigir a la Junta que explique las numerosas y poco convencionales muertes de los mineros que han trabajado en sus instalaciones. Es interesante resaltar, por otra parte, cómo ENUSA, en un esfuerzo “nacionalizador” ha liberado al sector privado de su importante participación en capital, que ha venido a cubrir la JEN. Este es otro detalle por el que vemos cómo una parte importante de la actividad del ciclo nuclear (la más molesta y menos rentable, desde luego) pasa a manos del sector público, debido al “interés nacional” de esta forma de energía.

Es de esperar que, en su día, sea también ENUSA la entidad que resuelva los problemas de procesamiento de combustible irradiado y de gestión de residuos, para la mayor tranquilidad de las empresas eléctricas. Hasta este momento, la gestión de los desechos radiactivos sigue siendo un misterio, ya que, aunque la Administración asegura que siguen en los propios almacenes de las centrales (el combustible irradiado va a *Windscale* - caso de Zorita y Garoña - o a *La Hague* - caso de Vandellós) hay fundadas sospechas de que se viene depositando en otros lugares, especialmente en el cementerio atómico de El Cabral (Córdoba); y he aquí otro de los temas de arbitrariedad y misterio, porque todavía no se ha podido saber, con seguridad, qué es lo que se guarda en este depósito y cual es su finalidad actual y futura.

Antinucleares y ecologistas

En el libro apenas se hace mención de la actividad de los grupos ecologistas críticos, cuyo papel social ha resultado tan importante en todo Occidente en este momento de juicio sumarásimos a las pautas de crecimiento económico establecidas después de la Segunda Guerra Mundial. Es de notar que la obra centra su atención en el mundo angloamericano (Estados Unidos, Canadá, Reino Unido) y que soslaya la crítica política, típicamente ecologista, de la energía nuclear.

Pero hay que reconocer que, sobre todo en la Europa continental, el movimiento antinuclear y ecologista se ha ido afirmando como un poder social innegable, de cada vez mayor solidez científica y más amplia aceptación popular. No podemos ignorar algunos de los reflejos que este fenómeno va mostrando:

- La negativa de las poblaciones afectadas a soportar nuevas centrales se multiplica a medida que el activismo antinuclear se generaliza; esto se ha dado, sobre todo, en España, Alemania Federal,

Suiza, Holanda y, también, Estados Unidos.

- Las iniciativas empresariales y gubernamentales, para encarar esta rebelión, cada vez se acercan más a lo arbitrario y lo ilegal, relanzando la espiral oposición-represión-oposición, etc.

- La crisis de las instituciones políticas aparece como consecuencia inmediata: los partidos considerados progresistas y de izquierdas detectan rápidamente que la contestación se ha instalado en sus filas, viéndose obligados a tenerla en cuenta, de alguna manera. Este es el caso de los partidos socialistas europeos (los partidos comunistas, principalmente los “latinos”, se muestran ferozmente pronucleares) y otros de corte liberal.

- Este malestar político ha dado lugar, por una parte, a la aparición de formaciones políticas que asumen el espíritu y las reivindicaciones ecologistas (caso del Partido Radical italiano y de algunos “grupos radicales” españoles de nuevo cuño) y, por otra, a la participación directa de los ecologistas en los procesos electorales. En Alemania Federal los “verdes” vienen cosechando triunfos crecientes en las elecciones para los municipios y los parlamentos regionales.

En lo que a España se refiere, todo este proceso se ha ido ajustando exactamente al “modelo social” del desencanto político. En la predemocracia, la inquietud ecologista, eminentemente antinuclear, contaba con el apoyo y la compañía de las formaciones políticas todavía ilegales. En la transición, los compromisos entre Poder y Oposición dieron de lado no pocas causas anteriores, convertidas en molestia para el juego político establecido; de esta manera, la discusión del Plan Energético Nacional, en el verano de 1979, dio oportunidad de contemplar hasta qué punto el “compromiso nuclear” situaba a los grupos políticos en la impotencia para expresar sus dudas, críticas y alternativas de fondo. La tensión consiguiente, entre ecologistas y partidos parlamentarios no ha cedido, aunque a un nivel más amplio y general existen otras vías de entendimiento.

En 1981, cuando los sobresaltos políticos recuerdan crudamente que la democracia en España es bastante menos consistente de lo que muchos nos esforzábamos en creer, la situación de emergencia político-económica juega otra vez contra la Ecología y los ecologistas (además de contra el sentido común y el largo plazo). El consenso existente en torno a la adopción de medidas contra el paro y la inflación muestra, desoladamente, que en imaginación, competencia y voluntad política, izquierda y derecha aparecen pobres y ralas; el relanzamiento de inversiones en instalaciones productoras de energía, industria de base y sectores a “reestructurar” (muchos de ellos, obsoletos precisamente por ser antiecológicos y antisociales) viene a garantizar que, sin la posibilidad de repetir el crecimiento económico de los años 60 y 70, se va a agredir al medio ambiente con igual o superior dureza.

Este mismo reflujó democrático que palpamos en la sociedad española de 1981 nos fuerza, por otra parte, a nuevas consideraciones, afectando algunas de ellas muy directamente a los planteamientos antinucleares y ecologistas. Efectivamente, la crisis política actual puede desembocar en una situación no democrática, peor, quizá, de la que conocimos en la descomposición del franquismo y en la que la causa ecologista no se desenvolvería, desde luego, en mejores condiciones que en ese pasado todavía tan próximo. Un acontecimiento dramático reciente, de gran significación, ha conmovido el país entero, incluyendo las filas ecologistas: la muerte del ingeniero Ryan, responsable de las obras de la central nuclear de Lemóniz, a manos de la organización ETA-militar.

La muerte de Ryan, el 6 de febrero de 1981, después de su secuestro y como consecuencia de no aceptar Iberduero, empresa propietaria de la central, las condiciones para su liberación, fuerza a aclarar posturas e ideas, toda vez que la causa anti-Lemóniz ha sido y es una de las más significativas para todos los antinucleares de España. Este es, a nuestro entender, el análisis correcto

de este asesinato:

- La oposición anti-Lemóniz data de 1975-76, después de que los grupos antinucleares vascos consiguieran congelar los proyectos de Tudela, Ea-Ispdster y Deva. Las obras de esta central estaban ya muy avanzadas. Esta oposición, desarrollada en un clima de amplias reivindicaciones políticas vascas, se convirtió en una causa general y popular.

- Muchos antinucleares consideramos negativa ya la primera intervención violenta de ETA-militar contra la central en obras, en enero de 1977 y después. A estas alturas, la batalla de Lemóniz ha ocasionado seis muertes: un militante de ETA-militar, en asalto a la central, en diciembre de 1978; tres trabajadores de las obras, a consecuencia de la colocación de bombas, en marzo de 1978 y junio de 1979; una en una manifestación antinuclear, en Tudela, en junio de 1979; y el ingeniero José María Ryan, de Iberduero.

- Aunque no siempre se tiene en cuenta, los ecologistas y antinucleares españoles hemos propugnado la acción pacífica y hemos asumido como fundamental el derecho y el amor a la vida, para todos; la “violencia ecológica” no encaja en nuestra filosofía, en la medida en que desnaturaliza esta lucha.

- Desde nuestro punto de vista, ETA-militar aleja las posibilidades de impedir la entrada en funcionamiento de Lemóniz, daña gravemente la imagen de antinucleares y ecologistas, e hipoteca la acción reivindicativa de los grupos vascos, que, prácticamente, no cuentan todavía en el panorama político de la sociedad vasca. La actitud de ETA-militar, en otro orden de cosas, instando al golpe de Estado militar, encaja en ese marco violento y desquiciado de lucha sin tregua; y no tiene nada que ver con los planteamientos ecologistas.

Por lo demás, y finalmente, consideramos que estos apuntes que añadimos a la magnífica obra de Patterson - en la que apenas hay referencia al caso español - nos parece una mínima aportación al evidente valor de *manual* que este libro posee.

Pedro Costa Morata, Madrid, 31 de marzo de 1981

Prefacio

Los reactores nucleares son fascinantes. Son el corazón de la tecnología que puede modelar el mundo de nuestro futuro inmediato o borrarlo del mapa. Nacidos dentro de la más estricta seguridad militar durante la Segunda Guerra Mundial, los reactores nucleares siempre han resultado para el profano ingenios fantásticos y esotéricos, fuera de la comprensión ordinaria. Esta impresión es injustificable. En un momento en el que nos encontramos en el umbral de un compromiso total por una vía nuclear es absolutamente importante que la política nuclear se base en la comprensión del gran público de la tecnología nuclear, de sus aplicaciones y de sus implicaciones.

La física y la ingeniería nucleares son, evidentemente, temas especializados, relacionados con fenómenos que, a veces, casi resultan carrollianos; por su imprevisibilidad. Pero las características esenciales de los reactores nucleares han cambiado muy poco en las tres décadas de su existencia; lo que ha cambiado ha sido su tamaño y su estructura. Este libro es un intento de describir los reactores propiamente dichos -su construcción, comportamiento, mantenimiento, descendientes y parientes- y también los efectos que han producido y producen en el mundo en que vivimos. Necesariamente, la descripción corresponde a la visión personal sobre un cada vez más controvertido conjunto de temas. Para algunos resultará injustificadamente pesimista sobre las perspectivas nucleares, y para otros como excesivamente concentrado sobre un tema ante el cual instintivamente retroceden. Es conveniente, en cualquier caso, empezar con una advertencia: no tomar nunca, en materia nuclear, ningún punto de vista como dogma, incluyendo éste.

Para quienes desean ir más lejos en estas cuestiones, he incluido en el Apéndice C (págs. 305-16) una extensa lista de fuentes adicionales, reseñadas para indicar - una vez más - los; puntos de vista personales sobre sus virtudes y defectos.

En el transcurso de mi propio compromiso con los temas nucleares, me he sentido satisfecho de encontrarme con muchos; otros puntos de vista contra los que he podido contrastar los míos propios, unas veces por escrito y otras personalmente. El personal de la *United Kingdom Atomic Energy Authority* ha resultado indudablemente útil para mí, aún teniendo en cuenta nuestras opiniones frecuentemente divergentes. Me gustaría dar las gracias, especialmente, a Ron Truscott y sus colegas de la sección de Relaciones Públicas, y a la señora Lorna Arnold, de los Archivos, quien hizo posible que dispusiera con antelación de un ejemplar de la soberbia historia oficial *Independence and Deterrence*, en una etapa crucial de mi investigación.

La actualmente subdividida *United States Atomic Energy Commission* me ha suministrado muchos documentos útiles, como lo han hecho la *International Atomic Energy Agency* y la *OECD Nuclear Energy Agency*, esta última a través de los buenos oficios de Bruce Adkins, a quien expreso también mi agradecimiento. He hecho amplio uso de las obras del Dr. Samuel Glasstone, del difunto Dr. Theos Thompson y del Dr. J. G. Beckerley, del difunto Dr. Kenneth Jay, mi amigo y compañero Sheldon Novick, del Dr. J. E. Coggle, del Dr. Tom Cochran, del Dr. John Gofman, del Dr. Arthur Tamplin, del Dr. John Holdren, Richard Lewis, John McPhee, Norman Moss, del Dr. Peter Metzger, Roger Rapoport, Ted Taylor y Mason Willrich, entre otros muchos; a todos ellos, mi agradecimiento. Las publicaciones del *Stockholm International Peace Research Institute*, de las Conferencias Pugwash, de la *International Commission on Radiological Protection*, de la *National Radiological Protection Board* y de la *Union of Concerned Scientists*, y las páginas del *Bulletin of the Atomic Scientists*, *Science*, *Environment Energy Policy* y *Nuclear Engineering International* han proporcionado mucho material útil, así como el *Weekly Energy Report*, a cuya directora y editora, Llewellyn King, doy las gracias.

Muchos de mis colegas han mantenido conmigo, durante muchos meses, un coloquio incesante y fructífero, no solamente sobre temas nucleares sino sobre su contexto global de política energética y social. Espero que me hagan saber lo que piensan sobre mi trabajo, con el mismo franco lenguaje: doy mis gracias anticipadas a todos ellos, especialmente a la redacción del *New Scientist*, que se enfrentó a mis opiniones antes y con más frecuencia que los demás.

Incluso más próximos a mí están mis compañeros de Amigos de la Tierra Internacional, sin cuya activa participación este libro ni habría ni podría haber sido escrito. Brice Lalonde y Pierre Samuel, de *Les Amis de la Terre* de Francia, Lennart Daléus, de Jordens Vinner de Suecia, Brian Hurley de *Friends of the Earth*, de Irlanda, Holger Strohm de *Die Freunde der Erde*, de Alemania Federal, Kitty Pegels de *Vereniging Milieudefensie*, en Holanda, Jim Harding de *Friends of the Earth*, en USA, y muchos otros Amigos han dado lugar a un vínculo internacional de creciente solidez. En Gran Bretaña el Dr. Peter Chapman, de la *Open University*, y Gerald Leach, del *International Institute for Environment and Development*, han contribuido suscitando dudas y debates estimulantes. Mis amigos de la oficina de *Friends of the Earth*, en Londres, han tolerado mi ausencia en el equipo durante algunas semanas sin quejarse, soportando por mi la contribución que me correspondía. Por último, y muy particularmente, mi caluroso agradecimiento al Dr. John Price y a Amory Lovins, con los que el trabajo resulta un placer inacabable y sin los cuales más me hubiera valido seguir cultivando mis brécoles.

He de agradecer a Peter Wright, de *Penguin Books*, la oportunidad de haber ampliado cuatro veces una primera versión de este texto. Dentro de mi círculo particular, mi agradecimiento y mejores deseos para la señora Sue Hunter, que se ha esforzado magníficamente por convertir mi original enmarañado en un ejemplar inteligible. Finalmente, a mi querida esposa Cleone, que me ha tolerado tres meses levantándose obsesivamente a las cuatro de la madrugada: prometo que nunca volveré a escribir sobre terrorismo nuclear la víspera de Nochebuena.

Walt Patterson, 31 de diciembre de 1974

Introducción: El dilema nuclear

A lo largo de tres décadas, el mundo ha ido aprendiendo a convivir con la energía nuclear. El proceso de aprendizaje ha sido estimulante, frustrante y, a veces, dramático; está muy lejos de acabar. Por el contrario, puede que esté, precisamente, empezando. Hemos aprendido mucho sobre cómo liberar energía nuclear, cómo controlarla y cómo hacer uso de ella. Hemos aprendido, incluso, a no prestarle atención. Pero no hemos aprendido todavía a vivir con ella. La energía nuclear, en todos sus aspectos, está influyendo al mundo. El futuro de nuestro mundo dependerá, de forma dramática, de lo que sepamos de la energía nuclear y de lo que hagamos con ella. Las decisiones cruciales no esperarán otras tres décadas.

La energía concentrada, de alta calidad, ha llegado a ser una necesidad básica en nuestra sociedad industrial. La energía más concentrada disponible es la energía nuclear, hecha accesible mediante los reactores nucleares. De liberarse toda ella en un reactor nuclear, la energía contenida en un kilo de uranio equivaldría a la producida quemando unas 3.000 toneladas de carbón. Esto no es, desde luego, así de sencillo; el obrero británico, quizás anónimo, que robara combustible de uranio de un reactor e intentara quemarlo en un hornillo se equivocaría. Pero no hay duda de que las reservas mundiales de uranio representan un depósito asombroso de energía. Si se dispone de los reactores adecuados y de otras instalaciones resulta posible explotar el uranio, que, de otra forma, sería prácticamente inútil. Lo mismo puede decirse del metal torio, todavía más abundante.

Estas posibilidades prácticas fueron identificadas muy pronto en el desarrollo de la energía nuclear, incluso ya cuando iban tomando forma los proyectos para liberar la energía nuclear por medios explosivos. El aterrador poder destructivo de las armas nucleares dominó la escena en la primera década de la postguerra. Pero hacia la mitad de los años 50, científicos e ingenieros estaban en el camino adecuado para dominar esta energía con fines pacíficos. Las expectativas resultaban cada vez más brillantes. Se había producido, desde luego, una oleada de predicciones eufóricas en los años que siguieron a las dos explosiones nucleares sobre Japón que pusieron fin a la Segunda Guerra Mundial. La llamada “energía atómica” movería un automóvil con un motor del tamaño de un puño; pronto viviríamos en casas calentadas por uranio; aeronaves “impulsadas por el átomo” serían capaces de permanecer en espacio indefinidamente; cohetes “impulsados por el átomo” nos permitirían atravesar el océano en tres minutos; y así sucesivamente. Pero los que realmente comprendieron las implicaciones de la energía nuclear eran mucho más realistas. Y escogieron aplicaciones cuyo desarrollo aparecía como claramente alcanzable; sus esfuerzos dieron fruto.

Un reactor nuclear libera energía nuclear en forma de calor: el calor se emplea para generar vapor de agua, y el vapor para generar electricidad con un equipo eléctrico convencional. Desde mediados de los años 50 la generación nuclear de electricidad se ha convertido en una tecnología acabada, ahora en el umbral de una enorme expansión por todo el mundo. Desde el principio, pareció que la vía nuclear de generación de electricidad presentaría ciertas ventajas e inconvenientes, en comparación con las plantas generadoras convencionales que producen vapor de agua mediante la combustión de carbón, petróleo o gas. Las plantas energéticas alimentadas por combustible fósil son menos caras de construir que las plantas nucleares, comparativamente. Por el contrario, se esperaba que los costes de funcionamiento de una central nuclear serían considerablemente menores que los de una central de combustible fósil. Cierta publicidad inicial llegó a decir, nada menos, que la electricidad nuclear sería demasiado barata como para que el contador la registrara. Como es lógico, los concededores del tema no dijeron tal cosa. Por su parte, calcularon el coste total de una unidad de electricidad generada por una central alimentada por combustible fósil o por una central nuclear, teniendo en cuenta los costes de capital y de funcionamiento. Las estimaciones difirieron, pero hubo

general acuerdo en que una unidad de electricidad nuclear costaría solamente en torno a un quinto de lo que costaba una unidad de electricidad generada por combustible fósil. Con esta base, las centrales nucleares representaban una inversión excelente.

En los años siguientes, las bases de estos cálculos económicos variaron. Durante un tiempo el coste del petróleo permaneció bajo, mientras que el del carbón aumentó; algunos costes nucleares también aumentaron, y el resultado permaneció incierto. Al final de los 60, la creciente preocupación del público por el medio ambiente fue concediendo atención a los problemas que surgían del uso a gran escala del combustible fósil: problemas de salud en la minería subterránea, daños ecológicos de la minería a cielo abierto, contaminación marina debida al transporte del petróleo, contaminación del aire por la combustión del carbón y el petróleo. Como contraste, las centrales nucleares parecían medioambientalmente inofensivas.

A principios de los 70, las subidas crecientes de los precios del petróleo y las cada vez más dificultosas relaciones laborales en los yacimientos de carbón se añadieron al atractivo económico comparativo de la energía nuclear. El compromiso industrial con la energía nuclear empezó a acelerarse intensamente (ver Figura 12, pág. 263 y Tabla 3, pág. 262). Lo mismo sucedió con la componente nuclear de la producción total de electricidad (ver Figura 13, pág. 265 y Tabla 3, pág. 262).

Los gobiernos querían reducir su dependencia con respecto a los países exportadores de petróleo; las instalaciones de suministro de electricidad querían reducir su dependencia del carbón, especialmente debido a la vulnerabilidad a los sindicatos rebeldes. La generación de electricidad nuclear parecía la alternativa obvia. A largo plazo, se argumentaba, el carbón y el petróleo resultan materias primas irremplazables para la industria química, y deben ser reservadas para estos usos, mientras que la energía nuclear debe usarse para generar electricidad. La electricidad, se añadiría, es una forma privilegiada de energía, versátil, de alta calidad y limpia en el punto de consumo. Debía suponer, de acuerdo con esto, una proporción cada vez mayor de la energía total consumida. Como hasta entonces las fuentes nucleares podían usarse más fácilmente para producir electricidad, parecía que todo encajaba muy adecuadamente. El consumo mundial de energía continuaría aumentando rápidamente, lo mismo sucedería al consumo energético “per cápita”, a medida que la gente fuera compartiendo más y más los beneficios de la tecnología moderna. Un autorizado punto de vista pronosticaba un mundo en el cual el consumo “per cápita” de energía llegaría a ser el doble que el de los americanos de hoy día; esta energía sería suministrada por unos 4.000 conjuntos de centrales nucleares, conteniendo cada uno suficientes reactores para proporcionar cinco veces la producción de las mayores centrales de la actualidad. Para este futuro de alto consumo energético el papel de la energía nuclear sería crucial. Solamente mediante el crecimiento más vigoroso posible de la capacidad nuclear podrían cubrirse las exigencias energéticas de la Humanidad.

Un razonamiento como el expresado era y es persuasivo. No es, sin embargo, irrefutable; mientras algunas voces pedían más y mayores reactores nucleares lo más rápidamente posible, otras planteaban otras cuestiones, algunas de las cuales resultan también difíciles de responder, relacionadas con la seguridad, los costes, la dependencia tecnológica, etc.

El primer interrogante se derivó del persistente miedo del público y de su desconfianza de la energía nuclear, debido a su aparición inicial como el arma más destructiva que jamás se había usado. Poco a poco, ciertas cuestiones específicas surgieron de la intranquilidad general. El mundo se había acostumbrado, de algún modo, al aplastante poder destructivo almacenado en los arsenales nucleares de los Estados Unidos, la Unión Soviética, Gran Bretaña, Francia y China; pocos dudarían en identificar estos arsenales como la más terrible amenaza para el futuro de la vida en la

tierra. Pero, aparte de estos aspectos específicamente militares de la energía nuclear, otros aspectos diversos son motivo de preocupación. Examinaremos éstos, con cierto detalle, en los próximos capítulos. Debe ser suficiente aquí mencionarlos brevemente, como cuestiones a las que volveremos repetidamente en discusiones posteriores.

Los reactores nucleares y otras instalaciones nucleares producen y contienen enormes cantidades de material “radiactivo” (págs. 39-42). Algunos materiales radiactivos son muy peligrosos para los seres vivos y muchos siguen siéndolo durante un tiempo increíblemente largo. Estos materiales no deben, de ningún modo, conseguir escapar en cantidad significativa de las instalaciones nucleares. Tales instalaciones liberan pequeñas cantidades de radiactividad al entorno, durante el funcionamiento normal. Uno de los campos de agria polémica está relacionado con las normas y los controles aplicados a estos escapes. Algunos críticos, con argumentos contundentes, consideran a las normas actuales demasiado tolerantes, especialmente si tenemos en cuenta el previsto incremento del número y del tamaño de las instalaciones nucleares. Otro tema importante es la seguridad de funcionamiento, no solamente de los distintos modelos de reactores propiamente dichos sino también de las instalaciones auxiliares, incluyendo los medios de transporte. Últimamente ha quedado desagradablemente claro que esa seguridad debe tener en cuenta la posibilidad no solamente de accidentes, sino también de sabotajes. Recientemente, un prolongado desacuerdo de los expertos sobre la seguridad ha afectado al diseño de los reactores más usuales, y continúa sin ceder. Otros modelos no se han visto, hasta ahora, sometidos a una vigilancia crítica tan intensa.

Una categoría de material radiactivo originado en las actividades nucleares requiere mención particular. Se trata de los residuos de “alta actividad”, que resultan después del proceso químico del combustible usado en el reactor (ver págs. 117-23). Los residuos de alta actividad contienen grandes cantidades de sustancias que son peligrosamente radiactivas y siguen siéndolo durante centenares de años. Lo que se ha de hacer con estos residuos es una cuestión todavía no resuelta. Se han propuesto soluciones provisionales, y se dice que el tratamiento temporal es adecuado, pero a largo plazo el tema resulta no ser técnico, sino ético. ¿Debemos crear estas sustancias peligrosas, en cantidades siempre crecientes, para dejadas en herencia a las generaciones venideras?

Dejando a un lado la ética, ha ido quedando poco a poco de manifiesto que las consideraciones sobre la seguridad afectan al costo global de la energía nuclear. De la misma manera que en la minería del carbón se hace necesario tener en cuenta los costes de las medidas sanitarias, la rehabilitación de los terrenos y el control de la contaminación, el empleo de la energía nuclear también introduce costes extras por las medidas adicionales de seguridad y las disposiciones correspondientes. Las comparaciones optimistas de costes, establecidas al principio de los 50, que favorecían a la energía nuclear en relación con los combustibles fósiles son todavía, por supuesto, contundentes; pero no resultan ya indiscutibles, como describiremos.

Por importantes que sean los recursos económicos en juego parece muy difícil que se puedan reunir garantías en torno a un aspecto que puede relacionarse muy estrechamente con la seguridad. A medida que el mundo depende cada vez más de los reactores nucleares como fuente de energía, el tráfico de materiales “fisibles” se incrementa; estos son materiales que pueden ser destinados a armas nucleares. Estudios competentes han demostrado que las medidas actuales para la seguridad de estos materiales son francamente formalistas. La perspectiva de la existencia de armas nucleares en manos de gobiernos inestables, organizaciones terroristas o fanáticos perturbados no es como para animar a tener una visión optimista del futuro. Las sugerencias actuales para hacer frente a este peligro se refieren a fuerzas especiales de policía gubernamental nuclear, la investigación oficial incansable de los historiales personales de los trabajadores nucleares, la administración monolítica

centralizada de la vida social y otras propuestas que se aproximan inquietantemente a una estructura social virtualmente totalitaria.

Resulta evidente, cuando contemplamos estas cuestiones arduas, que las decisiones que tomemos sobre la energía nuclear determinarán en gran medida la clase de mundo que nuestros nietos heredarán. Los problemas que ha creado esta tecnología constituyen un microcosmos notable de la amenaza actual que pesa sobre nuestro planeta. El peligro nuclear suscita una multitud de problemas sociales, políticos y hasta éticos, muchos de los cuales traen implicaciones a largo plazo, más allá de cualquier horizonte previsible. En suma, esos temas exigen el más completo análisis público y la participación más amplia posible en las cruciales decisiones a adoptar.

La participación pública en la toma de decisiones nucleares ha sido, hasta ahora, bien balbuceante, bien desesperada, principalmente porque los interrogantes parece que se ocultan en lo más enrevesado de la confusión científica. Pero el velo de misterio que envuelve los temas nucleares ha sido siempre, ante todo, un velo de secreto militar, no de inaccesibilidad intelectual. En los primeros tres capítulos describiremos por qué y cómo funcionan los reactores nucleares y las otras instalaciones que exigen. Si Vd. es ingeniero nuclear puede saltarse estos capítulos. Si no lo es, debe leerlos cuidadosamente, puesto que le facilitarán el determinar si los ingenieros nucleares tienen o no razón.

1. ¿Qué es un reactor?

Átomo y núcleo

Si usted coge un par de semiesferas de metal y las golpea sobre sí muy rápido, una cara contra la otra, pueden suceder dos cosas: un golpe estrepitoso, o bien la semiesfera, y todo lo que esté más próximo, pueden vaporizarse casi instantáneamente, en un reventón de increíble ardor. Si lo que sucede es esto último, puede estar seguro de que el metal era una forma particular de uranio. Confirmación que no le hará mucho bien.

Lo que usted ha vaporizado es energía primaria, desprendida de la estructura profunda del uranio. Esta energía del interior del uranio se dio a conocer al mundo el 6 de agosto de 1945, sobre el cielo de Hiroshima, en Japón. Nunca una fuente de energía había hecho un debut más terrorífico. Todavía, paradójicamente, la más poderosa energía que el hombre ha aprendido a desatar, proviene de la más diminuta reserva que, hasta ahora, ha aprendido a horadar el núcleo de un átomo.

¿Qué es un “átomo”? ¿Y qué es un “núcleo”? Suponga que coge un trozo de plomo y lo corta en pedazos cada vez más pequeños. Cuando los pedazos son tan pequeños que su cuchillo le resulte demasiado basto, cámbielo por otro imaginario y continúe cortando. Finalmente, los pedazos son tan pequeños que, de seguir cortando, no conseguirá ya dos pedazos de plomo. Al más pequeño de ellos que sigue siendo plomo, se le llama átomo de plomo.

La palabra “átomo” significa “indivisible”. Usted no puede dividir un átomo de plomo y seguir teniendo plomo. Pero sí puede dividir el átomo y conseguir pedazos más pequeños, que ya no son de plomo. Si empieza a dismantelar un átomo, la primera parte que consigue extraer se llama “electrón”. Hasta esta etapa, usted ha sido capaz de cortar sin tropezarse con ningún tipo de efecto eléctricos visibles, pero el electrón está cargado negativamente y lo que resta del átomo queda positivamente cargado. Las partes del átomo se han convertido en “iones”: un ión negativo (el electrón) y un ión positivo (lo que queda del átomo). Cada vez que extrae otro electrón hace todavía más positiva la carga de lo restante. El átomo resulta doblemente “ionizado”, triplemente “ionizado”, y así sucesivamente. Como las cargas negativas y positivas se atraen entre sí, es cada vez más dificultoso arrancar electrones sucesivos.

Suponga, no obstante, que consigue quitar todos los electrones (para la mayoría de los átomos esto es muy difícil en la práctica). Lo que ha dejado es el corazón del átomo: el núcleo. Ahí es donde están todas las cargas positivas. Además, ahora encontraría una dificultad enormemente creciente para cortar más. Sorprendentemente, pese a que el núcleo contiene sólo cargas positivas (que se repelen unas a otras), las partes que lo constituyen se adhieren mutuamente con una lealtad que hace parecer a los electrones de afuera francamente frívolos.

Resultaba más corriente hablar de “dividir el átomo”, pero el problema era más bien dividir el *núcleo* del átomo. Las bombas atómicas debieran haber sido llamadas bombas “nucleares” ya que la energía que liberan procede de la ruptura de los núcleos (uno, dos o más núcleos).

El uranio

¿Qué es lo que hace al uranio tan dramáticamente diferente de otras sustancias? Para apreciar sus características peculiares debemos considerar primeramente algo de física nuclear básica: esto es, en qué consisten los núcleos y cómo se comportan. Un átomo se compone de electrones que rodean un núcleo; a su vez, un núcleo consta de “protones” y de “neutrones”. Un protón posee una carga

positiva; un neutrón no tiene carga eléctrica y es “neutro”. De entrada, resulta difícil entender cómo un núcleo permanece absolutamente unido. Las cargas positivas de los protones intentan empujarlas violentamente hacia afuera. Pero dentro del volumen compacto del núcleo una nueva clase de fuerza hace aparición: una fuerza de atracción de corto alcance, inmensamente poderosa, actúa indistintamente entre protones y neutrones (que, desde este punto de vista, son todos “nucleones”). La fuerza nuclear de corto alcance los mantiene unidos, oponiéndose al efecto repulsivo de las cargas positivas de los protones. De esta forma, los neutrones actúan como “cemento nuclear”.

Sin embargo, en un núcleo que contiene 92 protones - que es núcleo de uranio - la fuerza repulsiva entre los protones está a punto de vencer la fuerza nuclear. Mientras haya 146 neutrones presentes, el núcleo puede permanecer difícilmente intacto. Esta forma de uranio, conteniendo un total 238 nucleones, se llama uranio-238 o U^{238}_{92} . Por razones que no nos afectan aquí, referentes a agrupamiento y la compatibilidad de los nucleones, la disposición siguiente más probable es un núcleo de uranio conteniendo tres neutrones menos: el uranio-235, U^{235}_{92} . Los átomos con estos núcleos más ligeros suponen alrededor del 0,7 por 100 del uranio que aparece de forma natural (si los núcleos; tienen el mismo número de protones, se trata de núcleos del mismo “elemento” químico: así, todo núcleo con 92 protones es el núcleo de un átomo de uranio. Los átomos cuyos núcleos tienen el mismo número de protones pero diferente de neutrones, se llaman “isótopos” del elemento: por ejemplo el uranio-238 y el uranio-235 son isótopos del uranio. El núcleo de uranio-235 posee una propiedad única entre más de doscientos tipos de núcleos que se encontraban en la naturaleza en cantidad significativa, antes de 1942. El núcleo de uranio-235 ya se encuentra bajo una tensión próxima a la rotura interna; un neutrón descañado que se le acerque puede romperlo completamente.

Le radiactividad produce radiación

Cuando un neutrón errante golpea un núcleo de uranio-235, el resultado es un “núcleo compuesto”) de uranio-236. Se le llama un núcleo compuesto porque no dura mucho tiempo. La energía añadida por el neutrón -incluso si es “lento” vence la precaria estabilidad del núcleo y, casi instantáneamente, se aleja. La rotura de un núcleo compuesto de uranio-236, habitualmente, da lugar a que dos quintas partes, aproximadamente, del núcleo, se desplacen en una dirección y las otras tres quintas partes, más o menos, en la dirección opuesta con, quizás, dos o tres neutrones sueltos esparciéndose. Los fragmentos que se esparcen, lo hacen con tanta energía que un medidor de masa revela una disminución: parte de la masa del núcleo original se ha convertido en energía. Esta es la fuente de las enormes energías producidas en estos fenómenos nucleares.

Por ejemplo, una subdivisión habitual da lugar a un conjunto de 38 protones y 52 neutrones, otro de 54 protones y 89 neutrones, y tres neutrones sueltos; en total 236 nucleones por impacto. El conjunto conteniendo 54 protones es un núcleo del gas inerte xenón; puesto que éste contiene en total 143 nucleones, se trata del xenon143.

Una rotura completa, como ésta, de un núcleo se llama “fisión”, por analogía con el término biológico empleado en la división de una célula que se reproduce. Con más precisión, esto se llama “fisión nuclear”. Cuando es provocada por el impacto de un neutrón adicional, se llama “fisión inducida”; este es el caso descrito del uranio-235. Algunos núcleos muy pesados son tan inestables que pueden romperse, incluso, sin ser golpeados por un neutrón; una rotura así se llama “fisión espontánea”. La fisión, sea inducida o espontánea, es la forma más violenta de rotura que un núcleo puede experimentar. Pero hay otras. Un núcleo de uranio-238, por ejemplo, aún sin estar próximo a la rotura, por su ligereza relativa, está sometido a una tensión importante: tan importante que, antes o después, es capaz de deshacerse de un trozo con dos protones y dos neutrones. Ya que esto

produce una reducción proporcionalmente mayor en el contingente de protones que en el de neutrones, lo que queda de núcleo, que ahora contiene solamente 90 protones y 144 neutrones, va perdiendo poco a poco a esa tensión (se trata de un núcleo del metal torio-234). El conjunto o “partícula” desprendida es idéntica, en muchos aspectos, a un núcleo ordinario de helio; pero como emerge con una velocidad considerable, y se abre paso a través de cualquier cosa que lo frene, recibe un nombre especial: es una “partícula alfa”. La mayoría de los núcleos con, por lo menos, 83 protones, sufren una rotura así de violenta; se llaman “emisores alfa”.

El equilibrio entre protones y neutrones en el torio-234, aunque es más satisfactorio, dista mucho de ser ideal. En efecto, emitiendo una partícula alfa, el núcleo se ajusta excesivamente. Esto conduce a una todavía más delicada forma de rotura. Fuera del núcleo conteniendo 90 protones y 144 neutrones, de repente, se desprende un electrón. Este es idéntico, en todo, al electrón que está fuera del núcleo; pero puesto que emerge con considerable velocidad, también recibe un nombre especial: es una “partícula beta”. El núcleo que queda, contiene ahora una carga positiva más de lo que tenía. Pero como un electrón tiene una masa mucho menor que un nucleón, hay el mismo número de nucleones que antes: 234. Un neutrón se ha convertido, aparentemente, en un protón. El núcleo contiene ahora 91 protones y 143 neutrones; este es un núcleo de protactinio-234. Como el torio-234, el protactinio-234 es también un “emisor beta”; cuando emite una partícula beta se convierte en uranio-234, que es un emisor alfa. Así, transformándose alternativamente de emisor alfa en beta, el núcleo se altera a sí mismo hasta que posee sólo 82 protones y 124 neutrones y es, por fin, estable: el núcleo del plomo-206.

Siguiendo su marcha, el núcleo se encuentra a sí mismo, por lo regular, después de emitir una partícula alfa o beta, todavía suavemente agitado o “excitado”. Para ajustarse a sí mismo, desprende una “ráfaga” de energía de una forma muy parecida a la luz ordinaria pero mucho más energética e invisible. Este estallido de energía se llama “rayos gamma”. Es idéntica en todo a los muy conocidos “rayos-X”, excepto en que los rayos-X provienen de los electrones que permanecen fuera de los núcleos, mientras que un rayo gamma procede de dentro del núcleo.

Consideremos también el núcleo del estroncio-90, uno de los dos fragmentos mayores formados por la fisión inducida del uranio-235 en el primer ejemplo. El núcleo del estroncio-90, un “producto de fisión”, posee un número de neutrones desproporcionadamente grande con respecto a sus protones, resultando como si procediera de un núcleo mucho más pesado que requiere más “cemento”. Por lo tanto, el núcleo del estroncio-90 es también un emisor beta. Antes o después, desprende un electrón de alta velocidad -una partícula beta- y uno de sus neutrones es reemplazado por un protón. Se convierte en un núcleo de ytrio-90, otro emisor beta que, por el mismo proceso, se convierte en un núcleo de circonio-90, que es estable. Las emisiones beta de los núcleos productos de fisión están seguidas frecuentemente por uno o más rayos gamma.

Hay, como consecuencia, cuatro formas por las que un núcleo puede alterarse a sí mismo: fisión, emisión alfa, emisión beta y emisión gamma. Desde un trozo de material conteniendo núcleos así de inestables, las emisiones que producen estos fenómenos se esparcen hacia afuera radialmente en todas direcciones; a este trozo se le llama “radiactivo” y a las emisiones -neutrones, partículas alfa y beta y rayos gamma- se les llama “radiaciones”. Una cantidad de núcleos que produzca 37.000.000.000 de tales emisiones por segundo, se dice que ostenta un “curio” de radiactividad (esta es la radiactividad de un gramo de radio, una de las primeras sustancias conocidas como radiactivas, descubierta por Marie Curie).

En una sustancia radiactiva es imposible decir si un núcleo determinado está a punto de rotura radiactiva o “desintegración”. No obstante, en buena parte de una particular especie nuclear

radiactiva o “radioisótopo”, una cierta fracción de los núcleos siempre se desintegra en un espacio de tiempo bastante regular. Por ejemplo, si Vd. empieza con mil núcleos de estroncio-90, 28 años después se habrán desintegrado 500 y le quedarán otros 500. Después de otros 28 años, 250 de los restantes 500 se habrán desintegrado y le quedarán otros 250, y así sucesivamente: independientemente de la cantidad de la que parta, 28 años después la mitad se habrá desintegrado y solamente quedará la otra mitad. Obviamente, la radiactividad correspondiente habrá decaído también a la mitad. Para el estroncio-90 el período de 28 años se llama su “período de semidesintegración”. Cada radioisótopo tiene un período de semidesintegración para cada forma de radiactividad que presente: en cada caso, el período de semidesintegración es el tiempo durante el cual la mitad de los núcleos, en una desintegración simple, y la radiactividad correspondiente, decaen a la mitad del nivel inicial. Los períodos de semidesintegración de los diferentes radioisótopos se extienden desde fracciones de millonésima de segundo hasta millones de años.

Los efectos de las radiaciones

Excepto cuando la desintegración radiactiva sucede en el vacío, la radiación emitida atraviesa la sustancia que la envuelve. Las consecuencias dependen de la sustancia, del tipo de radiación, de su energía y de su intensidad. Una partícula alfa, constituida por cuatro núcleos con dos cargas positivas, interactúa vigorosamente con los átomos de alrededor, separando los electrones y golpeando los núcleos hacia afuera. Haciendo esto, la partícula alfa cede su propia energía, viajando solamente una distancia corta pero produciendo un daño tremendo en su camino. La mayor parte de la radiación alfa es detenida por la delgadez de una hoja de papel. Una partícula beta, de masa mucho menor y con solamente una carga negativa, altera y expulsa a los electrones vecinos, pero pierde su energía menos velozmente y por lo tanto viaja algo más que una partícula alfa. La mayor parte de la radiación beta es detenida por una delgada hoja de metal. Un rayo gamma, sin carga eléctrica, pierde su energía mucho más gradualmente y puede viajar una distancia larga, ocasionando una relativamente pequeña cantidad de alteraciones en cualquier punto de su camino. Un neutrón, también sin carga eléctrica, es prácticamente libre de viajar una gran distancia y es frenado, principalmente, por colisión directa con los núcleos. La radiación gamma o un neutrón puede penetrar más de un metro en el hormigón.

Desalojando un electrón de un átomo se transforma el átomo en ión: de esta forma, las emisiones desde los núcleos son “radiaciones ionizantes”. Cuando la radiación ionizante pasa a través de un material provoca cambios en la estructura del mismo: unas veces, temporalmente, y otras permanentemente: unas veces, útiles y otras dañinos. Los efectos de la radiación ionizante dependen fundamentalmente de la energía que libere la radiación en una cantidad dada de material: a más energía, más alteración. La unidad básica de exposición a la radiación es el “roentgen”, llamado así después de que Wilhelm Roentgen descubriera los rayos X.

Los efectos de la radiación ionizante resultan particularmente importantes si la radiación atraviesa la materia viva; la delicada configuración molecular de la materia viva puede ser perturbada fácilmente por la radiación. Hay varias unidades para medir los efectos de la radiación en la materia viva. Las más comunes son las “dosis de radiación absorbida” o “rad” y el “roentgen equivalente hombre” o “rem”; la última tiene en cuenta la mayor o menor gravedad del daño que produce la radiación alfa o los neutrones, para una energía disponible equivalente. Para la radiación beta y gamma, un rad es aproximadamente lo mismo que un rem; para toda partícula alfa y los neutrones, un rad puede valer hasta veinte rem, dependiendo de la energía de las partículas.

La cuestión de los efectos biológicos de las radiaciones está envuelta en polémica. Pero se sabe que una dosis de quizás 400 rem de radiación sobre el cuerpo entero puede matar la mitad de los seres

humanos expuestos a ella; y dosis mucho más pequeñas pueden producir un daño celular tal que de lugar a leucemia y otras clases de cáncer. Además, el daño de la radiación a las moléculas complejas en las células reproductoras que contienen la información hereditaria, puede producir mutaciones en la descendencia. Incluso un simple rayo gamma puede trastocar un gen; puede producir efectos indeseables si este gene concreto estuviera en una célula reproductora que contribuyera a formar un niño.

Una discusión más detallada sobre la biología de las radiaciones aparece en el Apéndice B (págs. 297-303). Es suficiente decir que el peligro de la radiación para la materia viva parece incrementarse en proporción directa a la cantidad de exposición a la radiación, empezando desde las dosis más bajas. No parece haber una dosis umbral: es decir, una dosis por debajo de la cual no aparece ningún daño. Nosotros estamos siempre sometidos a continua radiación procedente de las sustancias radiactivas naturales de nuestro alrededor y de los rayos cósmicos. Cualquier actividad humana que tienda a añadir fuentes suplementarias de radiación a nuestro medio puede ser potencialmente dañina. El que sea más o menos dañina -y, a su vez, a cambio de qué beneficios- está todavía en debate; este libro, trata de hacer más inteligible un aspecto de este debate, cualquiera que sea su criterio.

La reacción en cadena

En un trozo de uranio siempre hay unos cuantos neutrones errantes, bien sea producidos por fisión espontánea o por los rayos cósmicos. Supongamos que uno de estos neutrones errantes hace que un núcleo de uranio-235 sufra la fisión. Además de los dos productos de fisión, expulsa hacia afuera a, quizás, dos o tres neutrones de alta energía (la posibilidad de que estos neutrones puedan surgir, virtualmente, en el instante de la fisión es mayor que 99 a 1: son los “neutrones instantáneos”. Pero hay una pequeña posibilidad de que un neutrón no pueda emerger hasta unos segundos más tarde: es el “neutrón retardado”. Como veremos, los neutrones retardados son de gran importancia). Hay tres posibilidades abiertas a los neutrones de alta energía de la fisión. Que un neutrón pueda alcanzar la superficie del material y escape. Que pueda golpear otro núcleo y ser absorbido sin ocasionar ninguna rotura inmediata. O bien que -lo que es más importante- pueda golpear otro núcleo y, a su vez, ocasionar la rotura de este núcleo. Las posibilidades de que un neutrón ocasione una fisión inducida tal dependen de la energía del neutrón y del núcleo que golpea. Un neutrón rápido que provenga de una fisión reciente puede hacer que un núcleo de uranio-238 se rompa; pero un neutrón rápido como éste no es el medio más efectivo de romper un núcleo de uranio-235. Si un neutrón rebota entre otros núcleos, saltando de uno a otro y cediendo su energía golpe a golpe, pronto va perdiendo velocidad hasta que se iguala con la energía calorífica del resto del material. Se trata, entonces, de un “neutrón térmico”. Solamente un neutrón rápido puede romper un núcleo de uranio-238. Pero un neutrón térmico, más que uno rápido, es mucho más apto para romper un núcleo de uranio-235.

Si en un trozo de uranio-235, un núcleo experimenta la fisión, los neutrones que emite pueden golpear otros núcleos, produciendo más fisiones y emitiendo más neutrones. Si hay núcleos de uranio-235, suficientemente juntos, el desgajamiento y esparcimiento se multiplica con sorprendente rapidez: más y más neutrones, más y más núcleos rotos, sus fragmentos se esparcen, más y más energía: es una “reacción en cadena”. Si hay suficiente uranio-235 dispuesto de forma compacta durante un tiempo suficiente y si la reacción de cadena está fuera de control, el resultado es una explosión nuclear una “bomba atómica”. Golpeando dos semiesferas apropiadas de uranio-235 entre sí, a muy alta velocidad, se puede, desde luego, dar lugar a una explosión nuclear; pero hay otras técnicas mucho más eficientes; y otros materiales.

Ni que decir tiene que esto se intentó tan pronto como resultó posible lograr la disposición correcta con el material adecuado; fue el 16 de julio de 1945, en el extremo de una torre elevada en el desierto, cerca de Alamogordo, en Nuevo México: la primera explosión nuclear del mundo, con el nombre codificado de “Trinidad”. Antes de que pasaran tres semanas, una bomba atómica hecha de uranio-235 devastó Hiroshima. Pero, al parecer, una “bomba atómica” no fue suficiente y, además, el uranio-235 no era el único núcleo que podía usarse. Un neutrón puede penetrar un núcleo de uranio-238 sin romperlo. Si sucede esto, el núcleo resultante, con muchos neutrones, pronto emite una partícula beta y después otra, hasta convertirse en un núcleo de plutonio-239. Como el uranio-235 -y solamente algunos otros isótopos, todos ellos muy raros hasta el momento presente-, el plutonio-239 es “fisible”: es decir, que puede experimentar una reacción en cadena de fisiones sucesivas, como la prueba “Trinidad” demostró. El 9 de agosto de 1945, una reacción en cadena así hizo desaparecer Nagasaki.

El reactor nuclear

Si las reacciones en cadena en el uranio-235 y el plutonio-239 solamente pudieran emplearse en las bombas, la situación sería ya suficientemente complicada. Pero, más de dos años antes de que se hubiera acumulado suficiente material fisible puro de cualquier clase, para hacer una bomba, resultó posible controlar la reacción en cadena: es decir, manteniéndola por sí misma, sin reproducirse fuera de control. Realmente, fue de esta forma como se produjo el plutonio para las bombas de Alamogordo y Nagasaki. La configuración utilizada para producir y controlar unas reacciones en cadena sostenidas se llama “reactor nuclear”.

La diferencia entre una reacción en cadena controlada y otra incontrolada es profunda. Una configuración de núcleos fisibles que puede experimentar una reacción en cadena incontrolada -una explosión nuclear- debe ser repentina y definitiva. Una disposición de núcleos fisibles que pueda sostener una reacción en cadena controlada debe ser organizada mucho más cuidadosamente. Curiosamente, se necesitan muchos más núcleos -es decir, mucho más material- para construir un reactor que para preparar una explosión. Esto es, por supuesto, sólo en parte, porque una explosión requiere un material fisible comparativamente puro: en un reactor, el material fisible está diluido, relativamente, y hay, como consecuencia, mucho más material en total. Pero debe haber también muchos más núcleos, así mismo fisibles. La razón de que suceda esto está en el papel jugado por los importantísimos neutrones.

Si una reacción en cadena ha de ser autosostenida, debe mantenerse a sí misma alimentada con neutrones. Consideremos la siguiente secuencia típica. Un neutrón se sumerge en un núcleo de uranio-235. El núcleo se rompe; además de los núcleos productos de la fisión, también expulsa tres neutrones. Uno de estos tres se escapa a través de la superficie del trozo de uranio y se pierde. Otro es absorbido por un núcleo de uranio-238, que comienza su transformación de dos etapas en plutonio-239, pero no se rompe. Este deja escapar otro neutrón. Si este tercer neutrón se introduce ahora en otro núcleo de uranio-235 y lo rompe, el proceso puede continuar; de otra forma, la reacción en cadena se bloquea.

En cualquier instante, dentro del trozo de uranio debe de haber el número correcto de neutrones de la energía adecuada para que la cadena se propague. En efecto, en una reacción en cadena sostenida, cada neutrón que se pierde motivando una fisión, debe de ser reemplazado por, exactamente, un neutrón, que hace lo mismo. El sistema, entonces, tiene un “factor de reproducción” de 1. Cuando esta condición se alcanza, se dice que el sistema es “crítico” y la situación se llama “criticidad” (obsérvese que “criticidad” no se usa aquí para implicar “peligro”). Si, por término medio, cada neutrón perdido cuando origina una fisión es reemplazado por más de uno que también producen

fisión, la reacción “se desboca”; el factor de reproducción es mayor que 1, y el sistema es “divergente”. Si por término medio, cada neutrón así perdido es reemplazado por menos de uno que produzca fisión, la reacción se detendrá; el factor de reproducción es menor que 1. Por esto es por lo que una pieza de uranio por debajo de unas dimensiones mínimas no puede, en condiciones normales, sostener una reacción en cadena: hay demasiada superficie a través de la cual los neutrones puedan escaparse.

Moderadores

Los requisitos básicos para que se de una reacción en cadena controlada continuamente son, entonces, primero, un conjunto de núcleos fisibles distribuidos adecuadamente en un espacio; y, segundo, una fuente autosostenida de neutrones del suficiente número y energía para mantener en marcha la reacción en cadena. En el uranio natural, solamente el 0,7 por 100 de los núcleos son del uranio-235 fisible. Estos núcleos fisibles, solamente siete de cada mil, no están lo suficientemente próximos como para mantener en marcha una reacción en cadena; demasiados neutrones son absorbidos por los núcleos de uranio-238, más pesados, sin producir la fisión. Para cumplir los requisitos para una reacción en cadena sostenida es necesario, o bien incrementar la proporción de uranio-235 con respecto al uranio-238, o bien frenar los neutrones a niveles térmicos de energía, a los que son mucho más adecuadamente absorbidos por el uranio-235; o hacer ambas cosas.

Como veremos (págs. 101 -105) el incrementar la proporción de uranio-235 fisible - llamado enriquecimiento del uranio - es un proceso complejo y caro. Pero, incluso un pequeño incremento, por ejemplo, de 0,7 a 2 ó 3 por 100, produce una diferencia notable, teniendo en cuenta que los neutrones de la fisión se frenan. Esto puede hacerse por medio de un material con núcleos ligeros: un “moderador”. Un neutrón rápido, golpeando un núcleo ligero en el moderador cede una fracción de su energía y después de unas cuantas colisiones ha amortiguado su energía térmica. Los mejores moderadores son los núcleos más ligeros: los del hidrógeno. El agua ordinaria, que contiene dos átomos de hidrógeno por molécula, es un moderador satisfactorio. Pero los núcleos del hidrógeno ordinario absorben neutrones. Mejor todavía es un tipo raro de núcleo de hidrógeno: la forma “protón más neutrón”, llamado “hidrógeno pesado” ó “deuterio”. Si dos átomos de hidrógeno pesados se combinan con un átomo de oxígeno, el resultado es una molécula de “agua pesada”, u óxido de deuterio (a veces escrito D_2O), que es, con mucho, el mejor moderador de neutrones rápidos.

Otra sustancia es empleada frecuentemente como moderador: el carbono - en forma de grafito. Un núcleo de carbono -seis protones y seis neutrones- posee mucha más masa que cualquier otro tipo de núcleo de hidrógeno, y no es, sin embargo, tan buen moderador. Pero el grafito es menos caro que el agua pesada; además, es sólido, con lo que puede ser usado estructuralmente en un reactor.

Diseño y funcionamiento de un reactor

Para construir un reactor de uranio-235, normalmente uranio metálico u óxido, natural o enriquecido: es el “combustible” (también puede usarse el plutonio-239, pese a que éste -como veremos conlleva algunas dificultades). Para un gran reactor necesita muchas toneladas de combustible, muchas más de lo necesario para alcanzar la criticidad. Un motivo obvio para el empleo de este combustible extra es permitirle a usted manejar el reactor por algún tiempo antes de reemplazar el combustible. Pronto quedarán claras otras razones.

Encierre las piezas del combustible en unas envolturas llamadas “vainas” para sujetarlo y confinar los productos de la fisión que se producirán. Sitúe los conjuntos de combustible sellado, llamados

“elementos combustibles”, sujetándolos cuando sea necesario; recuerde que pueden ser muy pesados. Intercale los elementos combustibles con el moderador, para retardar los neutrones, y con el absorbente de neutrones, para que le permita controlar las reacciones en cadena. Incluya también instrumentos de medida que le indiquen lo que está sucediendo dentro del reactor. Necesita saber, en particular, la temperatura y la concentración de neutrones en varios lugares dentro del reactor.

Ahora ya está en condiciones de arrancar el reactor. Antes del arranque, con todos los absorbentes en el interior del reactor acaparando neutrones, la densidad de éstos es tan baja que es difícil de medir, salvo que, intencionadamente incluya usted una fuente separada de neutrones, como si fuera un fulminante. Un tipo habitual de absorbente es una barra a través del interior del conjunto: una “barra de control”. Una barra así incorpora un material como el boro, que absorbe neutrones; como una esponja. La barra puede hacerse, por ejemplo, de acero al boro. Mientras que haya suficientes barras de control en presencia, no es posible la reacción en cadena. Para arrancar un reactor -para hacer posible una reacción en cadena empieza retirando las barras de control.

La región del reactor en la que tiene lugar la reacción se llama “núcleo”². Retire las barras de control muy lentamente fuera del núcleo, normalmente con cortos pasos, en adecuada simetría, para mantener una disposición más o menos uniforme de la densidad de neutrones dentro del reactor. A su debido tiempo, su reactor “se hace crítico” se establece una reacción en cadena autosostenida, en la que cada neutrón que se pierde a causa de la fisión es sustituido por, exactamente, un neutrón (bien instantáneo, bien retardado) que hace lo mismo. Si la reacción en cadena pudiera mantenerse sólo por los neutrones instantáneos resultaría “crítica instantánea” y difícil de controlar. La dependencia de la reacción en cadena de los neutrones retardados le permite a usted ajustar el nivel de la reacción gradualmente, en lugar de bruscamente.

El sacar el absorbente fuera de una reacción en cadena mantenida se llama “añadir criticidad”; la densidad neutrónica aumenta y el nivel de la reacción en cadena también. Pero la generación es gradual porque algunos de los neutrones no emergen inmediatamente después de la fisión. Cuanto menor es la reactividad añadida, mayor es el tiempo necesitado por la densidad neutrónica para aumentar en una proporción dada. Este tiempo se llama “período del reactor” y es una medida muy importante de cómo el reactor puede ser adecuadamente controlado. Cuando un reactor tiene un período corto es propenso a ser inestable. Por supuesto que insertando absorbente – “añadiendo reactividad negativa” - se produce un efecto inverso. Cuando se consiga el nivel deseado vuelva usted a reponer los absorbentes para estabilizar la reacción en ese nivel.

Para economizar neutrones, puede rodear el núcleo del reactor con un reflector para que reboten los neutrones errantes y vuelvan a la región de la reacción. Los mejores materiales reflectores son los materiales moderadores; en efecto, usted puede extender el volumen del moderador fuera de la región de los elementos combustibles. Puesto que la presencia o ausencia del reflector afecta a la densidad neutrónica en el núcleo puede añadir reactividad añadiendo reflector o viceversa; algunos modelos de reactor utilizan este efecto para las tareas de control.

2

Aunque podrían emplearse tanto la palabra “corazón” como “núcleo”, lo habitual es utilizar esta última. (Esta nota, y todas las restantes a pie de página, se deben al traductor de la obra.)

Antes de tirar de las barras de control lo suficientemente hacia afuera como para permitir a su reactor alcanzar la criticidad debe tomar precauciones contra la radiactividad que se vierte fuera del núcleo. Ni las partículas alfa, ni las beta conseguirán salir de la envoltura del combustible (excepto si hay fuga); pero los rayos gamma y los neutrones pueden desplazarse a través de metros de espesor de hormigón y ser todavía peligrosos para la materia viva. Por consiguiente, rodee su reactor con suficiente hormigón u otro “blindaje” protector para limitar la radiación en el exterior a un nivel tan bajo como estime aconsejable.

Envenenamiento de xenon

Tanto el arranque como la parada normales de un reactor son procesos lentos y pueden exigir muchas horas. Si es necesario detener la reacción en cadena rápidamente, por ejemplo en caso de una avería, la parada de emergencia se llama “*scram*”. Si se deja solo un reactor en funcionamiento su nivel de reacción irá decayendo gradualmente, no necesariamente porque los núcleos fisibles hayan sido consumidos, sino también debido a la aparición de productos de fisión que absorben neutrones.

El más voraz de todos es el xenon-135. El fenómeno consiguiente, llamado “envenenamiento del xenón”, es una demostración de las casi surrealistas circunstancias en las que opera el reactor.

Cuando arranca el reactor por primera vez, el combustible no contiene xenón-135. Varias horas después del arranque, los procesos de fisión generan telurio-135 y yodo-135, que, a su vez, generan xenon-135, que comienza a engullir neutrones. Cada núcleo de xenon-135 que consigue capturar un neutrón es, de este modo, transformado en xenon-136, mucho menos voraz. Los núcleos de xenon-135 que no consiguen capturar neutrones sin embargo se convierten, por desintegración beta, en cesio-135, también mucho menos voraz. Como consecuencia, después de que las cosas han conseguido asentarse, el xenon-135 se pierde según se va generando. Hay una cierta concentración de xenon-135 en el núcleo del reactor, que permanece inalterable mientras la reacción en cadena se desarrolla al mismo nivel. Vd. prevé cuantos neutrones se pierden en favor del xenon-135 y actúa en consecuencia. Pero cuando cambia el nivel de la reacción, altera el equilibrio y las consecuencias pueden ser embarazosas.

El yodo-135 se convierte en xenon-135 con un período de semidesintegración de 6,7 horas. El xenon-135 se convierte en cesio-135 con un período de semidesintegración de 9,2 horas, ligeramente más larga. Suponga apagado su reactor. El flujo de neutrones caerá casi a cero; el xenon-135 deja de capturar neutrones. Desde el momento de la parada se genera más xenon-135 del que se pierde: mientras su reactor está apagado la cantidad de neutrones absorbidos en el núcleo está estabilizada, aumentando imperceptiblemente. Si, varias horas más tarde, intenta arrancar su reactor otra vez, puede incluso con las barras de control completamente fuera, ser incapaz de añadir reactividad suficiente como para alcanzar la criticidad. Para estar siempre en condiciones de arrancar su reactor en cualquier momento después de la parada, le resultará necesario incluir más combustible o, de otra forma, arreglárselas para disponer de un exceso de reactividad utilizable, por encima de lo que exige el funcionamiento normal. Aparte del coste obvio del combustible extra, esto significa que, incluso en operación normal, debe dejar algunas barras de control parcialmente insertadas. No es fácil hacer eso sin distorsionar la densidad neutrónica uniforme en el núcleo, y ocasionar un tipo de reacción en cadena que no es el ideal. Los diseñadores de reactores tienen que decidir qué tipo de compromiso pueden alcanzar mejor, para satisfacer los conflictivos requisitos hechos necesarios por fenómenos como el envenenamiento del xenon.

Recarga

Mientras Vd. maneja su reactor, tienen lugar cambios en el combustible. El número de núcleos de uranio-235 disminuye gradualmente mientras sufren la fisión. Algunos de los núcleos de uranio-238 capturan neutrones y cambian a plutonio-239. Algunos de estos núcleos de plutonio-239 se fisionan. Otros, capturan neutrones adicionales y se convierten en plutonio-240, plutonio-241 y otros isótopos de elementos más pesados que el uranio (“actínidos transuránidos”). Así, se forman los productos de fisión; la mayoría de ellos son radiactivos y experimentan cambios radiactivos hacia núcleos más estables, algunos muy rápidamente, otros muy lentamente. Los productos de fisión capturan también neutrones. La composición del combustible del reactor se va haciendo progresivamente más compleja según va avanzando la reacción en cadena; cada vez resulta más difícil seguir la pista de todos los procesos simultáneos que tienen lugar. Algunos de los productos de fisión son gaseosos, como el kriptón y el xenón; estos productos gaseosos de fisión se forman dentro del combustible, ejerciendo presión y tratando de escaparse. El intenso flujo de neutrones causa estragos en la estructura cristalina del combustible, en la envoltura y, posiblemente, en el moderador, empujando los núcleos fuera de su lugar y provocando tensiones y deformaciones en el material. Antes o después, hay que extraer el combustible gastado y sustituirlo.

Hay todo un conjunto de pasos diferentes para “recargar” el reactor. Algunos modelos pueden recargarse mientras el reactor está en marcha, sustituyendo uno o más elementos combustibles de una vez: “recarga con carga”³. Otros modelos exigen ser parados para la recarga y se reemplaza un tercio del núcleo cada vez: “recarga sin carga”. Todos los procedimientos de recarga deben llevarse a cabo con extremado cuidado, debido a la intensa radiactividad de los productos de fisión en el núcleo del reactor y en el combustible usado o “irradiado”.

Energía de un reactor

Si construye un reactor con dimensiones suficientemente grandes, y permite que la reacción en cadena se desarrolle con la adecuada rapidez, la energía producida por la rotura de los núcleos de uranio-235 (y plutonio-239) hace que se caliente todo el conjunto (que, potencialmente, puede calentarse mucho). La fisión completa de todos los núcleos de un kilogramo de uranio-235 produciría una energía total de un millón de kilovatios-día, que es el calor que daría un millón de estufas eléctricas de un filamento funcionando durante 24 horas. Esto es mucho calor. De acuerdo con esto, el combustible de un reactor debe disponerse de tal forma que el calor se desprenda de forma gradual, para mantener controlables las temperaturas. La cantidad de calor desprendido por unidad de volumen en el corazón de un reactor se llama “densidad de potencia”. Puede ser de algo más de varios centenares de kilovatios de calor por litro. Si esta efusión de energía no llega a fundir -ni, claro está, hervir- el conjunto del material, debe ser sustituido eficientemente.

Extraiga Vd. el calor que produce el reactor bombeando con un fluido absorbente a través del núcleo, envolviendo a los elementos combustibles calientes. El fluido puede ser un gas, como aire, dióxido de carbono o helio; o un líquido, como el agua o un metal fundido. La elección de un fluido de refrigeración –“refrigerante”- depende de la velocidad a que deba ser extraído el calor, de lo caro que sea el fluido, de lo fácil que sea bombearlo, etc. El sistema de refrigeración puede ser abierto, haciendo pasar aire ordinario o agua, directamente, a través del núcleo y devolviéndolo a la atmósfera o a un río; una instalación así tiene la virtud de la simplicidad, pero puede tener también serios inconvenientes, sobre todo si las vainas del combustible se agrietan. Por otra parte, el sistema de refrigeración puede consistir en uno o más circuitos cerrados, en los cuales el mismo refrigerante pasa a través del núcleo una y otra vez, extrayendo calor, descargándolo fuera del reactor y,

³ Puede parecer redundante la “recarga con carga”, pero corresponde a la expresión “*on-load refuelling*” y a la jerga ordinaria. La “recarga sin carga” traduce la expresión “*off-load refuelling*”.

después, completando el camino por el circuito y volviendo a través del núcleo otra vez. Si el sistema de refrigeración consta de circuitos cerrados, pueden utilizarse refrigerantes caros o raros, puesto que están confinados dentro del sistema y no se pierden. Un circuito cerrado puede también estar presurizado, lo que en la mayoría de los casos incrementa notablemente la eficiencia del refrigerante; un gas a presión es más denso y puede absorber más calor por unidad de volumen.

Un sistema de refrigeración de cualquier modelo, extrae el calor del núcleo del reactor, lo que se haga con el calor, después de esto, depende de los objetivos perseguidos con el reactor. Los primeros reactores de gran potencia fueron manejados exclusivamente para generar neutrones y convertir el uranio-238 en plutonio-239, para armas nucleares. El calor producido en sus núcleos era precisamente una molestia de la que había que librarse, expulsándolo al aire circundante o al agua. Pero con instalaciones adecuadas, este calor, como el calor de la combustión del carbón o del petróleo, puede ser utilizado. Particularmente puede generar vapor de agua para mover turbinas o generadores eléctricos. Un conjunto de este tipo - un reactor nuclear suministrando calor para mover una central generadora eléctrica - se llama “estación” nuclear o (en los Estados Unidos) “planta” nuclear⁴.

En el capítulo siguiente observaremos mucho más detalladamente la estructura y el funcionamiento de los principales tipos de reactores. Todos los modelos producen energía debido a la fisión de los núcleos. Pero cada uno emplea una disposición distinta de estos núcleos: diferentes diseños del moderador, del combustible, del sistema de refrigeración, de los controles, etc. Estas diferencias determinan implicaciones muy importantes, como veremos.

⁴ Nosotros emplearemos siempre la palabra “central”.

2. Tipos de reactores

Teniendo en cuenta la multiplicidad de combustibles, moderadores, sistemas de control, circuitos de refrigeración, distribuciones especiales, etc., los modelos posibles de un reactor nuclear se cifran en centenares. Al principio, los diseñadores de reactores tuvieron su gran día, dejando correr alborozadamente sus fantasías; algunas de sus proposiciones hicieron poner los pelos de punta. Otras parecían factibles: supeditación de la ingeniería, utilización de materiales manejables, controlables, seguros y a última hora- incluso económicos de construir y manejar.

Como veremos, las principales líneas de desarrollo de estos reactores comerciales arrancaron de los tres socios del programa “Bomba Atómica” de la Segunda Guerra Mundial, el “Proyecto Manhattan”. Gran Bretaña, en su momento, desarrolló reactores refrigerados por gas y moderados con grafito; los Estados Unidos desarrollaron reactores refrigerados y moderados con agua “ligera” ordinaria; y Canadá desarrolló reactores moderados con agua pesada y refrigerados de distintas formas. Tanto Gran Bretaña como Estados Unidos también iniciaron el desarrollo de reactores que empleaban neutrones rápidos, con refrigerante de metal líquido y sin moderador. Antes de que describamos estos y otros reactores con detalle puede ser útil identificar algunos aspectos generales del diseño de reactores.

Para generar una producción dada de energía, un reactor puede disponer de una gran masa de núcleo con una producción de calor relativamente baja por unidad de volumen, o densidad de potencia; por el contrario, puede tener un núcleo mucho más compacto con una densidad de potencia más alta. El combustible de uranio natural tiene una baja concentración de núcleos fisionables; un reactor que use ese combustible debe disponer de un volumen de núcleo mayor que el de uno que use combustible de uranio enriquecido o plutonio. Un reactor voluminoso es más caro de construir que uno pequeño de la misma potencia. Por otra parte, el combustible de uranio natural es más barato que el de uranio enriquecido. Lo que pierda usted construyendo el reactor más grande y más caro puede, consiguientemente, ahorrarlo en costes de combustible.

La energía producida por un reactor puede medirse directamente como calor. Si ese calor se usa en un “reactor de potencia”, para generar electricidad, solamente una fracción de la energía calorífica total reaparece al final como energía eléctrica; el resto es descargado en los alrededores como calor de baja temperatura. En general, cuanto más alta sea la temperatura que el reactor puede alcanzar, mayor será la fracción de energía que puede convertirse en electricidad. Como norma, solamente del 25 al 32 por 100 del calor total producido se convierte en electricidad, en las instalaciones funcionando actualmente. Un sistema que convierte el 30 por 100 del calor en electricidad se dice que es un 30 por 100 eficiente, principalmente porque el restante 70 por 100 del calor no es utilizado (con esto no decimos que no pueda ser usado, sino simplemente, que no lo es). La producción de energía de un reactor puede expresarse, como consecuencia, bien como calor por ejemplo, en “megavatios térmicos”, MWt o bien en electricidad por ejemplo, en “megavatios eléctricos”, MWe (un megavatio equivale a un millón de vatios). Una regla práctica satisfactoria consiste en admitir que, para un determinado reactor de potencia, la producción en MWe está entre un cuarto y un tercio de la producción en MWt. Excepto para el caso de que se utilice el calor en baja temperatura, la fracción MWe/MWt es una medida de la eficiencia del sistema.

Si el núcleo de un reactor funciona a una temperatura más alta, produce vapor de agua de alta calidad y genera electricidad más eficientemente. Por otra parte, los materiales que soportan estas altas temperaturas son, probablemente, más caros. De forma similar el combustible de un reactor que puede permanecer en el núcleo por un tiempo más largo y a una temperatura más alta reduce la cantidad de combustible necesario para la recarga; pero este combustible también cuesta más caro.

Un reactor que puede ser recargado “en funcionamiento” es decir, sin tener que pararlo es más adecuado para una red eléctrica, pero las instalaciones de recarga son, en general, más caras que construir que las de recarga “en parada”.

El sistema de refrigeración de un reactor puede funcionar a una presión cualquiera, desde la atmosférica hasta las por ahora - 150 atmósferas, aproximadamente. Cuanto más alta sea la presión, más pesado y resistente debe ser el sistema a presión. Esto tiene repercusiones, no solamente en cuanto a costes, sino también en cuanto a seguridad, ya que una rotura del sistema a presión puede tener consecuencias graves, como veremos. Algunos modelos encierran el núcleo en una vasija de presión de acero pesado soldado; otros, emplean hormigón pretensado. Todavía hay otros modelos que distribuyen el material del núcleo en un conjunto de tubos de presión mucho más pequeños.

La interrupción de la refrigeración puede controlarse más fácilmente en un reactor de baja densidad de potencia que en uno de alta densidad de potencia, en el cual las subidas bruscas de temperatura pueden ocurrir con extrema rapidez. Las grietas o defectos en el sistema de presión pueden ser más fáciles de subsanar en un reactor con refrigerante de baja presión que en uno de alta presión; una gran vasija de presión soldada, de geometría compleja, resulta intrínsecamente más vulnerable a alteraciones importantes que una vasija de presión de hormigón pretensado, o un sistema construido con tubos de presión más pequeños.

Un reactor grande puede costar menos que dos pequeños que produzcan la misma energía en total; pero, como veremos después, esto no ha de suceder necesariamente, si el reactor grande debe añadir muchos elementos extra al equipo, por razones de seguridad, funcionamiento y mantenimiento. Todos los modelos de reactor comparten una misma característica: un rápido incremento de las dimensiones de los sucesivos reactores con el mismo diseño básico. En los reactores, quizás más que en la mayoría de las otras tecnologías de ingeniería, un cambio de escala no es frecuentemente, cuestión de cantidad, sino de calidad, introduciendo un nuevo paquete de incógnitas en la ingeniería.

Reactores experimentales y de investigación

El primer reactor nuclear fue construido en medio de gran secreto, en lo más crudo del período de guerra, en un sótano fuera de uso bajo el campo de fútbol de Stagg Field, en la Universidad de Chicago. La construcción del reactor comenzó en noviembre de 1942 y duró menos de un mes. Se mecanizaron unos bloques de grafito. En algunos de estos bloques fueron sumergidas bolas de uranio metálico o de polvo comprimido de óxido de uranio, hubo de emplearse óxido de uranio porque, en esa época, solamente había disponibles 5.600 kilos de uranio metálico puro. Los bloques de grafito se dispusieron, fila a fila, en una pila creciente de forma casi esférica dentro de una estructura de madera como soporte. A intervalos, dentro de esta pila, había unas cintas de cadmio, absorbente de neutrones, para asegurar que los neutrones errantes no iniciaran una reacción en cadena prematura. Se incluían también instrumentos para medir la densidad neutrónica, que eran comprobados regularmente para ver cómo progresaba la “pila” hacia las dimensiones críticas.

En el momento en que se había añadido la fila de bloques número 57, ya estaba claro que solamente las cintas de absorción de neutrones mantenían la pila fuera de criticidad. En ese momento la pila tenía más de 6 metros de alta, con una anchura y una profundidad equivalentes, y contenía alrededor de 36 toneladas de uranio y unas 340 toneladas de grafito.

El 2 de diciembre de 1942 los científicos y los técnicos estaban agrupados en la tribuna del terreno de juego observando la lectura de los instrumentos, mientras Enrico Fermi daba instrucciones y un

joven físico, llamado George Weil, extraía lentamente la última barra de control. Poco después de las 2,30 p.m. los instrumentos registraron un aumento uniformemente creciente de la densidad neutrónica en la pila. La pila había alcanzado criticidad: se estaba desarrollando la primera reacción en cadena nuclear autosostenida.

El calor generado en la pila se mantuvo, inicialmente, por debajo de los 0,5 vatios. Pero el 12 de diciembre el nivel de la reacción fue elevado hasta que el calor generado el “nivel de potencia” alcanzó los 200 vatios -. Se podía alcanzar mayor reactividad, pero a este nivel de potencia la radiación de la pila era potencialmente dañina para el personal. Como consecuencia, en la primavera de 1943, la Pila Chicago número 1 – CP1 como se le llamó se desmontó. Poco después, fue reconstruida con más uranio y grafito, dentro de un adecuado blindaje contra las radiaciones, en un lugar fuera de Chicago, y se le llamó Pila Chicago número 2; podía ser manejada con una potencia media de 2 kilovatios (2 kWt) e, intermitentemente, llegar hasta 100 kWt. Durante años, hasta que el nombre resultó totalmente inapropiado, a cualquier reactor nuclear se le llamaba “pila atómica”, después del primer reactor.

CP1 fue el primer verdadero reactor nuclear. Pero incluso antes de desarrollarse se construyeron y probaron treinta pilas de dimensiones y formas inferiores a las necesarias. Tales instalaciones, que no pueden generar su propio suministro de neutrones sin una fuente suplementaria de neutrones, se llaman “conjuntos sub-críticos”. Desde el principio de los años 40 se han construido y desmantelado centenares de conjuntos subcríticos en muchos países; y se han construido muchos reactores verdaderos con finalidad experimental o investigadora. La variedad de tipos y gamas de los reactores experimentales y de investigación es enorme, dependiendo de las pretensiones por las que se construyen. Los reactores experimentales y de investigación tienen una serie de utilidades. Para bombardear una muestra de material con neutrones, la muestra ha de ser introducida, a través de un canal adecuado, en el núcleo del reactor. La intención puede ser, simplemente, estudiar el efecto del bombardeo de los neutrones sobre el material, quizás un material que ha de usarse en la construcción de un reactor. O bien la intención puede ser convertir algunos de los núcleos estables de la muestra, por absorción de neutrones, en radioisótopos para usos médicos, industriales, agrícolas o investigadores. Algunos reactores poseen una “columna térmica”: una ventana de grafito a través del blindaje del reactor, por la que emerge una corriente de neutrones térmicos para trabajos de investigación fuera del reactor (pese a que se suele llamar “neutrones lentos” a los neutrones térmicos, su velocidad no es menor de 2.200 metros por segundo, considerablemente superior a la de un proyectil de alta velocidad).

Algunos reactores de investigación se diseñan para ampliar el estudio de la “física del reactor” propiamente dicha: densidades neutrónicas, temperaturas, producción de plutonio-239 a partir del uranio-238, aparición de productos de fisión, efectos de estos productos de fisión en la reactividad, comportamiento de nuevos diseños de los conjuntos de combustible, efectos de los “acontecimientos imprevistos” dentro del reactor, etc.

Obviamente, los reactores de investigación son también importantes para el entrenamiento de científicos y técnicos cualificados, en las a menudo sutiles e intrincadas y potencialmente peligrosas variables del diseño y manejo del reactor. Muchos países alardean ahora de poseer grandes centros para investigación y desarrollo de reactores. No siempre están estos reactores en países fuertemente industrializados. Uno de los reactores de investigación más duraderos del mundo, en funcionamiento desde 1959, es el reactor Trigo, de 5 kW en Zaire.

Un conocido diseño de reactor de investigación es el de “tipo piscina”: posee un núcleo de uranio altamente enriquecido en el fondo de un profundo tanque de agua. El agua actúa de moderador,

reflector, refrigerante y blindaje. También permite una visión directa del núcleo mientras el reactor está en criticidad; esto no es posible en ningún otro diseño de reactor. Debido a que las emisiones radiactivas del reactor viajan por el agua más deprisa que la luz, el agua de la piscina resplandece con una misteriosa luz azul, llamada “radiación de Cerenkov”.

La gran mayoría de los reactores, de cualquier dimensión y finalidad, han sido experimentales; las modificaciones y el desarrollo de cada nuevo reactor han tenido que diseñarse y elaborarse sobre la base de la experiencia anterior, que en este campo es frecuentemente inadecuada, irrelevante o ambas cosas a la vez. La Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos llegó tan lejos como para considerar a *todos* los reactores que autorizó, con cualquier finalidad, como experimentales, hasta 1971.

Reactores productores de plutonio

Todos los reactores de uranio producen plutonio, mediante el bombardeo por neutrones del uranio-238. Los primeros reactores a gran escala fueron construidos expresamente con este propósito: producir plutonio para las bombas nucleares. Un modelo piloto se construyó en, 1943 en Oak Ridge, en Tennessee. No pudo ser construido sobre el principio de un único bloque edificio; no hubiera sido pequeño el inconveniente de desmantelar el reactor entero para recuperar el plutonio. Además, la relación de transmutación del uranio en plutonio depende de la densidad neutrónica, que a su vez depende del nivel de la reacción en cadena. Si la reacción es suficientemente rápida como para crear plutonio en una proporción utilizable, el calor generado resulta un problema importante. La fisión completa de todos los núcleos de uranio-235 desprende alrededor de un millón de kilovatios día de energía; cada fisión de uranio-235 es capaz de iniciar, como mucho, una fisión adicional con un neutrón y crear un núcleo de uranio-239 (y, por consiguiente, plutonio-239) con otro. Esto es, para crear un kilogramo de plutonio-239 se requiere la fisión de, aproximadamente, un kilogramo de uranio-235 y la disipación de todo ese calor.

Como consecuencia, el reactor de Oak Ridge fue construido con la forma de un cubo de grafito perforado de una parte a otra con canales paralelos y horizontales. En estos canales se colocaron barras cilíndricas de uranio natural recubiertos de aluminio. Cuando una barra de combustible había sido suficientemente irradiada se empujaba a través del reactor cayendo fuera del núcleo de grafito en un tanque de agua, para el reprocesado posterior. Las barras de combustible estaban adaptadas libremente a los canales, dejando sitio para un flujo de aire refrigerante que extraía el calor de la fisión (a la sazón, 3,8 MWt).

Incluso mientras el modelo piloto de Oak Ridge estaba en construcción, empezaron los trabajos en el primer reactor a gran escala, que fue construido en la orilla del río Columbia, cerca de la ciudad de Richland, en el estado de Washington. La construcción del primer reactor a gran escala, de una altura como la de un edificio de cinco pisos, solamente duró desde junio de 1943 hasta septiembre de 1944. A principios de 1945 había en funcionamiento tres reactores a gran escala. El conjunto de las instalaciones industriales, llamado la “reserva de Hanford” iba a ocupar, con el tiempo, cerca de 1.600 kilómetros cuadrados e incluía nueve reactores productores, mas un extenso dispositivo de plantas auxiliares. Los reactores productores de Hanford eran de diseño similar al del reactor de Oak Ridge; pero su producción de calor era tan intensa que la refrigeración por gas la opción original fue helio resultó demasiado difícil. La refrigeración se logró bombeando agua desde el río Columbia, directamente, a través del núcleo del reactor y volviendo al río.

Después del final de la Segunda Guerra Mundial, se construyeron reactores productores de plutonio en Gran Bretaña, Francia y la Unión Soviética. Los reactores productores británicos se construyeron

en la costa de Cumbria, en el lugar de una fábrica de municiones en desuso, que fue rebautizado como Windscale. Como los reactores de Hanford, los de Windscale usaban uranio natural recubierto, de aluminio, dispuesto en canales horizontales en un núcleo de grafito. La ausencia de una adecuada fuente de agua, supuso que los reactores de Windscale fueran refrigerados con aire, impulsado por potentes ventiladores a través de los canales de refrigeración del grafito, y devueltos a la atmósfera a través de una chimenea de 126 metros de altura. Esta refrigeración por aire en un solo sentido estaba muy lejos de ser la solución ideal, y sus inconvenientes quedaron posteriormente demostrados en el dramático accidente, en 1957, que destruyó el reactor de Windscale número 1.

Si la finalidad de un reactor es producir plutonio-239 fisible, la relación de producción de plutonio puede ser “optimizada” variando la geometría del núcleo, a expensas de otras características de diseño. El combustible del reactor debe ser sustituido a intervalos relativamente cortos; menos de dos años, en promedio. En este tiempo, el plutonio-239 fisible, en el combustible, juega un significativo papel en la reacción en cadena, experimentando la fisión y, de esta manera, desaparece al tiempo que se forma. Además, parte del plutonio-239 absorbe uno ó más neutrones adicionales, sin experimentar fisión, resultando plutonio-240, plutonio-241 y plutonio-242. El plutonio-240, que se acumula de forma relativamente rápida, es susceptible de experimentar fisión espontánea, pero no es fácilmente fisiónable cuando es golpeado por un neutrón y no puede, de esta forma, participar en una reacción en cadena. Es, por otra parte, imposible de separar del plutonio-239. A veces, una fracción del isótopo 240 hace que el plutonio resulte algo incierto como material militar: de ahí la necesidad de retirar el combustible irradiado antes de que se cree demasiado plutonio-240. Sin embargo, el “reprocesado” del combustible, para extraer el plutonio, es una operación cara y compleja. El reprocesado con una frecuencia mayor de la que es estrictamente necesaria para mantener la reactividad del reactor, puede solamente justificarse dentro de la notable elasticidad de los presupuestos militares.

Reactores. de potencia refrigerados por gas

Reactores Magnox

Los primeros reactores de potencia fueron, por supuesto, militares, como los reactores de producción de plutonio: reactores para submarinos; y reactores de finalidad múltiple, productores de plutonio y de electricidad (un “submarino nuclear” es llamado así tanto por su energía de propulsión como por su carga). Los primeros “reactores de potencia”, así considerados, entraron en funcionamiento en los Estados Unidos y la Unión Soviética, en 1954. El reactor norteamericano tenía una potencia de 2,4 MWe, y el reactor soviético APS1, en Obninsk, ahora considerado usualmente como el primer reactor de potencia del mundo, una potencia de 5 MWe.

No obstante, por razones obvias, el público en general supo poco sobre los reactores de potencia norteamericanos y soviéticos. Por descuido, ya que no por consenso general, la “primera central nuclear” del mundo fue la de Calder Hall, en Gran Bretaña, cuyo primer reactor arrancó en 1956. La pretensión de Calder Hall a la precedencia es totalmente defendible aunque sea solamente porque el primer reactor de Calder Hall, como sus tres sucesores, era de un orden de magnitud mucho mayor que el reactor de Obninsk, con una potencia de 50 MWe. El 17 de octubre de 1956, Su Majestad la Reina Isabel II conectó energía desde Calder Hall a la Red Nacional Británica; en medio de una rutilante publicidad internacional nació la era de la “energía nuclear” (esto es, de la electricidad, no del poder militar).

Los cuatro reactores de Calder Hall, en un emplazamiento junto a Windscale, eran “reactores de potencia” sólo secundariamente. A despecho de la fanfarria y de la primicia real, los reactores de

Calder Hall y los cuatro reactores similares construidos en Chapelcross, al otro lado de la raya escocesa, fueron construidos y optimizados con el fin de producir plutonio militar para incrementar la producción de los reactores de Windscale. Pese a todo, las centrales nucleares de Calder Hall y de Chapelcross se convirtieron en la piedra angular del programa nuclear británico. Sus características de diseño fueron desarrolladas y mejoradas a través de la primera generación de centrales nucleares comerciales británicas, comprendiendo eventualmente un total de veintiocho reactores, incluyendo uno en Italia y otro en Japón. El patriarca nuclear de esta familia, el primer reactor de Calder Hall, funciona todavía bien, más de veinte años después de su primer arranque. Muchos de los factores que afectaban a su diseño y construcción todavía preocupan a los ingenieros nucleares.

Como los reactores de Windscale, este reactor de Calder Hall usa combustible de uranio natural y moderador de grafito. Pero su distribución espacial es muy diferente, así como otros muchos detalles. La diferencia fundamental es que el reactor de Calder Hall tiene un sistema de refrigeración de circuito cerrado, haciendo posible recuperar el calor del reactor a temperatura y presión suficientemente altas como para ser utilizado. El sistema presurizado en circuito cerrado también asegura una más eficiente refrigeración que, a su vez, permite a la reacción en cadena operar y producir plutonio más rápidamente.

El interior del modelo de Calder Hall es una voluminosa vasija de presión de acero soldado, que encierra el núcleo del reactor, que es atravesado de arriba a abajo por canales de combustible. El combustible de Calder Hall está encapsulado, no en aluminio, sino en una aleación especial de magnesio llamada “Magnox”, que es mucho menos propensa a absorber neutrones y es más fuerte y menos susceptible a la corrosión con la alta temperatura y el flujo de neutrones existentes en el núcleo del reactor. A la familia completa de reactores que usa este combustible siempre se le ha llamado Magnox.

El núcleo contiene un conjunto de instrumentos que transmiten lecturas de temperaturas, densidades neutrónicas y otros datos a la sala de control. Cada sector del núcleo también tiene canales para varios tipos de barras de control que se introducen en el reactor desde arriba y están sujetas en unas grapas electromagnéticas, a fin de que cualquier fallo en el reactor desconecte los imanes y deje caer las barras en el núcleo, para detener la reacción de fisión.

La vasija de presión, su contenido y sus aditamentos, se expanden y se contraen con los cambios de temperatura. La combinación de los esfuerzos térmicos resultantes, de las fuerzas gravitacionales debidas al peso de los componentes, la vibración de las partes móviles y del refrigerante de circulación rápida y los, a veces, imprevisibles efectos de la irradiación intensa y prolongada de los neutrones situaron a los diseñadores de Calder Hall ante un reto cuyo equivalente todavía desafía a todo ingeniero nuclear.

La propia vasija de presión de acero está encerrada en un blindaje biológico de hormigón de más de dos metros de espesor, pero, ya que los penetrantes rayos gamma y los neutrones viajan en línea recta, una disposición apropiada en zigzag, corta toda la radiación hacia afuera.

El peso total del reactor y sus estructuras auxiliares es considerable unas 22.000 toneladas y los requisitos del emplazamiento son severos; cualquier hundimiento puede agrietar el hormigón, reduciendo la eficacia del blindaje.

El gas caliente de refrigeración sale del edificio del reactor a través de cuatro conductos de refrigeración hacia cuatro “intercambiadores de calor” (expresión que, en realidad, significa calderas), en forma de torre. Dentro de cada uno hay un laberinto de tubos conteniendo agua; el

dióxido de carbono caliente pasa envolviendo los tubos, cediendo su calor al agua, que se convierte en vapor, y se usa para mover unos turbogeneradores. Cuando el gas ha cedido su calor útil, aparece por el extremo inferior del intercambiador de calor de la vasija de presión del reactor y sube otra vez a través de los canales de combustible.

Ya que los cuatro lazos del circuito de refrigeración están presurizados se han de prever medidas especiales para cambiar los elementos del combustible y para otras tareas de mantenimiento dentro del núcleo del reactor. El acceso a los canales, para recarga y servicio, se hace desde arriba, a través de agujeros en el techo horizontal de la protección de hormigón, que se llama la “tapa de la pila”. En la tapa de la pila, área de trabajo encima del reactor, hay “máquinas de carga” ó de descarga móviles, que son estructuras voluminosas y complejas. Para cambiar el combustible en el reactor, la “máquina de descarga” se posiciona sobre una abertura de acceso, sujeta sobre la superficie del techo de la pila y presurizada. Se quita la tapa del blindaje, se extienden las grapas hacia abajo, a través de una tubería vertical dentro del núcleo y se extraen los elementos irradiados del combustible de un canal, colocándose dentro de las gruesas paredes de la máquina de descarga; todo esto, por control remoto, debido a los peligros de la radiación. Se reemplazan los pasadores de protección, la máquina de descarga se despresuriza y se desplaza, y la máquina de carga, provista de combustible nuevo, se sitúa en posición. El ciclo completo se repite, otra vez por control remoto, para bajar nuevos elementos a su sitio: sujetar, presurizar, desatornillar, reatornillar, despresurizar y soltar.

El modelo Magnox de Calder Hall fundamentalmente previsto para la producción de plutonio se para para la recarga. No obstante, en el desarrollo del diseño Magnox para centrales nucleares comerciales, no es necesario interrumpir el funcionamiento del reactor para la recarga: puede conseguirse continuamente a ritmo de pocos canales por semana, mientras el reactor suministra energía “en carga”. En cualquier caso, el combustible irradiado, intensamente radiactivo con los productos de fisión, se traslada dentro de la máquina de descarga, y se deja caer en una “piscina de refrigeración”: un tanque profundo de agua que sirve para aislar y enfriar el combustible mientras los productos de fisión de vida media corta decaen dentro de él a un nivel menos peligroso de actividad. Después de un lapso de tiempo adecuado normalmente, 150 días el combustible irradiado es transportado a Windscale, para “reprocesar”.

Se construyeron en total, ocho centrales Magnox, cada una con dos reactores idénticos, para la *Central Electricity Generating Board* (Agencia Central de Generación de Electricidad, CEGB), y una para la *South of Scotland Electricity Board* (Agencia de Electricidad del Sur de Escocia)⁵. Los detalles de diseño variaron considerablemente de central a central, aunque todas incorporaron la recarga en funcionamiento por medio de una máquina única de carga-descarga. Los reactores de la central de Berkeley usan vasija de presión de acero cilíndrico, mientras que los reactores de la

5

Esto es: Berkeley, Bradwell, Hunterston (Escocia), Trawsfynydd, Hinkley Point, Dungeness, Sizewell, Oldbury y Wylfa.

central de Bradwell, construida al mismo tiempo, usan vasija esférica. La central de Hunterston se recarga, no desde arriba, sino desde abajo, donde la temperatura es más baja. Las distintas centrales tienen diferentes instalaciones de intercambiadores de calor y elementos de generación de vapor, diferentes edificios de contención, etc.

Quizás, la variación mas importante en las centrales Magnox está en la potencia, que fue aumentando progresivamente. Para adaptar este incremento en potencia y dimensiones, las dos últimas centrales de la CEGB introdujeron una modificación importante en el diseño. Resulta prohibitivamente dificultosa la soldadura de una vasija de presión de acero, más allá de unas ciertas dimensiones, debido a las restrictivas normas necesarias exigidas para un reactor. Como consecuencia, la central de la CEGB de Oldbury asumió un concepto enteramente nuevo: la vasija de presión no fue fabricada de acero soldado, sino de hormigón pretensado, material mucho más manejable para estructuras grandes y complejas. En el diseño de Oldbury van encerrados dentro de la vasija de presión de hormigón no solamente el núcleo del reactor sino también los intercambiadores de calor y los circulantes de gas. El hormigón pretensado sirve tanto de vasija de presión como de blindaje biológico; los conductos del gas se eliminan completamente, desapareciendo uno de los principales caminos de escape de la radiactividad en caso de accidente. El diseño con hormigón pretensado hizo posible un incremento de potencia de más de dos veces en la última central Magnox de la CEGB en Wylfa, Gales.

La densidad de potencia de las centrales Magnox, del orden de 0,9 kilovatios por litro es baja, para las normas nucleares. Debido a su baja densidad y, como consecuencia, baja capacidad térmica, el gas es un refrigerante menos eficiente que un liquido, el resultado es que el nivel de generación de calor en un núcleo refrigerado por gas debe mantenerse bajo (esto, a su vez, impone una limitación global en la producción máxima de calor utilizable, ya que una salida alta entraña un gran volumen de núcleo, con complicaciones adicionales de ingeniería). Otra característica de interés es la “potencia específica”: potencia generada por la masa unidad de combustible. La potencia específica del combustible de Calder Hall es de unos 2,40 kilovatios por kilogramo de uranio; la del combustible de Wylfa, de unos 3,16 kilovatios por kilogramo de uranio. La potencia específica, a veces, se llama “relación de combustible”. El “grado de quemado” del combustible es la producción de calor acumulado por unidad de masa; se mide comúnmente en megavatiosdía por tonelada de uranio. El quemado es, evidentemente, medida de cuantas fisiones suceden dentro de una cantidad dada de combustible.

Uno de los principales objetivos de los diseñadores de combustible es conseguir un alto grado de quemado, es decir, ser capaces de dejar más tiempo el combustible en el reactor, antes de que resulte demasiado perturbado y demasiado agobiado con los productos de fisión como para funcionar adecuadamente. Las limitaciones en el quemado del combustible Magnox son numerosas. El uranio natural metálico posee una estructura cristalina complicada y experimenta una gran variedad de cambios indeseables a altas temperaturas e intensos flujos neutrónicos. Un quemado de entre 3.000 y 4.000 megavatiosdía por tonelada de uranio aproximadamente es todo lo más que puede esperarse, confortablemente, en el combustible Magnox, Este limitación fue uno de los diversos factores que, prácticamente, acabaron con el programa Magnox y provocaron la búsqueda de un nuevo concepto.

El único programa nuclear importante que también optó por los reactores refrigerados por gas fue el francés. Los pequeños reactores franceses de Marcoule y Avoine empezaron a funcionar en 1958. La segunda unidad de AvoineChinon2, un reactor de 200 MW alcanzó criticidad en 1964 y Francia ha construido en total, desde entonces, siete reactores de potencia refrigerados por gas, con

moderador de grafito, y un reactor de 70 MWe, refrigerado por gas y moderado con agua pesada⁶. Pero los intereses franceses se han desplazado después, marcadamente, del diseño refrigerado por gas al de agua ligera, en colaboración con los constructores norteamericanos de reactores (ver pág. 195).

Reactores avanzados refrigerados por gas (AGRs)

Incluso mientras las centrales Magnox empezaban a construirse, comenzaron los trabajos en el diseño de una segunda generación de reactores de potencia refrigerados por gas: el reactor avanzado refrigerado por gas (advanced gascooled reactor, AGR). El objetivo era alcanzar más altas temperaturas del gas para incrementar la eficiencia de la generación de electricidad; más alta potencia específica para hacer más compacto el reactor; y más alto grado de quemado para reducir la frecuencia de la recarga. Las temperaturas que se alcanzan con el combustible Magnox están limitadas por las características de la aleación Magnox y del uranio metálico. El uranio metálico sufre un cambio cristalino de fase a los 665oC, acompañado de una expansión; su comportamiento, incluso por debajo de esta temperatura, es complejo, ya que se expande en diferente medida en diferentes direcciones, con el incremento de temperatura. El punto de fusión del Magnox es de unos 645oC; a esta temperatura, además de fundirse, el Magnox puede también incendiarse.

Como consecuencia, el combustible de más alta temperatura debe usar otra forma de uranio. La forma más comúnmente elegida es el dióxido de uranio, UO₂, a menudo llamada óxido de uranio. Mientras que el uranio metálico funde a 1.130oC, el óxido de uranio solamente lo hace a los 2.800oC. Sin embargo, el óxido de uranio tiene una baja conductividad térmica, mucho más baja que la del uranio metálico. Cuando el uranio metálico está sufriendo una reacción de fisión, su alta conductividad térmica permite que la temperatura sea más o menos uniforme en todo el grosor de la barra de combustible, incluso si ésta es de varios centímetros. Esto no se produce en el caso del óxido de uranio. Si el óxido de uranio, sólido sufre fisión, el calor generado en el interior no consigue salir fácilmente hacia la superficie; el interior está mucho más caliente que la superficie. Los elementos de combustible de óxido de uranio han de tener un diámetro más pequeño que los elementos de uranio metálico, incluso pese a que el punto de fusión del dióxido de uranio es bastante más alto.

El bloque de armazón básico del combustible de óxido de uranio es normalmente un “pellet” hecho de polvo de óxido de uranio que se ha comprimido, compactado o sometido a cualquier otro proceso adecuado para tomar la forma de un pequeño cilindro endurecido de las dimensiones de una barra de regaliz. Una columna de estos pellets, que puede alcanzar varios metros de longitud, dependiendo del diseño del combustible, es apilada en un tubo de paredes delgadas, para formar una “varilla de combustible”. El tubo debe de hacerse de un material que pueda soportar altas temperaturas. Algunos combustibles de óxido usan una aleación de circonio, que presenta ventajas pero que es cara; el material que se usa mas generalmente es acero inoxidable, que es el caso del combustible para el reactor avanzado refrigerado por gas. El acero inoxidable implica un problema adicional; es fuerte y se comporta bien estructuralmente, pero tiene un insano apetito de neutrones. Como consecuencia, el porcentaje de uranio²³⁵ en el óxido de uranio debe incrementarse por encima de su nivel natural; es decir, que el óxido de uranio debe enriquecerse. En el combustible

6

Estos reactores; GCR son: los tres de Chinon, dos de Saint Laurent, el de Bugey1 y el de Vandellós (vendido a España).

AGR el uranio se enriquece normalmente en, aproximadamente, un 2 por 100.

El primer AGR que incorporó este modelo de combustible fue un pequeño prototipo construido en Windscale. El AGR de Windscale arrancó en 1962; mientras esto se escribe, es todavía el único AGR que siempre ha mantenido criticidad. Desde finales de los 60 se han estado construyendo cinco grandes centrales, cada una de ellas con un par de AGR gemelos; los diseños de las centrales difieren, pero todas han dado problemas, algunos de ellos agudos.

La base del diseño, en conjunto, del AGR, es la vasija de presión del hormigón pretensado, que se desarrolló por primera vez para las dos últimas centrales Magnox. Como un reactor Magnox, un AGR tiene un núcleo de grafito mecanizado, bajo una cúpula parecida a una enorme campana de acero, con un gran número de aberturas en la tapa, a través de la cual pasan las tuberías de acceso a los canales del combustible. Fuera de la cúpula pero todavía dentro de la vasija de presión están los intercambiadores de vapor o calderas y, debajo de ellos, los circulantes de gas.

La cantidad de combustible en un AGR es considerablemente inferior a la de un Magnox de potencia comparable, mientras que la potencia específica es considerablemente más alta. El gas de refrigeración emerge por los canales del combustible a una temperatura de alrededor de 650oC, más de 300oC por encima de la temperatura normal de funcionamiento de un Magnox.

Un AGR se recarga con una única máquina, que tira de una ristra completa de combustible de ocho elementos a la vez, fuera del reactor. Como consecuencia, la propia máquina de recarga tiene la altura de un edificio de cuatro pisos, y el edificio del reactor ha de construirse como un hangar de aviación para adaptarlo a ella. Una única máquina sirve para los dos reactores de una misma central, desplazando entre ellos, sobre un puente guía o unos raíles, el almacén de combustible y el estanque de combustible usado.

Reactores de alta temperatura refrigerados por gas (HTGR)

Cualquiera que desea disponer de una fuente de calor ha de tener dos objetivos en la mente: la cantidad de calor total producido en la unidad de tiempo (es decir, la energía total) y la temperatura a la cual el calor es utilizable. Hay una inimaginable cantidad de calor en el océano; pero su baja temperatura lo hace de reducido uso. Mientras los diseñadores iban aumentando las dimensiones del reactor, para incrementar la producción de energía, también iban avanzando hacia más altas temperaturas. Incluso funcionando un AGR a pleno rendimiento resulta una fuente de calor mediocre, al menos en lo que se refiere a temperatura. Puede usarse para proporcionar cierto vapor para mover un turbogenerador y producir electricidad, pero solamente con una eficiencia moderada. Muchas otras aplicaciones industriales más refinadas quedan excluidas por la baja temperatura del calor.

La limitación en la temperatura a la que se genera el calor no influye para nada en el propio sistema de la reacción en cadena. Bajo las condiciones adecuadas una reacción en cadena puede desarrollarse a temperaturas que pueden alcanzar las que tienen lugar en el centro de una explosión nuclear, millones de veces más alta que la de las calderas de combustible fósil. No obstante, mucho antes de que tales temperaturas se alcancen resulta particularmente difícil mantener todo el conjunto con un mínimo de orden. Ya hemos hecho observar la torpeza del uranio metálico y la envoltura Magnox a temperaturas por encima de los 600oC; otros materiales de los reactores presentan problemas similares, aunque a distintas y más altas temperaturas. En definitiva, si realmente se trata de permitir altas temperaturas, sin que el reactor entero se pandee y se deforme irremediamente perdiendo el contorno, o sucedan reacciones químicas indeseables, se necesita un nuevo concepto.

El nuevo diseño que ha recibido la mayor atención es uno que renuncia totalmente a los metales en el núcleo del reactor, en favor de combinaciones sofisticadas de materiales cerámicos refractarios, aptos para soportar sin resentirse temperaturas que alcanzan fácilmente miles de grados centígrados.

Los trabajos sobre los dos primeros reactores de esa clase empezaron en 1957. Bajo la égida de la predecesora de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), se estableció un proyecto en Winfrith, Dorset, Inglaterra, para construir el reactor de alta temperatura refrigerado por gas “Dragón”; en los Estados Unidos, la General Atomic Company inició el programa que le llevó a la construcción del reactor Peach Bottom1, cerca de Filadelfia, la primera central nuclear HTGR del mundo. El reactor Dragon arrancó en 1964; Peach Bottom1 en 1965; y otro pequeño HTGR, el AVR, cerca de Jülich, Alemania Federal, en 1966. Se han acometido, desde entonces, centrales más grandes, en los Estados Unidos y en Alemania Federal; hasta ahora, solamente uno en Fort Saint Vrain, Colorado, ha alcanzado criticidad, en 1974⁷.

Los distintos diseños del HTGR están, como los reactores Magnox y los AGRs, refrigerados por gas y moderados por grafito. Pero en este punto, la semejanza cesa bruscamente. En lugar de tener segregados, esencialmente, el material fisible y el grafito, los diseños del núcleo HTGR implican una unión íntima de combustible y moderador. El material fisible del combustible HTGR es, al menos inicialmente, óxido o carburo de uranio altamente enriquecido hasta un 93 por 100 de uranio-235, y forma pequeñas esferas. Las esferas están revestidas con una o dos capas de carbón refractario y una de carburo de sílice, y embutidas en grafito.

Algunos tipos de combustible HTGR también incluyen partículas de forma similar pero que no contienen uranio, sino otro elemento, torio. El torio tiene propiedades nucleares bastante parecidas a las del uranio-238. El torio natural es casi enteramente torio-232. Un núcleo de torio-232 puede absorber un neutrón para transformarse en torio-233, que es fisible. El proceso es análogo, a aquel por el cual el uranio-238 se transforma en plutonio-239. El uranio-233, como el uranio-235, experimenta fisión inducida cuando es golpeado por un neutrón lento, y a su vez produce más neutrones para sostener una reacción en cadena. El uranio-238 y el torio-232, pese a no ser materiales fisibles, se llaman materiales “fértils” porque pueden ser transmutados, por el bombardeo de neutrones, en los materiales fisibles plutonio-239 y uranio-232.

La fertilidad del torio está resultando de creciente interés. Cuando se le permite al combustible HTGR de uranotorio, por primera vez, experimentar una reacción en cadena, todas las fisiones tienen lugar, por supuesto, en los núcleos de uranio-235. No obstante, el torio se transforma gradualmente en uranio-233; y sucede que los núcleos de uranio-233 emiten más neutrones por fisión, en conjunto, que el uranio-235 o el plutonio-239. Mucho antes que en el uranio-233, en las partículas de torio se realiza una contribución sustancial a la densidad neutrónica total en el combustible bajo reacción; y también, por supuesto, a la producción total de calor del núcleo. Se intenta que todos los modelos actuales HTGR funcionen con el ciclo del torio. El uranio-233 que queda en el combustible residual puede ser recuperado por el reprocesado e incorporado a sucesivos elementos de combustible.

7

Sin embargo, solamente a partir de 1976 pudo decirse que funcionó con cierta regularidad. General Atomic, a causa de su modelo HTGR, ha quedado al borde de la quiebra. En Alemania Federal se espera que entre en funcionamiento otro reactor de este tipo, el de Uentrop, hacia 1983.

La geometría actual del núcleo en los diversos HTGR varía, pero el efecto global es, generalmente, alcanzar una distribución mucho más uniforme del material fisible y del moderador a través del corazón. El núcleo del Dragón, un hexágono de solamente 1,6 metros de alto, no es muy grande. Comparado con el núcleo de Wylfa o, incluso, con el de Calder Hall, resulta minúsculo. Es capaz, no obstante, de producir 20 MW de calor, con una potencia específica de 1,5 MW por kilogramo. El grado de quemado del combustible Dragón llega a ser de 100.000 MWdía por tonelada, comparado con los 3.000 MWdía por tonelada del combustible Magnox.

A despecho del predominio del carbono en el núcleo, el refrigerante utilizado en el HTGR no es dióxido de carbono, sino helio.

Una característica curiosa del HTGR es su “coeficiente de reactividad de temperatura negativa”. Esta expresión significa, simplemente, que cuando la temperatura sube la reactividad baja. Una razón es que la expansión térmica desplaza los núcleos fisibles bastante lejos. No todos los modelos de reactores proceden de esta forma a lo largo de su espectro de funcionamiento. Para algunos reactores, en determinadas circunstancias, un incremento en la temperatura del núcleo produce un incremento en la reactividad. En este caso, un incremento en la temperatura tiende a relanzarse a sí mismo. Si el incremento inicial de la temperatura es inesperado, lo último que el operador del reactor puede desear es proporcionar más reactividad de la suya propia. En definitiva, un reactor que muestra “coeficiente de reactividad de temperatura positiva” está expuesto si se permite la expresión a “sobrereaccionar”. Como consecuencia, el coeficiente intrínseco de reactividad de temperatura negativa es una atractiva característica del HTGR.

Se encuentra en construcción un modelo de HTGR radicalmente diferente, en Schmehausen, Alemania Federal. En este modelo, llamado “reactor de lecho de piedras”, el núcleo es un enorme cajón, relleno con combustible cerámico, moldeado de forma tal que parece bolas de billar negras de dimensiones exageradas. Las bolas incorporan tanto el material fisible como el moderador de carbono. El helio refrigerante circula a través del cajón de bolas. Mientras el reactor funciona, las bolas son agitadas lentamente cayendo por el cajón y apareciendo por el fondo. Si han alcanzado su límite de irradiación se descargan; y si no, son retornadas hacia la parte superior por otro camino.

La conveniencia de aumentar la eficiencia del vapor que se produce para la generación de electricidad es, en sí misma, una recomendación para los HTGR de cualquier diseño. Pero también existe esta posibilidad usando un HTGR en un ciclo directo, pasando el helio caliente directamente a través de una turbina y eliminando completamente el ciclo de vapor. Otra aplicación, que ahora recibe atención creciente, es la utilización de un HTGR para producir calor de proceso para usos; industriales de alta temperatura, como acerías. Incluso se ha informado que investigadores soviéticos están haciendo progresos hacia la transformación directa del calor de un HTGR en electricidad, a escala utilizable. Usando un conjunto de células de siliciogermanio, se dice que son capaces de producir una salida constante de 10 KW, por un simple efecto termoeléctrico escalonado, sin partes móviles.

Reactores de agua ligera

Reactores de agua a presión (PWRs)

Como los primeros reactores británicos de potencia, que fueron construidos para producir plutonio militar, los primeros reactores de potencia norteamericanos también empezaron bajo los auspicios militares, si bien específicamente como centrales energéticas. La Marina norteamericana se percató,

después de la Segunda Guerra Mundial, de que un submarino impulsado por energía nuclear no necesitaría subir a la superficie para renovar su suministro de oxígeno, habida cuenta de que el “quemado” del combustible nuclear al contrario que el petróleo no requiere oxígeno. Animados por esta idea y obligados por las limitaciones de espacio en un submarino, los ingenieros norteamericanos desarrollaron un reactor que empleaba un núcleo de una densidad de potencia relativamente alta, con elementos combustibles sumergidos en un tanque de agua ordinaria llamada “agua ligera” para distinguirla del agua pesada - a presión suficiente para no dejarla hervir. El “primer reactor de potencia jamás construido”, de acuerdo con sus constructores, alcanzó criticidad el 30 de marzo de 1953 en una imitación del casco de submarino fijado a tierra en la *National Reactor Testing Station* (Estación Nacional de Prueba de Reactores, NRTS) en Idaho. El siguiente año vio la botadura del *Nautilus*, el primer submarino movido por energía nuclear, alimentado por un reactor a presión. En 1957 el reactor del submarino regresó a tierra, mientras arrancaba la central de Shippingport, cerca de Filadelfia, la primera central nuclear en los Estados Unidos. En los años siguientes el reactor de agua a presión, o PWR, ha resultado el más popular del mundo. Mientras esto se escribe, hay 128 reactores en funcionamiento o en construcción, en 17 países, y muchos más en proyecto.

La estructura básica de un PWR es una gran vasija de presión de acero soldado, con una tapa sujeta al extremo superior por un anillo de pernos pesados. La vasija de presión contiene el núcleo del reactor y otras partes, llamadas “internas del reactor”, como las barras de control; el volumen restante está ocupado completamente por agua “ligera” ordinaria a una presión de unas 150 atmósferas. El núcleo está constituido por elementos de combustible, cada uno de ellos consistente en un haz de varillas de combustible en toda su longitud. Una varilla de combustible PWR es un tubo de aleación de circonio llamada “circaloy”, de aproximadamente un centímetro de diámetro, lleno de pellets cortos cilíndricos de dióxido de uranio. En lo que a los neutrones se refiere, la vaina de circaloy se comporta relativamente bien, mucho mejor que el acero inoxidable (aunque es más cara). Pero el agua en la que todo el conjunto está sumergido es como se señaló en el capítulo 1, una ansiosa infatigable de neutrones, y para eliminar su influencia perturbadora el uranio en pellets de combustible PWR se enriquece con, aproximadamente, el 3 por 100 de uranio-235. El agua del interior de la vasija de presión sirve, simultáneamente, de moderador, reflector y refrigerante. Por la parte superior del corazón sale a través de tuberías soldadas hacia la vasija de presión. Los PWRs pueden tener dos o más “lazos” en el circuito de refrigeración. En cada lazo, la tubería a través de la cual el agua se introduce en la vasija de presión se llama “rama fría” y aquella a través de la que sale se llama “rama caliente”. Algunas de las más intensas discusiones de los años recientes se han centrado en las consecuencias de una supuesta rotura en una rama fría de un PWR.

La rama caliente de un lazo de refrigeración de un PWR conduce el agua refrigerante, caliente a un generador de vapor o caldera. El agua caliente del reactor pasa a través de miles de tubos sumergidos en más agua, a una presión considerablemente más baja. Aunque el agua presurizada dentro de los tubos no puede hervir si puede hacerlo el agua a baja presión, fuera de los tubos. El vapor resultante es procesado y conducido a un conjunto turbogenerador. El agua primaria de refrigeración vuelve a través de la rama fría a la vasija del reactor, impulsada por una bomba en el refrigerante primario. Cada lazo de refrigeración también incluye un “presurizador”, en el que se evapora o condensa una cantidad determinada de agua para mantener la presión del refrigerante y compensar los efectos de la dilatación y compresión térmicas mientras la potencia de la central varía. El presurizador puede ayudar también para neutralizar incrementos indeseables de la presión del sistema de resultados de fallos. Los calentadores eléctricos de inmersión en un presurizador pueden generar 2.000 kW; un poco exagerado para un sistema doméstico de agua caliente.

Sin duda, la característica más controvertida de un PWR son los sistemas de emergencia de

refrigeración del núcleo, previstos para impedir el sobrecalentamiento del núcleo del reactor en caso de accidente. Pero mejor que describirlo aquí será más apropiado retrasar su descripción al capítulo 7; puede que haya pocas tecnologías que hayan sido sometidas a una crítica tan exhaustiva (e inconcluyente).

Los sistemas de control e instrumentación de un PWR varían grandemente de diseño. Pero los conjuntos de barras de control están habitualmente suspendidos por encima del núcleo dentro de la tapa de la vasija de presión, con los mecanismos motores funcionando a través de la tapa, desde arriba. Un PWR se recarga fuera de funcionamiento, es decir con el reactor parado. Al reactor se le hace enfriar. Entonces se inunda con agua una cámara en forma de piscina, encima del reactor el “pozo del reactor” para aportar blindaje y refrigeración; la tapa se suelta y se desplaza a un lado, descubriendo el interior del reactor. Ya que la maniobra total lleva mucho tiempo, en cada recarga se cambia una parte sustancial de todo el combustible, generalmente un tercio más o menos, del núcleo. Los diseñadores de un PWR usualmente prevén una operación de recarga cada año.

Ni que decir tiene que un PWR está, como cualquier reactor de potencia, encerrado en un fuerte blindaje. La propia vasija de presión está rodeada por dos o más metros de hormigón, extendiéndose hacia arriba para formar las paredes laterales de la cavidad del reactor. Es usual dotar de un cierto blindaje al circuito primario completo generadores de vapor, bombas del primario, presurizadores y conducciones porque el refrigerante primario es, generalmente, ligeramente radiactivo. El mismo edificio del reactor se prevé, usualmente, que sirva de contención secundaria.

Algunos PWRs proporcionan cerca de los 4.000 MW de calor con una densidad de potencia de unos 100 kW por litro. Pero la baja temperatura de refrigeración alcanzable usando agua a presión manejable unas 150 atmósferas, como se observó hace del PWR una fuente de calor relativamente ineficiente para generar electricidad. Pese a ésto, continúa encontrando ávidos clientes.

Reactores de agua en ebullición (BWRs)

El interés norteamericano por los reactores de refrigeración por agua tuvo su origen en los reactores de Hanford y fue ampliado por los PWRs de los submarinos. Se sabía que el agua que llega a hervir era más efectiva en la extracción de calor, pero se pensó que la ebullición originaría fácilmente inestabilidades en el núcleo del reactor. El agua en un núcleo así sirve también de moderador; si se forma una burbuja de vapor, el efecto local en la reactividad es fulminante y sus consecuencias difíciles de predecir. Pero los experimentos de mediados los 50 demostraron que se podía hacer hervir el agua realmente, en un núcleo de reactor. Como consecuencia, se desarrolló un nuevo diseño de reactor, que es, con mucho,, el más simple de concepto de todos los reactores de potencia: el reactor de agua en ebullición, o BWR .

Los BWRs y PWRs son frecuentemente mencionados juntos, como “reactores de agua ligera” o LWRs. En un BWR el agua hace de moderador, reflector y refrigerante; y, además, cuando hierve produce vapor que es conducido directamente para mover un turbogenerador. Una vez que ha pasado por las turbinas el agua de refrigeración es condensada y bombeada otra vez hacia el “hervidor”, que es la vasija de presión del reactor.

La presión que la vasija debe soportar no necesita ser mucho mayor que la del vapor que se produce (usualmente, menos de la mitad que en un PWR). Como consecuencia, la vasija de presión no necesita ser tan gruesa. Una vasija de presión BWR incluye también el conjunto completo de captación y procesado del vapor, en la parte superior del núcleo. Las barras de control, sin embargo, entran en el núcleo BWR desde abajo. Los circuitos de refrigeración de un BWR poseen poco

parecido con los de un PWR. En un BWR el agua hierve dentro de los conjuntos combustibles y no hay generadores de vapor exteriores. El ahorro consiguiente en costes de capital es uno de los factores principales en la dura competición entre vendedores de PWRs y BWRs.

Ya que un BWR se conecta directamente a la turbina de una unidad de generación, se deben tomar precauciones especiales para disponer del vapor si el turbogenerador no puede, por alguna razón, admitirlo o si ocurre cualquier fallo. Un BWR está, además, encerrado en una vasija de presión, tuberías anejas y demás dentro de una “contención primaria”, que consiste en una enorme cavidad de hormigón en forma de frasco llamado, impropiaemente, “pozo seco”. Unas tuberías subterráneas conducen desde el fondo del pozo seco, bajando, a un túnel con forma de anillo, suficientemente grande como para andar dentro de él, lleno a medias de agua. Este túnel se llama “piscina de supresión de presión”. Si el vapor o el agua escapa, por cualquier razón, de la vasija del reactor o de alguna tubería, se confinan en el pozo seco y se conducen a través de las tuberías hacia el agua de las piscinas de supresión de presión. El vapor que llegue hasta aquí se condensa, como consecuencia, y cualquier exceso de presión que pudiera ejercer en la contención es, como sugiere el nombre, “suprimido”.

La función de la contención en un BWR está íntimamente asociada con la de los sistemas de refrigeración de emergencia, previstos, como los de un PWR, para prevenir el sobrecalentamiento del núcleo del reactor en caso de accidente. Otra vez, dejamos las explicaciones, adicionales sobre estas cuestiones para el Capítulo 7.

Como un PWR, un BWR se recarga fuera de funcionamiento, con el reactor parado y refrigerado. La recarga de un BWR es algo más que una rutina: además de inundar el pozo del reactor y de abrir y desplazar la tapa, es también necesario quitar y poner aparte una serie mezclada de elementos de los circuitos de vapor.

Como en un PWR, el refrigerante en un BWR puede resultar ligeramente radiactivo. Puesto que el refrigerante primario suministra, en un BWR, directamente vapor a la turbina, algo de la radiactividad del primario puede alcanzar la turbina. Sin embargo, en la práctica, la mayor parte de la radiactividad del refrigerante de un BWR permanece en el agua líquida y no se desplaza con el vapor a la turbina.

El BWR comparte con el PWR la desventaja de la relativamente baja temperatura de refrigeración y la consecuente ineficiencia de la conversión del calor en electricidad. La temperatura de salida de un BWR típico es inferior a los 300°C. Por otra parte, el BWR también comparte con el PWR los problemas asociados con la relativa alta densidad de potencia, como veremos en el capítulo 7. El BWR es también susceptible de “quemado total” o “manteo del vapor”, lo que sucede si se forma una capa de vapor próxima a la vaina de combustible caliente. La baja conductividad del calor del vapor implica que el calor ya no se extrae tan eficazmente del combustible y la temperatura del mismo puede elevarse repentina y peligrosamente.

El diseño y el manejo de todos los tipos de reactor deben tener en cuenta la posibilidad de fenómenos repentinos, llamados “transitorios”: transitorios de temperatura, de presión, etc. Esto es particularmente cierto en reactores de alta densidad de potencia, como los reactores de agua ligera.

Reactores de agua pesada

Reactores CANDU

El papel canadiense en la investigación de la fisión durante la Segunda Guerra Mundial estuvo especialmente relacionado con el agua pesada. Pero después de la guerra, Canadá se pronunció en contra de embarcarse en un programa de armas nucleares. Como consecuencia, sin disponer de instalaciones de uranio enriquecido pero con un suministro inagotable de uranio propio, Canadá decidió concentrar su atención en los reactores de uranio natural y agua pesada. Durante algunos años, los esfuerzos se dirigieron, principalmente, a la investigación fundamental; durante este período, en 1952, un reactor de investigación canadiense de agua pesada, el NRX en Chalk River, sufrió el primer accidente importante del mundo. A mediados de los años 50 el interés empezó a concentrarse en el desarrollo de un reactor de potencia, realmente de una familia de reactores de potencia, adoptando el nombre genérico de CANDU (de CANadian Deuterium Uranium). El nombre sirve también como una marca registrada, imitando la expresión norteamericana de capacidad: “puede hacer” (“can do”).

En 1971 llegó la era del modelo CANDU con el arranque del primero y el segundo de los cuatro reactores de 508 MWe en Pickering, cerca de Toronto. La central de Pickering, con los cuatro reactores en funcionamiento, ha sido llamada la mayor central nuclear del mundo; se encuentra en construcción otra, todavía mayor, con reactores de mayor potencia, en Bruce, en el lago Hurón.

El diseño empleado en Pickering y Bruce, se llama CANDU-PHW, ya que utiliza agua a presión como refrigerante. El núcleo del CANDU-PHW es un tanque horizontal cilíndrico de acero inoxidable, con extremos circulares. A través de este tanque, llamado “calandria” están dispuestos unos tubos horizontales de circaloy. Dentro de cada uno de estos tubos de la calandria hay otro tubo de circaloy de un diámetro ligeramente inferior, este tubo interior es un tubo de presión dentro del cual hay doce cortos haces de barras de combustibles. Las barras de combustible, consistentes en pellets de óxido de uranio natural en tubos de circaloy, forman un haz cilíndrico conteniendo 22 kilogramos de óxido de uranio. El espacio del tubo de presión que no está ocupado por los haces de combustible lo ocupa el agua pesada, que fluye por el tubo. Emergiendo desde los tubos de presión individuales en cada extremo de la calandria, el agua pesada caliente suministra a unas tuberías “colectoras” de gran diámetro, que la llevan hasta los generadores de vapor.

En un reactor moderado con grafito, el núcleo puede construirse de grafito sólido con agujeros taladrados a su través, destinados al combustible y al refrigerante. No es fácil practicar agujeros permanentes a través del agua pesada; pero se puede conseguir una geometría comparable conteniendo el moderador de agua pesada en un tanque la calandria conformada como si tuviera agujeros horizontales taladrados a través de ella para alojar el combustible y el refrigerante.

El circuito moderador se mantiene frío y a la presión atmosférica, y el espacio que no ocupa el agua pesada líquida se llena de gas helio envolvente. Debajo del núcleo del reactor hay un tanque vacío que puede acoger todas las disponibilidades de agua pesada del sistema moderador.

Las barras de control se introducen en el reactor desde arriba. Solamente una de las once barras de parada pasa entre dos tubos cualquiera de la calandria; una deformación mecánica de un tubo, en caso de accidente, machacaría por lo menos dos de las once barras.

El sistema de recarga de un reactor CANDU es complejo e ingenioso. Un CANDU se diseña para ser recargado de forma continua en funcionamiento. El procedimiento recuerda los primeros reactores productores de plutonio, pese a que la técnica CANDU es mucho más elaborada y completamente automatizada. En ambas caras del reactor hay una máquina de recarga en un sótano blindado. Parte de la máquina empuja los haces nuevos de combustible en un extremo del tubo, mientras la otra recoge los usados según salen por el otro extremo. La máquina entera, después,

deposita el combustible usado en un transportador para almacenaje temporal en un gran foso lleno de agua refrigerante, debajo de la central.

El foso refrigerante de la central de Pickering tiene una capacidad de almacenamiento para una producción de diez años de combustible usado procedente de los cuatro reactores de la central, operando a plena potencia. En la actualidad, el combustible usado es simplemente almacenado en lugar de ser reprocesado; Canadá no posee instalaciones comerciales de reprocesado. Pero cada haz de combustible contiene plutonio aprovechable: el modelo de uranio natural y agua pesada está especialmente adaptado para la producción de plutonio. En su momento será necesario decidir sobre qué hacer con los haces usados acumulados de combustible.

Las variaciones sobre el concepto básico CANDU incluyen el reactor de Whiteshell, WR1, con un refrigerante fluido orgánico que puede remitir bien, por sí solo, a un ciclo de combustible torio; y el Gentilly1, CANDU-BLW (de agua ligera en ebullición), en el que el refrigerante de agua ligera se hace hervir en canales verticales de combustible, pasando el vapor, en un ciclo directo, al turbogenerador.

Reactores generadores de vapor, de agua pesada (SGHWRs)

El reactor generador de vapor, de agua pesada, británico (SGHWR) reúne características del CANDU-BLW y del BWR. Solamente existe un prototipo, de 100 MWe, de SGHWR, en Winfrith, Dorset (Gran Bretaña); empezó a funcionar en 1967. El SGHWR viene a ser como un bosque de BWRs muy finos, embutidos en agua pesada. La base del SGHWR es una calandria llena de agua pesada como moderador y atravesada por canales verticales; en cada canal se centra un tubo de presión de circonio que contiene un elemento combustible. Al refrigerante de agua ligera que fluye a través de estos tubos de presión, se le hace hervir, como en el núcleo de un BWR, generando vapor, que es conducido directamente al turbogenerador.

Los elementos combustibles del SGHWR contienen óxido de uranio, enriquecido hasta el 2 por 100 de uranio-235. El empleo de uranio enriquecido es la diferencia más importante entre el SGHWR y el CANDU-BLW, y hace al SGHWR mucho más compacto. La densidad de potencia en su núcleo es algo superior a 30 kW por litro.

El nivel de potencia del SGHWR de Winfrith se varía actuando sobre el nivel del moderador de la calandria; si al agua pesada se la hace fluir fuera del tanque, la potencia del reactor decae, ya que la ausencia de moderador alrededor de la parte superior de los tubos de presión suprime la reacción de fisión. La parada instantánea o “scram” se consigue lanzando finos chorros de solución de boro en unos canales especiales de núcleo.

El SGHWR es un diseño modular, que puede aumentarse simplemente por la adición de canales de combustible; es, por consiguiente, excepcionalmente adaptable a una amplia gama de tamaños. El moderador, altamente eficiente, de agua pesada, el uranio enriquecido y el diseño de tubos de presión hacen también posible construir un SGHWR más pequeño que en la mayor parte de los otros modelos de reactores de potencia.

Reactores rápidos regeneradores (FBRs)

Todos los reactores hasta ahora descritos, comparten una característica común. Su fundamento físico es la fisión inducida por neutrones lentos, “térmicos”. Estos reactores pueden ser llamados, como un grupo único, reactores “térmicos”. Incluso en un reactor térmico, algunos de los neutrones

aprovechables son absorbidos por el uranio-238, convirtiéndose en plutonio-239, que puede fisionarse y contribuir significativamente a la producción total de energía. Pero la cantidad de plutonio creado es inferior a la del uranio empleado, por ello, estos reactores pueden también llamarse reactores “quemadores”.

Ya indicamos que, en este contexto, el uranio-238 es un material “fértil”. En un reactor que contiene ambos materiales, fisible y fértil, la comparación entre los núcleos consumidos y los núcleos fértiles convertidos en fisibles se llama “relación de conversión”. Por ejemplo, si por cada 10 unidades de uranio-235 que sufren la fisión, 8 núcleos de uranio-238 se convierten en plutonio-239, la relación de conversión es de 0,8.

Por definición, en un reactor quemador la relación de conversión es menor que 1. Una relación de conversión notable, incluso menor de 1, es fácilmente manejable. En un reactor CANDU, por ejemplo, antes de que se descargue un haz de combustible, un impresionante número de núcleos de uranio-238 se han convertido ya en plutonio-239 y, como consecuencia, experimentan fisión, contribuyendo sustancialmente a la producción total de calor del haz. Los diseñadores del CANDU consideran esta circunstancia irreversible como una forma especialmente elegante de utilizar el plutonio.

Es posible también diseñar un reactor con una relación de conversión mayor de 1: se trata de un reactor “regenerador” que produce más material fisible del que consume. Al final de su estancia en el núcleo, el combustible de un reactor de este tipo emerge conteniendo más núcleos fisibles de los que contenía cuando estaba sin usar. Por supuesto, también contiene el complemento usual de los productos de fisión ferozmente radiactivos; la recuperación del plutonio que aparece no es fácil. Pese a todo, el fundamento del reactor regenerador juega un papel fundamental en los planes actuales de la industria nuclear.

Los criterios de diseño de un regenerador son muy diferentes de los que gobiernan los tipos de reactores hasta aquí comentados. Como ya dijimos antes, un neutrón térmico puede romper más fácilmente un núcleo de uranio-235 o plutonio-239 que un neutrón rápido que surge de un proceso de fisión; por lo tanto, se usan moderadores en todos los núcleos de reactores quemadores para frenar los neutrones. Esto puede sugerir que los neutrones rápidos son casi inefectivos en una reacción en cadena. Pero una fisión causada por un neutrón rápido produce, por término medio, más neutrones rápidos nuevos que en una fisión producida por un neutrón térmico.

La regeneración de nuevos núcleos fisibles en una reacción en cadena requiere, en condiciones ideales e inalcanzables, exactamente dos nuevos neutrones de cada fisión: uno para mantener la reacción en cadena produciendo una fisión adicional, y otro para transmutar un núcleo fértil en otro fisible (bajo tales circunstancias la relación de conversión es exactamente 1: valor de sustitución). De hecho, los neutrones se pierden para el sistema por fugas y por “absorción parásita” en el refrigerante, en la estructura del reactor, etcétera. Como consecuencia, para alcanzar una relación de regeneración cuantificable, el sistema de reacción debe depender de las fisiones que producen bastante más de dos neutrones por cada neutrón perdido. La combinación posible más lógica es la fisión del plutonio-239 por neutrones rápidos. La fisión del uranio-235 con neutrones rápidos es menos eficiente, pero puede funcionar. Lo mismo sucederá con una mezcla de uranio-235 y plutonio-239. Un reactor que regenera más material fisible del que consume, empleando una reacción que dependa de neutrones rápidos, se llama reactor rápido regenerador, o FBR. (Un sistema aún mejor es el que resulta de utilizar torio-232 como material fértil para producir su pariente fisible uranio-233; las investigaciones avanzan en este sistema. Sus virtudes ya han sido subrayadas en la sección de reactores de alta temperatura, aunque no se hizo notar sus posibilidades

para una auténtica regeneración. No obstante, los sistemas rápidos regeneradores de uranio-plutonio han recibido, con mucho, la mayor parte de la atención y del desarrollo.)

De hecho, el primer reactor que alimentó un equipo generador de electricidad fue un reactor rápido regenerador. En 20 de diciembre de 1951, en la *National Reactor Testing Station* (Estación Nacional de Pruebas de Reactor, NFITS), en Idaho, el Reactor Rápido Experimental-1 (EBR1) produjo suficiente electricidad para alumbrar cuatro bombillas de 25 W. (Cuatro años más tarde, el EBR-1 sufrió un accidente que fundió el material en su núcleo.). Los primeros reactores verdaderos, basados en el principio de la regeneración rápida, fueron el británico Reactor Rápido de Dounreay, DFR, en Caithness, en la costa norte escocesa, el Experimental Breeder Reactor-2 (EBR-2), en la NRTS, Idaho, y el reactor Detroit Edison Enrico Fermi-1, cerca de Detroit, Michigan. El Dounreay Fast Reactor ha estado funcionando desde 1959 y el EBR-2, desde 1963. Sin embargo, el reactor Detroit Edison, que se pretendió que fuera el prototipo de un pretencioso reactor comercial rápido regenerador, experimentó problemas sin límite, incluyendo un accidente que pudo haber exigido la evacuación de Detroit. Hasta ahora ha estado permanentemente parado, y está siendo desmantelado, o “decomisado”.

Ha surgido ahora una nueva generación de prototipos de reactores de potencia regeneradores, incluyendo el reactor soviético BN350, en Shevchenko, en el Mar Caspio; el reactor francés Phenix, de 250 MWe, en Marcoule; y el reactor británico Prototype Fast Reactor (Reactor Rápido Prototipo, PFR), de 250 MWE, en Dounreay; todos ellos han ido alcanzando su criticidad desde noviembre de 1972. El Fast Flux Test Facility (Reactor Rápido de Prueba de Flujo), en Hanford, todavía está en construcción, después de largos retrasos; pero los Estados Unidos están ahora embarcados en un programa que va a iniciarse con un reactor de demostración, de potencia, rápido regenerador, de 380 MWe, en Clinch River, Tennessee.

La dificultad fundamental a la que se enfrenta el diseñador de un reactor rápido regenerador es que necesita 400 veces más neutrones rápidos que neutrones térmicos para originar la fisión. Como consecuencia, debe crearse una densidad neutrónica mucho más alta. Además, los neutrones que emergen nuevamente han de evitar colisiones que les harían frenarse antes de golpear otros núcleos fisibles. El núcleo de un reactor rápido regenerador debe, como consecuencia, ser más compacto que el de cualquier otro reactor hasta aquí descrito. No solamente no contiene moderador: también contiene un cierto número de otros materiales estructurales y el refrigerante suficiente para extraer la tremendamente intensa producción de calor. El desafío tecnológico es uno de los más exigentes que nunca existieron.

El esquema de conjunto de un reactor rápido regenerador es un núcleo compacto de material fisible concentrado, rodeado por una “manta” de material fértil para recoger los neutrones que se desparraman del núcleo. El modelo más empleado, del cual todos los llamados FBRs son ejemplos, utiliza como refrigerante metal fundido, normalmente sodio (el Dounreay Fast Reactor emplea una aleación de sodio y potasio llamada corrientemente “NaK”, expresión formada a partir de los símbolos químicos de estos metales que es líquida a la temperatura ambiente). Un reactor de este tipo “rápido regenerador de metal líquido” (LMFBR) no es, desde luego, el único diseño posible; es posible también un FBR refrigerado por gas, y este está en desarrollo. Pero el refrigerante de metal líquido tiene ventajas obvias. El sodio líquido, como metal que es, posee una alta conductividad térmica; incluso sin moverse dentro de un núcleo de FBR puede evacuar un considerable calor. Además, ya que hierve a la alta temperatura de 900°C, no necesita estar presurizado, lo que reduce considerablemente un importante problema de ingeniería.

Por otra parte, el sodio posee algunos inconvenientes. Como cualquier aprendiz de químico sabe, el

sodio reacciona entusiásticamente con el agua; de la misma manera reacciona con una amplia gama de materiales. Como consecuencia, aunque el refrigerante de sodio, en sí, no está refrigerado, sus superficies libres en un circuito LMFBR están cubiertas por un gas inerte como el argón, que, a su vez, tiende a limpiar el sodio fluyente, causando burbujas indeseables. Al revés que los gases o el agua (ligera o pesada), el sodio es opaco, haciendo especialmente difícil la inspección a distancia de los órganos internos del reactor. Al refrigerante de sodio no se le debe permitir, desde luego, que refrigere por debajo de su punto de fusión, de 97,50C, en ningún circuito, porque se solidificaría.

El sodio no absorbe fácilmente los neutrones rápidos si lo hiciera no podría utilizarse en un núcleo de neutrones rápidos pero cuando lo hace se convierte en sodio-24, que es un emisor gamma intensamente radiactivo. Como resultado, el refrigerante de sodio en el primario debe de confinarse totalmente dentro del blindaje biológico del núcleo. Esto hace que se necesite un segundo circuito de sodio con un intercambiador de calor dentro del blindaje biológico y él mismo blindado frente a los neutrones para extraer el calor procedente del sodio radiactivo del primario y trasladarlo, a través del blindaje, a un segundo intercambiador de calor en el que se genera el vapor. Los generadores de vapor, en los que el sodio fundido y el agua están separados solamente por las delgadas paredes de los tubos, deben de fabricarse con características muy estrictas; los generadores de vapor han demostrado ser algunos de los componentes más problemáticos de los LMFBRs.

El Reactor Rápido de Dounreay es, en todo el mundo, el FBR que funciona desde hace más tiempo. Su núcleo hexagonal tiene solamente 53 centímetros de largo y 52 centímetros en cada cara; una persona podría abrazarlo fácilmente, aunque se le advertiría que no lo hiciese. Su máxima producción de energía es 60 MWt, dando 14 MWe. Estos 60 MWt se generan, obsérvese, en un núcleo cuyo volumen es solamente de 110 litros, con una densidad de potencia de unos 500 kilogramos por litro, bastante más de cien veces el de un núcleo Magnox. Todo el reactor está encerrado dentro de una esfera de contención de 41 metros de diámetro, en la que la unidad inferior está revestida con una cubierta de hormigón de 1,5 metros de espesor. La contención y el emplazamiento remoto le proporcionaron factores adicionales de seguridad durante el desarrollo primerizo de la tecnología FBR.

El Reactor Rápido de Dounreay, ya que suministraba una potencia constante, fue destinado principalmente a laboratorio para el desarrollo del combustible de FBR y otras tecnologías. Desde la primera etapa quedaba claro que el combustible de uranio metálico, como era el del Reactor Rápido de Dounreay, no permitiría temperaturas operacionales tan altas como para obtener la deseada eficiencia eléctrica. Como consecuencia, el FBR, de 250 MWe, utiliza combustible de óxido, con un punto de fusión más alto. Para el FBR, el combustible no es exactamente óxido de uranio, sino una mezcla de óxidos de uranio y de plutonio.

El uranio es solamente uranio “natural”; el uranio “empobrecido” es todavía mejor, mezclado con suficiente plutonio como para proporcionar el material fisible requerido. El uranio “empobrecido” es uranio del cual se ha extraído parte del uranio-235 para incorporarlo al uranio enriquecido.

La baja conductividad térmica de la mezcla de óxidos necesita que las varillas individuales del combustible, de acero inoxidable, se hagan muy estrechas, para mantener la temperatura interior lejos de valores comprometedores; una varilla de combustible de FBR tiene un diámetro de menos de 6 centímetros. Hay 4,1 toneladas de combustible de óxido mixto en el núcleo, incluyendo el equivalente a 1,1 toneladas de óxido de plutonio-239.

El conjunto cubierto del núcleo se encierra en un tanque abierto por la parte superior, lleno de sodio fundido, y se sitúa en un recipiente mucho mayor, con sodio fundido. El sodio emerge por la parte

superior del conjunto de combustible y cubierta y fluye a través de los intercambiadores intermedios de calor, transfiriendo su calor al sodio secundario, que no es radiactivo. Tres bombas del sodio primario impulsan el líquido primario. Los circuitos secundarios extraen el calor, a través del blindaje, hacia los generadores de vapor.

Ni tubos ni otras conducciones atraviesan la cubierta primaria por debajo del nivel del sodio, reduciéndose la posibilidad de cualquier pérdida de refrigerante primario. Por encima del núcleo, en el techo del reactor, hay una “pantalla rotatoria”, desde cuyo fondo se proyecta el conjunto de la recarga.

El FBR, como los otros LMFBRs de su generación, es, al menos en parte, una instalación experimental, orientada al establecimiento de los criterios para un reactor rápido comercial. Uno de estos criterios es el nivel de regeneración alcanzable. Una medida corriente de esta importante característica de funcionamiento es el llamado “período de duplicación”: el tiempo que necesita un reactor generador para duplicar la cantidad de material fisible que se produce cuando funciona. Este inventario de material fisible incluye el de dentro del núcleo del reactor, en un momento dado, el de los elementos combustibles irradiados en la piscina de refrigeración, el que está en camino hacia la instalación de reprocesado, el de la fábrica de elementos combustibles, el que vuelve al reactor y el que espera su reinserción en el núcleo. Esta suma total de material fisible es el “inventario de tuberías” asociado al FBR. Como norma, además del material fisible de dentro del reactor, habrá tres o cuatro veces esta cantidad fuera de él, en otras etapas del ciclo de combustible: quizá, para un reactor del tamaño del FBR, cuatro o cinco toneladas de plutonio.

La ganancia de regeneración es la proporción adicional de plutonio creado durante el tiempo que invierte una carga de combustible en el FBR. Cuanto más pequeña es esta ganancia de regeneración, mayor es el número de ciclos necesarios para doblar la cantidad total de plutonio. Como consecuencia, hay dos caminos utilizables, a través de los cuales puede abreviarse el período de duplicación incrementando la ganancia de regeneración o reduciendo la longitud de un ciclo dado de combustible. Incrementar la ganancia de regeneración dentro del reactor significa, esencialmente, operar con un mayor flujo de neutrones; esto significa que se reduce el espacio entre las varillas de combustible mientras que se necesita, al mismo tiempo, un nivel de extracción de calor mucho mayor, criterios claramente contradictorios. Las únicas fases del ciclo del combustible que pueden abreviarse son aquellas que transcurren fuera del reactor. La fase obviamente abreviable es la estancia en la piscina de refrigeración. Desgraciadamente, abreviar esta estancia a un tiempo tan breve como puedan ser treinta días, según se ha llegado a sugerir significa transportar combustible irradiado que todavía es muy radiactivo, con todo lo que esto entraña.

Los períodos de duplicación en la generación actual de núcleos de FBR no parecen resultar muy inferiores a veinte años; según algunos, esta cifra resultaría muy superior. A los diseñadores de los FBR les gusta cifrar los períodos de duplicación en menos de diez años; pero la ingeniería exigida y las implicaciones en orden a seguridad, por trabajar con tan estrechas tolerancias, pueden hacerlo temerario. Mientras tanto, uno de los límites más evidentes de cualquier programa de construcciones de expansión acelerada, para los FBR, es la disponibilidad de plutonio. Se ha sugerido que, para obtener plutonio para reactores, los gobiernos podrían verse obligados a tragarse sus propios arsenales de armas nucleares. Algunos basarían en esto su voto más entusiasta a favor de los regeneradores rápidos.

3. El ciclo del combustible nuclear

Sin duda, las cosas más extraordinarias que le suceden al combustible suceden dentro del núcleo del reactor en funcionamiento. Pero otras cosas suceden fuera, tanto antes como después de su estancia en el núcleo. La odisea del material combustible, desde su origen en la corteza terrestre, lo lleva desde una mina a una fábrica de concentrados de uranio, posiblemente después a una instalación especializada, llamada planta de enriquecimiento, y después a una planta de fabricación de combustible, antes de entrar en el reactor; después va a otra instalación especializada, llamada planta de reprocesado de combustible. A continuación, parte del material llega al lugar de almacenamiento teóricamente final, mientras que el resto puede reintroducirse en el proceso en una etapa anterior. La sucesión completa de procesos, con el transporte que los une, se llama ciclo del combustible nuclear. En la práctica, esto no es todavía muy frecuente; pero existe la posibilidad de que lo sea mucho más, con la condición de que ciertos problemas técnicos y otros puedan resolverse. Las políticas actuales dentro de la industria nuclear están orientadas, generalmente, a ese fin. Pero frecuente o no, el ciclo del combustible nuclear fuera del reactor da pie a muchos de los aspectos más controvertidos de la tecnología nuclear. En las páginas siguientes discutimos el ciclo del combustible y algunos de los problemas que surgen en él.

Producción de uranio

El uranio se encuentra en la naturaleza como mineralización en areniscas, en rocas de conglomerados de cristales de cuarzo y en vetas, y, en más pequeña proporción, en otros tipos de depósitos. Hay reservas significativas de uranio en los Estados Unidos, Canadá, África del Sur, Australia, Francia y en otras partes. Los minerales de uranio de alta calidad contienen hasta un 4 por 100 de uranio; pero las reservas conocidas de esta calidad han sido ya explotadas notablemente y ahora se trabajan grados de concentración diez veces menores, del 0,4 por 100 ó menos. Incluso se han señalado, para su explotación, concentraciones más bajas, de hasta un 0,01 por 100 y menores.

Los depósitos de mineral de uranio se localizan por diversas técnicas de explotación. La imagen del prospector de uranio con su contador “Geiger”, picoteando su camino por las laderas, prestando atención a los “clics”, tiene poco que ver con la prospección contemporánea del uranio. La explotación del uranio comienza, usualmente, en el aire, buscando trazas anormales de radiactividad atmosférica ocasionada por los productos de desintegración –llamados “descendientes” del uranio. Los instrumentos aéreos buscan rayos gamma reveladores y otras evidencias de radiactividad. En tierra se recoge más evidencia, estudiando formaciones geológicas apropiadas, comprobando químicamente muestras y, finalmente, sondeando.

El mineral de uranio se extrae en minería a cielo abierto o subterránea. El mineral basto es llevado a una fábrica de concentrados, donde una serie de molinos trituradores lo pulverizan hasta convertirlo en arena fina. Soluciones químicas disuelven el uranio, que resulta del proceso en forma de una mezcla de óxidos; con una fórmula química equivalente a U_3O_8 . Esta mezcla de óxido, llamada corrientemente “torta amarilla”, constituye la materia para todos los procesos posteriores que conducen, con el tiempo, al núcleo del reactor y la reacción en cadena. La torta amarilla contiene un 85 por 100 de uranio en peso. Junto a la torta amarilla, queda después de la extracción unas cien veces su peso en los estériles de la minería del uranio llamados “colas” que también contienen el radio que ha acompañado al uranio. También quedan unos 3.700 litros de residuos líquidos por toneladas de mineral, que es químicamente tóxico y radiactivo. Una mina de uranio y la fábrica de concentrados asociada pueden producir unas 1.000 toneladas de uranio al año, a partir de, al menos, 250.000 toneladas de mineral.

Los peligros surgen en varias etapas del proceso de producción del uranio. El primero del mismo mineral de uranio, in situ y posteriormente. Cuando el uranio-238 sufre una desintegración alfa produce una sucesión de otros emisores alfa, incluyendo el radio-226 y su inmediato descendiente, el gas químicamente inerte, pero radiactivo, radón-222. Cualquier aglomeración de uranio que ha permanecido durante algún tiempo intocada como en los depósitos geológicos exuda este gas radiactivo. Cuando un depósito de mineral de uranio se rompe por las labores de minería se facilita el escape del radón. El radón-222 es un emisor alfa con una vida media de menos de cuatro días, que produce sus propios “descendientes” radiactivos. Sin embargo, estos descendientes del radón son sólidos. Cuando un núcleo de radón-222 emite en el aire una partícula alfa el núcleo resultante de polonio-218, estando momentáneamente cargado eléctricamente, se adhiere a cualquier partícula de polvo. Como consecuencia, el aire que contiene radón, también contiene partículas de polvo cargado de descendientes del radón intensamente radiactivos. Se ha demostrado que en la minería subterránea del uranio, los mineros, que han de inhalar un aire así, son atterradoramente susceptibles al cáncer de pulmón.

La primera evidencia de este efecto se estableció hacia 1930, después de unas investigaciones médicas de mineros que trabajaban en yacimientos en Joachimsthal, Alemania. Efecto similar ha aparecido en los mineros trabajando en depósitos en el suroeste de los Estados Unidos, después de la Segunda Guerra Mundial. La ventilación inadecuada y la insuficiente inversión en seguridad en las minas han sido culpadas de las muertes por cáncer en más de un centenar de mineros americanos del uranio. El Public Health Service (Servicio de Sanidad Pública) ha estimado que morirán de cáncer de pulmón de 600 a 1.100 hombres, de un total de 6.000 que han trabajado en las minas subterráneas norteamericanas de uranio, debido a la exposición a la radiactividad en el trabajo⁸.

Los estériles de la minería del uranio también presentan un problema. La gran demanda militar de uranio en los Estados Unidos produjo la acumulación de enormes depósitos de estériles; las estimaciones alcanzan hasta los 90 millones de toneladas, muchas de las cuales fueron apiladas en las orillas de los ríos en el suroeste de los Estados Unidos. La contaminación radiactiva consiguiente de las vías de agua ha representado un serio problema. En cierta época, los habitantes de aguas abajo de la cuenca del río Colorado estuvieron expuestos, a través del agua de bebida, a una ingestión de radio que es un radionúclido afín a los huesos incluso más peligroso que el estroncio-90 tres veces superior a las normas ICRP sobre el máximo permisible.

Mientras tanto, se descubrió hacia los años 60 que los estériles arenosos se habían utilizado como

8

En la actualidad, uno de los aspectos más “nuevos” y controvertidos de la energía nuclear es, precisamente, la exposición de los mineros y de las poblaciones próximas a la radiactividad procedente de los yacimientos de uranio. A esto hay que añadir la resistencia a este tipo de explotaciones de algunas significativas poblaciones indígenas, propietarias ancestrales de estos terrenos, como es el caso de los aborígenes de Australia. En España ya se ha iniciado la denuncia de la increíble situación de la minería del uranio en lo que respecta a seguridad y salubridad.

relleno bajo los cimientos de muchos edificios en numerosas comunidades, principalmente en Grand Junction, Colorado: edificios, incluyendo viviendas, escuelas y hospitales. El gas radón emanado desde estas estructuras de los edificios hacia la atmósfera interior expone actualmente a los habitantes locales incluyendo los niños exactamente a los mismos productos descendientes del radón que han sido responsables de miles de muertes por cáncer de pulmón en mineros, desde Joachimsthal a Gran Junction. Solamente a finales de 1972, el Gobierno de los Estados Unidos acordó, finalmente, contribuir con fondos para intentar controlar los depósitos de los estériles secas todavía impulsadas por el viento a través de muchas áreas habitadas del sureste de los Estados Unidos. Todavía está planteada la cuestión de la ayuda gubernamental para reconstruir los edificios actualmente radiactivos de Grand Junction y otros lugares. Los depósitos de estériles permanecerán peligrosamente radiactivos durante decenas de miles de años.

Enriquecimiento del uranio

Como indicamos en el Capítulo 1 los núcleos fisibles del uranio-235 en el uranio natural 7 de cada 1.000 núcleos están demasiado diluidos para mantener una reacción de fisión. Su efectividad puede incrementarse entremezclando el combustible de uranio con un moderador para mejorar la economía neutrónica, como ya describimos. Alternativamente, o además de lo anterior, es posible aumentar la proporción de núcleos de uranio-235 en el material. Este proceso se llama “enriquecimiento del uranio”. Realmente, para aplicaciones militares, es posible, y a menudo necesario, obtener uranio consistente casi exclusivamente en el isótopo 235; esas aplicaciones militares utilizan uranio que tiene, por lo menos, un 90 por 100 de uranio-235.

No es fácil, sin embargo, realizar este incremento en la concentración del isótopo 235. No puede hacerse químicamente; el uranio-235 y el uranio-238 son, químicamente, virtualmente idénticos. Solamente su diminuta diferencia en masa tres unidades en el isótopo 235 puede usarse como base para la separación. Hay varios fenómenos físicos en los que esta diminuta diferencia de masa produce una diferencia mensurable en el comportamiento entre los dos isótopos. De éstos, el fenómeno que despertó interés a gran escala fue la velocidad de difusión a través de una delgada membrana porosa. El uranio-235, más ligero, se difunde, precisamente de forma ligeramente más rápida a través de esa membrana. Este efecto es la base por la que se justifican las mayores instalaciones industriales del mundo, las “plantas de difusión gaseosa”. Hay tres plantas de este tipo en los Estados Unidos de América, incluyendo la gran planta de Oak Ridge, que produjo el uranio enriquecido para la bomba de Hiroshima; una en Gran Bretaña, en Capenhurst, Cheshire; otra en Francia, en Pierrelatte (y otra en construcción); dos en la Unión Soviética; y, por lo menos, una en China.

Los detalles de la tecnología de la difusión gaseosa están debido a sus implicaciones militares todavía sometidos a un considerable secreto. La base de una planta de difusión gaseosa es muy simple; una celda de paredes metálicas con una delgada membrana de metal poroso dividiéndola en dos. (La fabricación de tales membranas, que deben soportar presiones laterales y la corrosión química mientras hacen de barrera selectiva de difusión, es un tema del que muchos detalles no pueden todavía conocerse públicamente.) Con el fin de utilizar las diferentes velocidades de difusión de los dos isótopos de uranio, es necesario convertir la torta amarilla original, los óxidos sólidos de uranio, en hexafluoruro de uranio, UF₆. Este compuesto, llamado “hex” por brevedad, es el compuesto más simple de uranio que puede vaporizarse fácilmente. Además, el fluoruro tiene solamente un isótopo estable; de este modo, las diferentes velocidades de difusión de las moléculas hex dependerán solamente de la diferencia entre los isótopos de uranio presentes. Hay que añadir que el hex es un gas sumamente corrosivo y reactivo, requiriendo manejo muy cuidadoso y metalurgia de alta calidad en las vasijas en las que viaja.

Bajo presión controlada, el hex se introduce en una cámara de una celda de difusión. Se difunde a través de la membrana en la otra cámara, difundiéndose los isótopos 235, más ligeros, ligeramente más deprisa que los isótopos 238, más pesados. En una celda determinada, la concentración del isótopo 235 puede aumentarse, sin embargo, solamente en una parte por mil. Como consecuencia, el proceso de difusión debe repetirse miles de veces. Se construye una instalación en cascada. El gas de una cámara de alta presión de una celda, ligeramente vacía del isótopo 235, es reconducido a las celdas anteriores, el gas de la cámara de baja presión, ligeramente enriquecido con el isótopo 235 es conducido hacia las celdas siguientes. De esta forma, usando miles de bombas y de condensadores, es posible aumentar la producción del isótopo 235 a más del 99 por 100. Ya que el bombeo calienta el hex gaseoso, la planta debe incluir sistemas refrigerantes a gran escala.

El uranio cuya proporción de núcleos 235 ha sido reducido, se llama, como dijimos antes, “uranio agotado”. Un factor que afecta a las características de una planta de difusión gaseosa es el “ensayo de colas” que es el nivel en el cual el porcentaje de 235 es tan bajo que ya no vale la pena seguir intentando extraer más 235 del hex. Este ensayo de colas está a veces entre el 0,2 y 0,3 por 100 de 235, comparado con el 0,7 por 100 en el uranio natural. Si el hex agotado se descarga de la planta cuando todavía contiene el 0,3 por 100 de 235, se necesitará más torta amarilla para producir una cantidad dada de uranio enriquecido a un cierto nivel; por otra parte, si el hex agotado no se descarga hasta que su ensayo de colas desciende al 0,2 por 100 de 235, parte de la planta funciona con hex muy agotado, del que es todavía más difícil extraer una cantidad utilizable de 235.

En las etapas iniciales del enriquecimiento las celdas de difusión deben de ser relativamente grandes; los núcleos deseables del uranio-235 van acompañados de una engorrosa nube de núcleos de uranio-238, compañeros de viaje. Como la proporción de 235 aumenta, la masa total del hex que debe de pasar a través de las celdas sucesivas decrece; la parte final de alto enriquecimiento de la planta utiliza celdas relativamente pequeñas, en las que solamente quedan núcleos 235, con unos pocos 238 descarriados. Por esta razón, las primeras etapas del enriquecimiento, hasta el 3 ó 4 por 100 de uranio-235, requieren tanto bombeo como todas las otras etapas a partir de este nivel. El esfuerzo invertido en el proceso de enriquecimiento de uranio se mide en unidades de “trabajo de separación”; la capacidad en conjunto de la planta se mide en unidades de trabajo de separación al año. El trabajo de separación está estrechamente correlacionado con la energía total requerida para llevar a cabo una operación (energía para accionar las bombas, etc.). En general, una cantidad relativamente grande de hex enriquecido en un bajo porcentaje necesita la misma cantidad de trabajo de separación que una cantidad relativamente pequeña de hex enriquecido al 90 ó más por 100.

Todas las plantas de difusión gaseosa de la presente generación se construyeron bajo los auspicios militares. Las necesidades de energía eléctrica son imponentes; la planta de Oak Ridge, a pleno funcionamiento necesita unos 2.000 Megavatios de electricidad, suficientes para alimentar una ciudad de tamaño considerable (la electricidad para la planta de Oak Ridge está suministrada por centrales de combustible fósil que queman carbón extraído a cielo abierto, un detalle curiosamente irónico). Una planta de difusión gaseosa como ésta, utiliza un área impresionante de por lo menos medio kilómetro cuadrado. Sin embargo, debido a las diferencias entre las etapas finales de bajo enriquecimiento y alto enriquecimiento, tales plantas no son fáciles de adaptar de la producción de material bélico estrictamente militar, que entraña un enriquecimiento de más del 90 por 100 de uranio-235, a la producción de combustible para reactores de potencia. Los reactores de agua ligera, los SGHWR y los AGR necesitan para su combustible un nivel de enriquecimiento solamente del 2 al 4 por 100. Como consecuencia, pese a que la primera generación de plantas de difusión son, en teoría, utilizables para atender a los actuales reactores de potencia, son otros tipos de

enriquecimiento los que atraen ahora la atención.

Francia, en asociación con otros países, se ha lanzado a la construcción de una gran planta de difusión diseñada primeramente para la producción de combustible de reactores y, por lo tanto, totalmente diferente en sus características de la planta militar de Pierrelatte⁹. Algunas empresas norteamericanas han sido invitadas por el gobierno para utilizar la tecnología de enriquecimiento conocida hasta ahora en la construcción de plantas comerciales de enriquecimiento. Pero los altos costos iniciales y el largo periodo de construcción están haciendo al sector privado muy cauteloso en sus compromisos; esto, en su momento, puede crear dificultades. Una situación especialmente paradójica ha surgido en la provincia de Quebec, en Canadá. Aunque los reactores canadienses CANDU usan combustible de uranio natural, se han propuesto planes para construir una planta de difusión gaseosa en el norte salvaje de Quebec como una forma de utilización de la hidroelectricidad generada por el gran proyecto de James Bay.

Mientras tanto, está haciendo su primera contribución al ciclo del combustible nuclear, en este momento, una tecnología alternativa de enriquecimiento. Al igual que el proceso de difusión gaseosa, esta alternativa requiere miles de etapas en cascada; esta vez, las etapas consisten en centrifugadoras de gas. Cuando el gas hexafluoruro de uranio entra en una centrifugadora que gira, las moléculas de uranio-238 del hex tienden a desplazarse hacia el perímetro de las cámaras de centrifugación, dejando las moléculas más ligeras, de uranio-235, más próximas al eje de la cámara. Las tuberías canalizan el hex axial, ligeramente enriquecido, hacia las centrifugadoras sucesivas, y el hex periférico, ligeramente agotado, hacia atrás, exactamente igual que en las cascadas de una planta de difusión. Se considera que el método de centrifugación consume solamente un décimo de la energía requerida para la difusión, lo que es una ventaja importante para el método de centrifugación. Un esfuerzo conjunto internacional entre Gran Bretaña, Alemania y Holanda está construyendo actualmente plantas de enriquecimiento, de centrifugadoras de gas, en Capenhurst (Gran Bretaña), y en Almelo (en Holanda).

Se considera que otras técnicas resultan prometedoras. Una está basada en la desviación de gas pulverizado desde un orificio: las moléculas de 235 del hex, más ligeras, son desviadas más fácilmente. Pero, indudablemente, la técnica más exótica que se está desarrollando actualmente está basada en los "láseres". Un láser puede hacerse tan refinado que su radiación ionice las moléculas de uranio-238. Es necesario, entonces, utilizar de algún modo la posibilidad aportada por la carga eléctrica de los iones para separar las moléculas 235 del hex fuera de la nube. Los informes señalan que se están haciendo progresos. Si el enriquecimiento por láser se revela técnicamente posible sería, indudablemente, mantenido en secreto: a diferencia de las otras tecnologías mencionadas, una simple etapa de enriquecimiento por láser podría dar lugar, presumiblemente, a una casi completa separación del uranio-238 no fisible y del uranio-235 fisible, ofreciendo un atajo muy directo para el material bélico, incluso a partir del mineral de uranio.

Producción de agua posada

Los isótopos del uranio no son los únicos que necesitan separación para aplicaciones nucleares. En

9

Se trata de la sociedad Eurodif, cuya composición de capital en el momento actual es: Francia, 51,45 por 100; Italia, 16,25 por 100; Bélgica, España e Irán, 11,1 por 100 cada una.

el otro extremo de la tabla periódica de los elementos, están los isótopos del hidrógeno, de los cuales el segundo, el deuterio, es el mayor moderador de neutrones de todos. Los modelos americano y canadiense de reactores ofrecen en este sentido, un contraste nítido: mientras que los americanos enriquecen el combustible y utilizan el moderador tal como es, los canadienses usan el uranio tal como está y para entendernos - enriquecen el moderador.

La diferencia de masa entre un núcleo ordinario de hidrógeno y un núcleo de hidrógeno pesado o deuterio es, proporcionalmente, muy importante; un núcleo de deuterio es unas dos veces más másico que un núcleo ordinario de hidrógeno. Como resultado, se pueden emplear ciertos tipos de intercambio químico para separar los núcleos ligeros y pesados del hidrógeno. El proceso GirdlerSulphide (GS), actualmente de amplio uso, emplea las dos moléculas químicamente similares del agua y del sulfuro de hidrógeno. La primera consiste en dos átomos de hidrógeno ligados a un átomo de oxígeno, la otra en dos átomos de hidrógeno ligados de forma similar a un átomo de azufre. En una mezcla de moléculas de agua y de sulfuro de hidrógeno, la distribución de los isótopos de hidrógeno, entre los átomos de oxígeno y azufre depende de la temperatura. A baja temperatura a unos 250oC el agua líquida contiene proporcionalmente más deuterio que a temperaturas más altas, a unos 100oC. Este desplazamiento del equilibrio puede utilizarse para transferir átomos de deuterio de una hornada de agua a otra, empleando sulfuro de hidrógeno a modo de cinta transportadora.

Primero, el agua y el sulfuro de hidrógeno se mezclan juntos a la temperatura más baja; el deuterio se desplaza desde el sulfuro de hidrógeno hasta el agua. Parte del agua enriquecida es extraída para enriquecimiento adicional. El resto se conduce a una torre a más alta temperatura; el deuterio, ahora, se desplaza desde este agua al sulfuro de hidrógeno. Este sulfuro de hidrógeno enriquecido, a su vez, se relanza para enriquecer más agua. El agua agotada puede abandonarse y el agua enriquecida se conduce a través de una cascada, aumentando su porcentaje de deuterio.

Mientras que el enriquecimiento del uranio resulta más fácil a medida que se alcanzan niveles más altos, por lo que se refiere a transporte de masas, el enriquecimiento del agua se va haciendo gradualmente demasiado engorroso, según va resultando ineficiente el intercambio aguasulfuro de hidrógeno. En este momento es, no obstante, necesario llevar a cabo una destilación fraccionada, utilizando la temperatura de ebullición, significativamente más alta, del óxido de deuterio unos 101,4oC para evaporar gran parte del agua ordinaria restante. La electrólisis puede afinar esto hasta una composición del 99,75 por 100 de óxido de deuterio; en esta etapa la electrólisis es una forma relativamente barata y eficiente de disponer del hidrógeno ordinario restante.

Hay, quizás, una docena de plantas de producción de agua pesada en total: Estados Unidos, Canadá, Francia, India y algún sitio más. El reciente resurgimiento del interés por los reactores de agua pesada y la alta eficiencia de tales reactores en la producción de plutonio hace posible que las capacidades actuales de producción, en este momento del orden de 1.000 toneladas de óxido de deuterio por año y por planta, sean incrementadas notablemente para equilibrar la demanda. Por otra parte, se pretende que el agua pesada sea una parte permanente del sistema de un reactor; a diferencia del combustible enriquecido, esta no se “consume”. Una vez que un reactor se equipa con su dotación operacional de agua pesada lo único que ésta exige es reemplazar suficientemente las pérdidas de la recarga o de las fugas inevitables. Ya que el agua pesada cuesta actualmente por encima de las veinte libras por kilogramo, los operadores se esfuerzan en minimizar tales pérdidas.

Fabricación del combustible

La fabricación del combustible para reactores es actualmente un importante y complejo proceso

industrial por méritos propios. En el capítulo 2 enumeramos algunos de los determinantes que afectan al combustible del reactor y a su envoltura: facilidad de evacuación del calor, durabilidad cuando está sometido a los daños de radiación, estabilidad química y propiedades físicas y mecánicas que hagan posible una fabricación económica. Un requisito adicional, en cada etapa, es el establecimiento y el mantenimiento de un alto grado de pureza en los materiales, para mantenerlos libres de impurezas que puedan absorber neutrones.

Las instalaciones de fabricación de combustible, como consecuencia, se ven obligadas a desarrollar estos importantes procesos industriales en condiciones de limpieza similares a las de un quirófano.

Entre la gama actual de reactores de potencia los únicos de envergadura que usan combustible de uranio metálico son los reactores británicos Magnox y sus parientes franceses. Ya se ha mencionado la engorrosa metalurgia del uranio. El uranio no puede fabricarse, en absoluto, con técnicas metalúrgicas convencionales.

El combustible de uranio de los reactores refrigerados por agua PWRs, BWRs, CANDUs y SGHWRs tiene la forma de dióxido de uranio. El polvo de dióxido de uranio está hecho de solución de nitrato de uranio que puede originarse en una fábrica de concentrados de uranio (a partir del uranio natural), en una planta de enriquecimiento (a partir del hexafluoruro, enriquecido de uranio), o en una planta de reprocesado. La fabricación por técnicas de polvo se emplea para obtener las formas deseadas, por ejemplo los cortos pellets cilíndricos descritos en el capítulo 2. La cocción a alta temperatura produce pellets densos y estables (cuanto más densos, mejor); una alta densidad facilita la reacción en cadena, mejora la generalmente baja conductividad térmica y también contribuye a retener los productos de fisión que se acumulan en el material combustible.

Si ya la metalurgia del uranio es engorrosa, la metalurgia del plutonio es ciertamente infernal. El metal aparece en seis fases cristalinas diferentes, cuyas propiedades cambian drásticamente con la temperatura; en dos fases, incluso se contrae, en lugar de expandirse, cuando aumenta la temperatura. Su conductividad térmica es baja, su punto de fusión es bajo, se oxida violentamente en contacto con el aire y cuando se añade su radiotoxicidad, peculiarmente nociva teniendo todo ello en cuenta, resulta un material sin muchas virtudes atenuantes. Por supuesto que en la reacción en cadena del lanzamiento de una bomba de fisión la mayoría de estos problemas se resuelven en un instante. Pero en el caso de una reacción en cadena controlada la opción no recae en el metal, sino en el dióxido.

Su fabricación es un proceso mucho más exigente que la del uranio, exigiendo un control mucho más estricto de las cantidades y de los accesorios. Las precauciones han de evitar no solamente el escape del material tóxico sino también la yuxtaposición inadvertida de geometrías indeseables; a diferencia del uranio tipo reactor, el plutonio tipo reactor está constituido mayoritariamente por núcleos fisibles, y puede aparecer fácilmente en una cantidad tal que pueda alcanzar criticidad. La consiguiente barrera de neutrones y rayos gamma puede producir serios daños o la muerte a alguien que esté próximo. Esto es especialmente peligroso en el caso de soluciones acuosas de compuestos de plutonio, ya que el agua actúa de moderador. No obstante, con las precauciones apropiadas el dióxido de plutonio puede procesarse como el dióxido de uranio; realmente, los dos dióxidos, mezclados en proporción adecuada, constituyen un tipo de material combustible especialmente prometedor.

Las barras de combustible o los pellets de combustible, una vez fabricados, son encapsulados como se señala en el Capítulo 2 y se disponen convenientemente en conjuntos para el transporte al reactor.

Transporte

Una de las ventajas principales esgrimidas para la generación masiva de electricidad con una fuente nuclear de calor es la relativamente pequeña envergadura y masa de combustible y residuos que deben transportarse hacia y desde la central. Una central de combustible fósil necesita tanto carbón o petróleo que es económicamente aconsejable situar la central cerca de la fuente de combustible. Una central nuclear, por el contrario, necesita, como mucho, uno o dos embarques por semana; además, los embarques desde la central son bastante más pesados y voluminosos que hacia ellas. Los elementos nuevos de combustible, solo mínimamente radiactivos, pueden ser y son embarcados en envases ordinarios como cualquier otra carga. Pero una vez irradiados tienen que ser rigurosamente blindados, de tal manera que el embarque de dos toneladas de combustible radiactivo necesita una cuba de acero de cincuenta toneladas.

El combustible nuevo del reactor y los materiales combustibles se embarcan por ferrocarril, por carretera, por vía acuática o por el aire, en cantidades crecientes cada año, entre las diversas etapas del ciclo del combustible. Aparte de las protecciones usuales contra la radiactividad de bajo nivel en torno a los envases de la carga, la principal precaución técnica es impedir que los envases se apilen tan juntos que la aproximación de material fisible pueda dar lugar a criticidad. Se han publicado depurados manuales prácticos; para proporcionar las adecuadas instrucciones técnicas.

El embarque del combustible irradiado es, también, algo especial. El combustible irradiado debe manejarse por control remoto en cada etapa, desde la carga en la central normalmente, en una piscina de refrigeración hasta la descarga en la planta de reprocesado. Para desplazamientos; breves, los elementos de combustible irradiado viajan normalmente en voluminosos cubos llenos de agua que poseen aletas en el exterior para contribuir a disipar el calor de desintegración. Para desplazamientos más largos, especialmente los marítimos, las cubas deben ir sometidas a un circuito de refrigeración.

Un accidente que afecte a un transporte de combustible irradiado puede desprender cantidades peligrosas de radiactividad. Esto sucede, particularmente, si como ahora se debate el combustible es embarcado no después de 120 días, o incluso 90 días, de estar en una piscina de refrigeración, sino después de un período tan reducido como 30 días, cuando incluso los radioisótopos de vida corta, todavía contribuyen significativamente a la radiactividad. Estos períodos breves de refrigeración son económicamente deseables; el combustible de un reactor es caro y dejarlo fuera de circulación en una piscina de refrigeración no contribuye a mejorar las cuentas. Por otra parte, los requisitos de transporte del tan ferozmente radiactivo combustible usado serán cada vez más costosos. Como consecuencia, los envases de transporte deben sufrir pruebas rigurosas, siendo una de las típicas un incendio de treinta minutos después de una caída desde diez metros. Pero como el número de fletes se incrementa, lo mismo sucede con la probabilidad de un accidente.

Reprocesado del combustible

Una característica distingue la tecnología de la energía nuclear de las demás: los desperdicios. A diferencia de las cenizas, por ejemplo, de una central de energía alimentada con carbón, el combustible usado procedente de una central nuclear contiene, al mismo tiempo, material aprovechable y residuos extremadamente nocivos. Recordemos que los primeros grandes reactores fueron construidos expresamente con el fin de que, mediante el bombardeo de neutrones, el uranio-238 del combustible fuese transmutado en plutonio-239. Este plutonio tenía que recuperarse del combustible, así como el uranio-235 no usado, que quedaba después del envenenamiento de la reacción en cadena por los productos de fisión y otros efectos que hacían necesario extraer el

combustible. Los mismos requisitos se mantienen hoy. El uranio fisible y el plutonio son demasiado valiosos; como para tirarlos. Incluso si no fuera aprovechable, el plutonio es en cualquier caso excesivamente peligroso como para dejarlo perdido en el medio ambiente. Tampoco deben tirarse los residuos del combustible, incluyendo los productos de fisión, no por su valor sino porque son también peligrosamente radiactivos. Como consecuencia, el combustible irradiado procedente de un reactor es, normalmente, “reprocesado”.

Una planta de reprocesamiento de combustible nuclear es una planta química, pero no es una planta química ordinaria. Debido a que su materia prima, combustible irradiado de reactor, es intensamente radiactiva, todas las operaciones deben desarrollarse por control remoto, al otro lado de un blindaje estricto. El instrumental del proceso debe ser altamente fiable y requerir un mínimo de mantenimiento. Una vez en funcionamiento queda contaminado por la radiactividad, y cualquier fallo implica meses, o incluso años, para ser descontaminado antes de que pueda ser reparado. Como consecuencia, la cadena del proceso utiliza tan pocas partes mecánicas como es posible y depende, en cambio, de caudales de gravedad o válvulas simples.

Los diferentes tipos de combustibles requieren diferentes manejos. La planta británica de reprocesado en Windscale fue construida originariamente para procesar elementos metálicos de combustible procedentes de la producción de plutonio y los reactores Magnox. El combustible Magnox se almacena en una piscina de refrigeración adyacente a la planta de reprocesado. Cuando está listo para el reprocesado, es trasladado bajo agua, por operadores que lo observan en un circuito cerrado de televisión, a un edificio y alzado a la primera de una serie de “cuevas” o “celdas calientes”. Las paredes de las cuevas son de hormigón de unos dos metros de espesor, para interceptar la radiación gamma de los productos de fisión en el combustible. Una vez en las cuevas, el combustible puede ser observado a través de ventanas especiales practicadas en las paredes de la cueva. Cada ventana es como un gran acuario, lleno con una solución química como el bromuro de cinc, que es virtualmente transparente a la luz visible pero absorbe intensamente las longitudes de onda muy cortas de la radiación gamma.

Un elemento de combustible Magnox que penetra en las cuevas de reprocesado es cogido por control remoto y dejado caer en una máquina troceadora que corta los extremos del elemento y despega la vaina Magnox con la facilidad con que se pela una banana. La vaina contaminada cae a una cinta transportadora para ser trasladada a otro edificio próximo que se asemeja a un hangar de aviación pero que es, de hecho, un depósito de almacenaje de hormigón armado. La barra de combustible desnuda se carga en un almacén de tránsito y desde allí se deja caer en un tanque de ácido nítrico, que lo disuelve y ultima para el reprocesado.

El combustible óxido debe de tratarse de forma ligeramente diferente. Cuando se modernizó la planta de Windscale a principios de los años 60, la planta antigua de reprocesado se convirtió en una planta de “final de cabeza” para preparar el combustible óxido para el reprocesado. Durante su estancia en el reactor los pellets de combustible óxido se hinchan y se encajan por si mismos inextricablemente, dentro de su envoltura tubular. Como consecuencia, no se hace ningún intento para separar la envoltura de metal de los pellets óxidos. El combustible irradiado, en su cuba de transporte, es levantado hasta el piso más alto de la planta. La cuba es sujeta al final de una línea de cuevas, y el elemento combustible es suministrado gradualmente a la primera cueva. En esta cueva, una sierra imponente movida por un émbolo, corta todo el elemento, que puede consistir en más de 100 varillas de combustible. Cada corte produce un estallido de pellets pulverizados y una ráfaga de anillos de vainas de un centímetro de largo, que cae en el ácido nítrico. El ácido disuelve los residuos de los pellets. Los anillos de las vainas se dejan detrás, para ser almacenados como los Magnox, indefinidamente. El flujo de ácido pasa a la planta principal de reprocesado.

El reprocesado del combustible para el reactor refrigerado por gas a alta temperatura (HTGR) requerirá una forma muy diferente de “final de cabeza”. Una posibilidad es triturar el combustible cerámico y quemar el carbón en un quemador alimentado por oxígeno, antes de disolver lo que quede. Un tipo de combustible HTGR utiliza dos clases de partículas de combustible, con las partículas de torio fértil revestidas de una capa de sílice. El proceso de separación puede entonces mantener estas partículas, y su recientemente creado uranio-233 fisible, sin que puedan mezclarse con otro uranio durante el reprocesado.

Desde el final de cabeza en adelante, el reprocesado incluye líquidos: el combustible disuelto y una sucesión de varios disolventes. Primero, la solución de ácido nítrico se mezcla con una solución de un disolvente orgánico; en la planta de Windscale este disolvente tiene un nombre polisilábico que es abreviado sin contemplaciones a Butex. El uranio y el plutonio pasan al otro, lado, hacia el Butex, dejando atrás, aproximadamente, el 99,96 por 100 de los productos de fisión en el ácido de base acuosa. Este flujo de ácido extrae estos productos de fisión fuera de la planta de reprocesado; su trayectoria posterior será descrita en la sección siguiente.

Casi todo el uranio y el plutonio están ahora en la corriente Butex, fluyendo por gravedad desde una sección de la planta hasta la siguiente. Después de otro paso a través de una etapa de “extracción disolvente” similar, para extraer los productos de fisión rezagados, esta corriente se tropieza ahora con una solución de base acuosa; el plutonio y el uranio en este punto se separan, regresando el plutonio a la solución acuosa y dejando atrás al uranio en la Butex. En el camino tienen lugar varias maniobras químicas, para conseguir estos desplazamientos de lealtad. A veces, después de repetir algunos pasos, el uranio emerge en una corriente y el plutonio en otra, como solución de nitrato de uranio y solución de nitrato de plutonio, respectivamente, listos para volver a un punto anterior del ciclo de combustible y ser convertidos en elementos nuevos de combustible (o en bombas). Las corrientes de proceso del material fisible concentrado especialmente el plutonio deben diseñarse para protegerse contra la criticidad accidental. La planta de reprocesado posee sistemas elaborados de alarma para avisar al personal en el caso de un accidente de criticidad, que puede ser, por supuesto, casi invisible, pese a la granizada de neutrones y rayos gamma.

Gestión de residuos radiactivos

A través de todo el ciclo del combustible nuclear, los materiales implicados comparten una propiedad común: todos ellos están sometidos a algún grado de radiactividad. La radiactividad se presenta en la minería y en la fabricación de concentrados; los materiales permanecen radiactivos a través del enriquecimiento, la fabricación del combustible y el transporte, pero su actividad no es especialmente intensa. Esto, sin embargo, cambia dramáticamente cuando se encuentran dentro de un reactor en funcionamiento. Los neutrones del núcleo del reactor tienden a convertir en radiactivo todo su alrededor. Mientras que los materiales de este entorno permanecen dentro del blindaje biológico todo va bien; pero la radiactividad encuentra inevitablemente cierto número de vías de escape desde los confines del reactor, pese a estar bien precintado. La más importante de estas va a través de la recarga, cuando las existencias totales radiactivas de combustible son extraídas para el reprocesado; comentaremos las consecuencias del reprocesado dentro de un momento. Pero la radiactividad se abre también camino directamente hacia el exterior de un reactor en funcionamiento, y hay que entenderse con ella.

Toda radiactividad que se dirige hacia el medio ambiente fuera del blindaje biológico durante el transcurso del funcionamiento rutinario de un reactor se llama “escape de funcionamiento” ó “escape de rutina”. El caso más simple de escape de funcionamiento se origina precisamente dentro

del propio blindaje biológico, En los reactores con blindaje de hormigón próximo al núcleo especialmente aquellos con vasija de presión de hormigón pretensado es conveniente evitar que el hormigón esté expuesto directamente al calor del núcleo. Como consecuencia, se refrigera la pared interna del hormigón con una fina capa de aire que se descarga a la atmósfera por una chimenea en la parte inferior del edificio del reactor. Algunos de los núcleos del aire absorben neutrones y se hacen radiactivos, en un proceso llamado “activación neutrónica”. El más notable de los “productos de activación” es el argón⁴¹, un radioisótopo del gas inerte argón. Se sabe que algunos reactores descargan cientos de miles de curios de argón⁴¹. Afortunadamente, sin embargo, el argón⁴¹ tiene una breve vida media, de solamente 1,8 horas: por esto, esta producción aparentemente enorme decae a una actividad muy baja antes de la caída desde la chimenea hasta el nivel del suelo. También resultan activados otros átomos del aire, pero solamente en pequeñas cantidades y/o con vidas medias muy cortas.

El refrigerante del reactor puede transportar radiactividad fuera del blindaje biológico. Las impurezas del agua o del moderador de grafito son susceptibles de activación neutrónica. El carbono del moderador de grafito, del refrigerante de dióxido de carbono o de ambos se puede convertir en carbono¹⁴ radiactivo. Pero ya que el carbono ordinario es carbono¹², la transmutación requiere la absorción no de uno sino de dos neutrones, y es, como consecuencia, infrecuente. El refrigerante de agua pesada puede absorber neutrones, convirtiendo el deuterio (hidrógeno²) en hidrógeno³, o tritio, que es radiactivo. Pero el único refrigerante que responde adecuadamente a la activación neutrónica es el refrigerante de sodio en los reactores rápidos regeneradores de metal líquido. Como ya se ha indicado, se convierte en sodio²⁴, tan intensamente gammaactivo que debe de mantenerse completamente dentro del blindaje biológico.

El envainado del combustible también puede contribuir a la actividad en el circuito de refrigeración cuando sufre corrosión gradual debido al refrigerante caliente. Una vez más se trata de una consecuencia de las impurezas en el envainado que ha sido fabricado, por supuesto, tan poco susceptible a la absorción neutrónica como ha sido posible por razones de economía neutrónica. Las más dañinas, dentro de esta categoría, son las impurezas en el envainado de circaloy del combustible de los reactores refrigerados por agua. La corrosión de este envainado se intensifica por el contacto íntimo con el fluido de circulación rápida a alta presión, que transporta rápidamente la corrosión de superficie al flujo de refrigeración.

Mucho más serias son las fugas del envainado del combustible, a las que algunos reactores parecen inclinados. La aparición de productos gaseosos de fisión dentro de una barra de combustible produce tensiones crecientes en el envainado. Si, por cualquier razón, se produce una fisura en el envainado, el gas de fisión busca la salida y se escapa hacia el refrigerante. Fugas más importantes pueden también dejar escapar los productos volátiles de fisión, entre ellos el peligroso yodo-¹³¹. El “mecanismo detector de fugas” en un reactor Magnox olfatea la radiactividad detectable en el refrigerante y localiza los elementos defectuosos. Si el reactor puede recargarse en funcionamiento es posible extraer el combustible con fugas sin parar. Si el reactor, como en la mayoría de los diseños refrigerados por agua, únicamente puede ser recargado sin funcionar, se hace necesaria la parada. Además, el combustible en el que se produce una fuga lentamente puede ser difícil de localizar. En cualquier caso, la sustitución anticipada del combustible altera el ciclo del combustible y distorsiona el modelo previsto de densidad neutrónica en el núcleo. Por todas estas razones, el combustible con fuga se deja, frecuentemente, en un reactor hasta la recarga rutinaria.

Estos incidentes hacen necesario descontaminar los circuitos de refrigeración de un reactor. De no hacerse así, las fugas inevitables de radiactividad a través de las juntas de válvula y, otros puntos permeables se convierten en un peligro potencial para el personal y pueden interferir en el

mantenimiento. La descontaminación se hace, normalmente, de forma rutinaria, “sangrando” una pequeña porción de refrigerante y reemplazándola con refrigerante nuevo no contaminado. Por supuesto que cada vez que se acopla a la vasija del reactor una máquina de recarga para la recarga en funcionamiento, la máquina adquiere una parte de la actividad del refrigerante; esta actividad debe de descargarse y no perderla de vista cuando se despresuriza la máquina. En el caso de refrigerante de dióxido de carbono el gas sangrado el “gas extraído” pasa a través de diversos filtros y etapas de retardo.

Los reactores de agua en ebullición, que pasan el refrigerante del primario directamente hacia las turbinas, están especialmente inclinados a las fugas de refrigerante radiactivo. Un recurso posible para este caso es disponer de tanques de almacenaje para las sangrías de refrigerante. En estos tanques la actividad del refrigerante puede hacerse que decaiga durante algunos meses antes de que se evacúe. Pueden también disponerse tanques similares de retención para el drenaje de los suelos, para el agua de los sumideros utilizados en la descontaminación y para el agua de las lavanderías donde se lava la ropa contaminada. Las piscinas refrigerantes de almacenamiento del combustible irradiado, antes del embarque para el reprocesado normalmente recogen actividad del exterior de los elementos combustibles y también de cualquier elemento con fugas; por eso, hay que preocuparse también de este agua de refrigeración. Un procedimiento habitual consiste en circular el agua lentamente a través de piscinas, desviando continuamente una pequeña fracción, mezclándola y diluyéndola con la masa mucho mayor del agua de refrigeración descargada desde los condensadores de la turbina y devuelta al río o a las aguas costeras de donde se ha extraído. Los sistemas de tratamiento de aguas pueden emplear también intercambiadores de iones y otros tipos normales de instalaciones de purificación para recoger y separar los compuestos radiactivos de los lodos.

En el transcurso de las operaciones diarias en un reactor también resulta contaminada con radiactividad cierta cantidad de materiales sólidos, como bayetas del suelo, toallas de papel, vidrios rotos de las muestras del laboratorio, etc. El volumen de los sólidos contaminados debe reducirse mediante, por ejemplo, incineración; pero en el momento presente son, por lo normal, simplemente enterrados en cementerios designados, o arrojados al mar en contenedores preparados, como sucede con los lodos activos intercambiadores de iones.

Toda la radiactividad que alcanza al mundo exterior, directamente desde un reactor, a través de estos caminos, puede considerarse, en conjunto, como radiactividad de “bajo nivel”. Ya que las descargas de funcionamiento están, como norma, diluidas y no son muy radiactivas, se dice con frecuencia que los reactores descargan una radiactividad muy pequeña a su entorno. Esto es, hablando estrictamente, cierto; pero es ligeramente erróneo. Casi toda la radiactividad que desprende un reactor lo hace dentro del combustible usado extraído del núcleo. Ya que el reactor ha creado, virtualmente, la totalidad de esta radiactividad, resulta una alegación muy especial argüir que la radiactividad no guarda relación con el reactor. Muy al contrario: la radiactividad del combustible usado en un reactor es uno de los más desafiantes problemas planteados por el funcionamiento de los reactores nucleares.

Cuando un elemento combustible nuevo entra en un reactor está tan pulido y brillante como un instrumento quirúrgico. Cuando aparece otra vez, después de la irradiación, está hinchado, descolorido, posiblemente incluso hecho una pasta con lo que los ingenieros nucleares llaman groseramente “crudo”. Dentro del envainado machacado, el combustible contiene uranio-235 y uranio-238 no utilizado, más un amplio conjunto de otros núcleos creado por las reacciones de fisión, la absorción neutrónica y la desintegración radiactiva: uranio-237, plutonio-239, 240, 241 y 242, americio-241 y otros llamados “actínidos” y centenares, literalmente hablando, de diferentes

núcleos de productos de fisión y sus productos de desintegración y de la actividad neutrónica, incluyendo el kriptón-85, estroncio-89 y 90, yodo-129 y 131 y cesio-137. Algunas de estas especies tienen vida media corta; mientras el combustible irradiado permanece en la piscina de refrigeración o viaja desde el reactor hasta la planta de reprocesado, los isótopos de vida corta como el uranio-237 y el yodo-131 se desintegran hasta la insignificancia. Cuando el combustible traspasa el umbral de la planta de reprocesado después de, por ejemplo, 100 días de refrigeración, su radiactividad procede, principalmente, de los radioisótopos de sólo una docena de elementos.

Admitiendo que el envainado ha sido hermético a los gases hasta que la planta de final de cabeza lo secciona o lo corta abriéndolo, los productos gaseosos de fisión, particularmente el kriptón-85, emergen inmediatamente a la atmósfera de la celda caliente. El kriptón-85 tiene una vida media de unos 10,8 años. Es un gas inerte, químicamente inactivo y es, por consiguiente, difícil de recuperar. El proceder actual es simplemente descargarlo por la chimenea al aire exterior (hasta 1971 las autoridades norteamericanas consideraron la cantidad de kriptón-85 descargado desde sus plantas de reprocesado como clasificada esto es, secreta porque podría revelar cuanto material fisible habían producido). Los radiobiólogos no consideran que la producción creciente, consecuentemente, de kriptón gammaemisor en la atmósfera terrestre ofrezca ningún peligro, actualmente. Pero si los programas de energía nuclear se incrementan tan notablemente como se anuncia se considera que alguna forma de retención del kriptón habrá de instalarse en las plantas de reprocesado antes de que acabe este siglo. Algunas consideraciones similares son también de aplicación al yodo-129. Este tiene una vida media de 16 millones de años, y no es, por consiguiente, muy radiactivo; pero ya que se concentra, como todos los isótopos del yodo, en el tiroides humano, cualquier existencia en el medio ambiente debe de considerarse con precaución.

Dentro de una planta de reprocesado hay también una acumulación inevitable de líquidos de baja actividad y de residuos sólidos radiactivos, exactamente como aquellos que se recogen en un reactor, aunque probablemente más abundantes. Los residuos sólidos se entierran o se arrojan al mar, como señalábamos antes. En la planta de reprocesado de Windscale los residuos líquidos se arrojan al Solway Firth a través de tuberías gemelas que los descargan bajo el agua a más de tres kilómetros mar adentro, a un ritmo de unos 500.000 litros por día.

Todas estas descargas rutinarias de radiactividad se llevan a cabo de acuerdo con las normas elaboradas por las autoridades nacionales competentes, normalmente basadas en la Comisión Internacional de Protección Radiológica. En Gran Bretaña, por ejemplo, las descargas de los efluentes radiactivos son dirigidas por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, así como por los mismos descargadores, para asegurar el cumplimiento de las normas impuestas como condiciones de operación en las autorizaciones dadas por, entre otros, la *Inspectorate of Nuclear Installations*, (Inspección de Instalaciones Nucleares), según la legislación nacional. En los Estados Unidos, tal y como describiremos en el Capítulo 5, tales normas han sido objeto de dilatada controversia.

El combustible, separado de los productos de fisión gaseosos o volátiles y del envainado y, en algunas plantas se reprocesado, incluyendo el envainado se disuelve en el ácido nítrico por separación en primera etapa. El “licor de brujas” que queda atrás, cuando el uranio y el plutonio pasan al disolvente orgánico se llama “residuo de alta actividad”. Sin duda, éste es el más espantoso material residual producido en cualquier proceso industrial. En Windscale, el reprocesado de una tonelada de combustible produce alrededor de cinco metros cúbicos de residuos de alta actividad, es decir, suficiente para llenar cinco o seis bañeras. El residuo contiene ácido nítrico, productos de fisión que son térmicamente calientes e intensamente radiactivos, hierro procedente de la corrosión de las vasijas de la central, impurezas químicas del combustible original y un barrillo del disolvente

orgánico transportado. Como puede imaginarse, necesita un tratamiento delicado para evitar efectos laterales indeseables, como reacciones entre el disolvente y el ácido nítrico a altas temperaturas. El volumen se reduce por evaporación, en el vacío, para mantener las temperaturas bajas. El proceso debe seguirse bajo un control cuidadoso siempre remoto, desde luego para evitar la cristalización o la precipitación donde pudiera resultar embarazosa (como en la línea de proceso) y mantener los productos de fisión en una baja concentración a fin de que la proporción de calor producido no sature el sistema de refrigeración. Después de la evaporación, el residuo concentrado es conducido a la instalación de almacenamiento, próxima a la planta principal de reprocesado. En Windscale, ésta es un edificio de hormigón que contiene un conjunto de tanques especiales de almacenamiento, ocho de ellos de una capacidad de 150 metros cúbicos. Los tanques más pequeños están dotados de aletas de refrigeración; cada uno de los mayores, tiene siete circuitos de refrigeración independientes, cubiertas externas que incluyen detectores de fuga y un sistema interno de agitadores para impedir que se acumulen los sólidos en el fondo del tanque. Los circuitos de refrigeración de uno de los tanques más grandes pueden extraer hasta dos megavatios de calor, esto es, unos 13 vatios por litro; esto limita, a su vez, la concentración permisible del caudal de productos de fisión que fluye hacia el tanque. La temperatura del tanque se mantiene a unos 50°C. La evaporación gradual desde la disolución va acompañada de una disminución gradual de la generación radiactiva de calor, la evaporación puede mantenerse en equilibrio con la generación de calor para mantener una concentración suficientemente baja. Es también necesario prevenir la aparición de hidrógeno, producido por la rotura de las moléculas de agua debido a la radiación, llamado "hidrógeno radiolítico". Los tanques pueden estar interconectados para evitar las sobrecargas de los circuitos de refrigeración por la llegada de residuos de relativamente alto nivel térmico, y proporcionar instalaciones alternativas para el caso de una fuga. Los tanques en uso están permanentemente empotrados en bóvedas de blindaje de hormigón armado con acero, como hasta ahora no se conocían. Un programa de construcción de nuevos tanques mantiene utilizable la capacidad de reserva. A finales de 1974 el volumen total de residuos líquidos almacenado en Windscale era de unos 600 metros cúbicos.

En las instalaciones de reprocesado de los Estados Unidos, Francia, Unión Soviética, India, China y otros lugares existen instalaciones similares de almacenamiento en tanques. La más famosa o notable- está en la Reserva de Hanford, en el estado de Washington. Aquí, en 151 tanques enormes se almacenan los residuos líquidos de alta actividad cerca de 250.000 metros cúbicos que resultan de recuperar el plutonio de los reactores de producción de Hanford para el programa de armas nucleares de los Estados Unidos. Se considera, generalmente, que el almacenamiento en tanque de residuos de alta actividad solamente puede realizarse durante una vida útil de veinte a veinticinco años por tanque, aunque puede que sea algo más para tanques de acero inoxidable. Muchos de los tanques de Hanford son de acero al carbono ordinario: más de una docena de fugas han ocurrido ya, incluyendo, por lo menos, una fuga realmente muy importante.

El 20 de abril de 1973 nadie prestó ninguna atención particular al tanque 106T en el área 200 Oeste de la Reserva de Hanford. El conjunto de tanques T se construyó en 1943-44 y es uno de los más viejos de Hanford. Incluye doce tanques, cada uno con una capacidad escasamente por encima de los dos millones de litros, y cuatro con una capacidad justamente por encima de los 200.000 litros. El tanque 106T es uno de los mayores. Está construido con hormigón reforzado con un alineamiento de acero al carbono en su fondo y en los lados, es cilíndrico de forma, de unos 23 metros de diámetro y 10 de profundo, y está hundido en el suelo con unos dos metros de tierra sobre su techo en forma de cúpula. En abril de 1973, el tanque 106T contenía residuos radiactivos de alta actividad procedentes de la planta de reprocesado de combustible Purex, con alrededor de 1,5 millones de litros, principalmente en forma líquida. El 20 de abril, más o menos, el tanque 106T sufrió una fuga.

Los empleados de la Atlantic Richfield Hanford Company (ARHCO), la contratista de la AEC responsable de la instalación, cumplieran con su misión. Del 4 al 24 de abril, se bombeó al tanque 106T una entrega de líquido activo. Cada semana, más a menos, después de que finalizara el bombeo, alguien leía la esfera que indicaba el nivel del líquido radiactivo en el tanque 106T y lo anotaba en un cuaderno. Cada semana, el supervisor de turno mandaba a alguien más que revisara el dato. Aparentemente, nadie lo hizo. El 8 de mayo, la lectura mensual de radiactividad en el pozo 299-W-10-15, un hoyo de prueba inmediato al tanque 106T no señaló nada fuera de lo normal. El 31 de mayo, cuando el detector de radiación se bajó al pozo, se fue a fondo de escala. El operador que lo manejaba llamó al supervisor de turno, que le pidió que comprobara el pozo diariamente, pero no hizo nada. Al día siguiente, usando una sonda Geiger-Müller, menos sensible, el operador de mediciones obtuvo una lectura de 300.000 cuentas por minuto. Los datos de radiación fueron colocados sobre la mesa del supervisor, que no los repasó. Todo siguió así, día a día, hasta que, de forma desenfadada, por media de un intercambio casual de llamadas telefónicas el 7 de junio, a alguien se le ocurrió la idea de que podía no ir todo bien debajo del tanque 106T. El 8 de junio por la mañana, el supervisor confirmó lo que parecía ser una fuga en el tanque. Se iniciaron planes –“planes de emergencia”, curiosamente sin ninguna concordancia con la conducta precedente para vaciar el tanque 106T. Aquella tarde se informó a la AEC.

Entre el 20 de abril y el 8 de junio, el tanque 106T dejó escapar al suelo, más o menos, 435.000 litros de líquido absolutamente radiactivos conteniendo aproximadamente 40.000 curios de cesio-137, 14.000 curios de estroncio-90 y 4 curios de plutonio. Los investigadores de la AEC declararon posteriormente que la radiactividad no pudo alcanzar el nivel de las aguas subterráneas debajo de los tanques; pero hubo de adaptarse un programa de perforamiento para localizar los residuos perdidos, para que los nuevos agujeros facilitaran la migración hacia abajo de la radiactividad.

El personal de la ARHCO declaró al comité de investigación que no habían sido capaces de encontrar un método por el que pudieran asegurar por ellos mismos que un tanque estaba libre de fugas antes de rellenarlo. El 24 de junio de 1973, la ARHCO informó a la AEC que sería necesario una ampliación adicional del límite de tiempo para iniciar el programa formal de control de calidad que ya había sido establecido antes. La fuga era la decimoprimer registrada en Hanford, no sería la última.

Evidentemente, la duración del peligro de algunos componentes de los residuos de alta actividad, excede al del tanque de almacenamiento. El estroncio-90 tiene un período de semidesintegración de 28 años, el cesio-137, 30 años. Se necesitan diez períodos para reducir la radiactividad de una muestra a milésimas ($1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/1.024$). Como consecuencia, se necesitan aproximadamente 300 años para que la radiactividad de 1 curio de estroncio-90 o cesio-137 descienda a 1 milicurio. Los residuos de alta actividad que produce 1 tonelada de combustible irradiado incluyen unos 100.000 curios de cada uno de ellos. Un PWR de 1.000 MWe, produce, al menos, 25 toneladas de combustible irradiado cada año; esto es, bastante más de 2 millones de curios de estroncio-90 y otros dos millones de curios de cesio-137. De aquí a 300 años esta particular contribución se habrá reducido, por un factor de mil, a solamente 2.000 curios cada uno: teniendo en cuenta que 2.000 curios de estroncio-90 no pueden considerarse como “solamente”. Multiplíquense estas cifras por el número de reactores actualmente en funcionamiento, en construcción o proyectos y el problema consecuente no resultará en ningún modo aparente. Además los métodos actuales por razones económicas, si no por razones técnicas no extraen todos los actínidos del residuo de los productos de fisión: quizás el 1 por 100 del plutonio, con sus 24.400 años de período de semidesintegración, se deja atrás, para ser añadido al desasosiego del residuo

final.

Es evidente que tales cantidades de radiactividad potencialmente peligrosas requieren una administración escrupulosa. Mientras que el almacenamiento en tanque se considera una medida provisional satisfactoria continúan los esfuerzos por encontrar una solución del problema a largo plazo. (Después de todo, el coste de la sustitución perpetua de los tanques es un ítem adicional en una hoja de balance, que es precisamente como aparece aquello.) Algunas de las propuestas resultan exóticas. Se ha planteado seriamente que los residuos de alta actividad puedan ser lanzados desde la tierra, mediante un cohete, hasta el sol; pero, el coste podría ser permítase la expresión astronómico, requiriendo eventualmente varios cohetes Saturno por semana, con la posibilidad siempre presente de que el fallo de un cohete esparciera su carga de residuos sobre la tierra. Otra propuesta futurista se refiere a la colocación de bidones de residuos en la capa de hielo de la Antártida, donde su propio calor les permitiera fundir su camino hacia la corteza porosa; y descargar bidones de residuos en lugares del fondo oceánico, donde los movimientos geológicos puedan gradualmente introducirlos en el interior de la tierra. Pero una visión más realista señala que estamos atados, a los residuos en cualquier caso, excesivos de alta actividad que creamos; y lo mismo estarán nuestros hijos y los hijos de nuestros hijos, durante siglos e, incluso, milenios.

Para mitigar en alguna medida esta carga, se acepta actualmente que los residuos de alta actividad deben estar, por lo menos, en forma sólida mejor que en forma líquida, para inmovilizar el residuo, reduciendo la posibilidad de que se extienda por medio de fugas o por vaporización. Hay en desarrollo varios procedimientos de solidificación. En los Estados Unidos, en Hanford, se hace que los residuos sean simplemente hervidos, por vía seca, dentro de los tanques de almacenamiento, para que queden como una pasta sólida en los tanques. En la NRTS, en Idaho, los residuos de alta actividad son “calcinados” cocidos a alta temperatura en gránulos como arena blanca basta, que son almacenados en enormes arcones subterráneos de acero inoxidable envueltos en hormigón. Otro procedimiento, particularmente favorecido por los británicos, es evaporar y fundir los residuos de alta actividad en cristal denso. Ahora hay en preparación planes para construir un sistema piloto que embutirá el residuo líquido de alta actividad en pilares huecos de vidrio de 75 centímetros de diámetro y 4 metros de altura. La temperatura en la superficie de estos pilares sería de 450°C; evidentemente, necesitarán todavía alguna forma de refrigeración. El plan es almacenar los pilares en un estanque de refrigeración; para eliminar la posibilidad de fugas de residuo del pilar de vidrio, éste se formará dentro de un contenedor, que puede sellarse.

Una cuestión de interés es si esta “vitrificación” de residuos se obtendría directamente mientras abandonan la planta de reprocesado, o solamente después de, por ejemplo, tres años de almacenamiento como líquido. Si el residuo puede reducir su desprendimiento de calor por unidad de volumen; será posible incorporar más residuo en un volumen dado de vidrio sin entrañar problemas de extracción de calor después de la vitrificación. De otra forma, si el residuo se vitrifica solamente después del almacenamiento provisional, siempre se tendrá a mano una existencia sustancial del residuo más altamente activo en forma líquida, lo que tiende a eliminar la ventaja en seguridad de la inmovilización del residuo¹⁰.

10

En noviembre de 1976 el biólogo disidente soviético Jauros Medvedev informó de una supuesta catástrofe producida en la región soviética de Cheliabinsk, en los Urales del Sur, como consecuencia de haberse producido criticidad en una planta de tratamiento o almacenamiento de residuos radiactivos. La catástrofe habría tenido lugar a finales de 1957 o principios de 1958, habría producido la muerte de centenares de personas y habría contaminado una extensa área. Informes de la CIA confirmaron, sin mayores precisiones, esta catástrofe, sabiéndose también que los Estados Unidos no tuvieron interés en señalarla, en su día, para no alertar contra su propio programa

Mientras que la ubicación en el sol o bajo una capa de hielo todavía resulta muy distante, se ha abierto paso una forma de ubicación permanente más allá de lo puramente teórico: la inserción de bidones de residuos de alta actividad solidificados en una formación geológica estable. El tipo de formación geológica que se considera más adecuada es la mina de sal y las investigaciones en los Estados Unidos y Alemania Federal ha sugerido varias localizaciones posibles. Se practicaría un agujero en el piso de una galería subterránea de una mina de sal. Se haría descender un bidón de residuos por el agujero por control remoto, como es normal y podría espolvorearse, después de esto, sal suelta sobre él. La sal se ablandaría, bajo el intenso calor del bidón, y lo rodearía, sellándolo permanentemente en el sitio y extrayendo el calor hacia afuera, a una velocidad adecuada para mantener el residuo sólido, alejado de la fusión. La “Caverna de Sal”, una instalación piloto para el almacenamiento en formación salina, se preparó en los Estados Unidos a finales de los 60, cerca de Lyons, Kansas. Pero a despecho de los pronunciamientos iniciales oficiales contrarios~ el lugar fue eventualmente abandonado por inadecuado. Una compañía minera de sal en un lugar próximo, bombeaba varios miles de metros cúbicos de agua por una perforación para obtener sal disuelta; pero el agua desapareció, produciendo dudas sobre la pretendida permeabilidad de la formación salina. Afortunadamente, todavía no ha sido enterrado ningún residuo de alta actividad en ella. La búsqueda de formaciones salinas más adecuadas continúa. En los Estados Unidos, la ubicación de interés actual es Carlsbad Caverns (Nuevo México); en Alemania Federal los residuos de alta actividad se almacenan en las cuevas de sal de Asse con planes para almacenar en breve residuos de más alta actividad.

Una nación, por lo menos, con compromisos nucleares importantes, ha rechazado, por el momento, explícitamente, considerar cualquier forma de alojamiento “no recuperable”, para los residuos de alta actividad. Canadá ha anunciado que todos los residuos de alta actividad que se produzcan en su programa de energía nuclear serán almacenados debajo de tierra, en forma recuperable, hasta que sea comprobado totalmente cualquier método alternativo.

Merece la pena tener en cuenta, de pasada, lo que la industria nuclear considera, como si fuera un tema para un curso, como “gestión de los residuos”. Parece una carrera con futuro - un largo futuro.

nuclear.

Parte II.

El mundo

y la fisión

nuclear

4. Los comienzos

Como fenómeno estrictamente físico, la fisión nuclear ofrece un amplio panorama para la disciplina intelectual. Si no implicase nada más, podría dejarse para aquellos especialistas que puedan encontrar satisfacción en su desafío intelectual; los demás, podríamos entretenernos con otros temas más apremiantes. Desgraciadamente, la fisión nuclear -como todo el mundo sabe- implica mucho más que argumentos matemáticos abstrusos y refinadas sutilezas. Casi desde el momento en que fue identificada por primera vez, al final de los años 30, la fisión nuclear ha exigido no solamente artículos eruditos, sino también importantes decisiones políticas. El contexto social, económico y político de la fisión nuclear ha sido, desde el principio, un factor esencial en su desarrollo; a su vez, ha ejercido una vasta gama de influencias sociales, económicas y políticas. Para prever con alguna claridad la forma del futuro nuclear se hace necesaria una perspectiva histórica. Es necesario saber no solamente cómo ocurre la fisión nuclear, sino también quién la hace posible, bajo qué circunstancias y con qué objetivos. Hemos aludido ya, de forma preliminar, a estos aspectos del tema. Es el momento de retroceder y examinarlo con mucho más detalle. Dos temas, en particular, emergen de él: los imprevisibles efectos de la radiación y los ocultados resultados del desarrollo de las armas nucleares. Como veremos, las actividades nucleares, desde el inicio, se han caracterizado por la imprevisibilidad y el secreto. A través de la historia nuclear, o bien se ha sabido demasiado poco o bien se ha sabido suficiente, pero se ha dicho muy poco.

En 1896 Henri Becquerel descubrió la radiactividad. Muy poco después, mientras llevaba un frasco de radio en su bolsillo, que le quemó, descubrió también el más preocupante atributo de la radiactividad: sus efectos biológicos, actuales y potenciales. Un episodio que ocurrió más de cincuenta años después caracteriza la situación que prevaleció desde los descubrimientos de Becquerel. Las organizaciones interesadas estaban discutiendo el diseño de un símbolo internacional que contuviera la advertencia “PELIGRO: RADIACION”. Un grupo de participantes, incluyendo representantes sindicales, apoyaron el diseño de una calavera enseñando los dientes con un aura de líneas ondulantes emanando de ella. Pero los portavoces del gobierno y de los grupos industriales rechazaron de plano de aprobación de ese diseño, que consideraban demasiado alarmista. Como resultado, el diseño finalmente adoptado fue un círculo con tres pétalos extendiéndose desde él, solamente inteligible para aquellos a los que les ha sido explicado con anterioridad, y totalmente desprovisto de previas asociaciones, ya fueran benévolas o malévolas.

Esta contradicción es un ejemplo sucinto del cisma que divide los puntos de vista en torno a la radiación. Como ya indicamos, los principios biológicos del tema son acaloradamente controvertidos, cada día más. Lo que está todavía más controvertido, de alguna manera, es la evolución del contexto social de la radiación, especialmente la creada por la radiactividad. (Un buen ejemplo pueden constituirlo otras formas de radiación ionizante, especialmente los rayos X de diagnóstico: pero solamente comentaremos aquí que los rayos X de diagnóstico debieran usarse sólo cuando están claramente indicados por evidencia médica, y debieran ser generados sólo por aparatos bien aislados, durante una exposición tan breve como sea posible.) Antes de zambullirnos en el tumulto de la polémica nuclear es importante recalcar - ya que puede ser después fácilmente pasado por alto- que el principal problema para la salud es el creado por la radiación; que la radiación es invisible de por sí y solamente detectable mediante instrumentos especiales; que las diferentes formas de radiación presentan diferentes peligros; y que el resultado pernicioso de la exposición de la radiación puede manifestarse por sí mismo durante muchos años. Por estas razones, no es, en absoluto, nada fácil confiar en la comprensión de los efectos de la radiación. Como consecuencia, las iniciativas humanas relativas a la radiactividad pueden ser particularmente difíciles de evaluar desde un punto de vista de salud pública. Pueden ser también, como veremos, difíciles de evaluar por una gran variedad de criterios, entre los que no son los menores los

económicos.

Después del descubrimiento de Becquerel vinieron los de Pierre y Marie Curie, que aislaron los poderosos elementos radiactivos polonio y radio del mineral uranífero pechblenda. Ahora resulta que los Curie eran, paradójicamente, afortunados en su pobreza. Su laboratorio era un aireado ático y su, por otra parte indeseable ventilación, probablemente salvó a Marie Curie de una muerte temprana producida por la inhalación de radón procedente de sus materiales de experimentación (el ático aireado no salvó a su marido, que murió debido a una tecnología bastante diferente, bajo las ruedas de un coche en una calle de París).

La fascinación científica de las sustancias recientemente descubiertas corrió casi totalmente paralela con la búsqueda de aplicaciones prácticas. Los rayos X de Roentgen eran, a los pocos meses de su descubrimiento, aplicados en medicina; pero, antes de tres años los rayos X - que requerían, por supuesto, aparatos para generarlos - se encontraron con la competencia de la radiación del radio y sus derivados. Llegaron ¡ay! los primeros éxitos de la radioterapia: sus pioneros, y entre ellos la misma Marie Curie, se encontraron entre los primeros en experimentar las nefastas consecuencias retardadas de la radiación. Lo mismo sucedió con sus pacientes, algunos de los cuales murieron no de cáncer u otras enfermedades, sino de las quemaduras de la radiación infligidas con la intención de curar. El radio se convirtió, durante un tiempo, en un material de moda. La “fiebre del radio” resultó inesperadamente triunfante en varias partes de Europa y los doctores prescribían medicinas conteniendo radio. Hubo también una ola de relojes de pulsera con “dial luminoso”: los números de las esferas de los relojes se pintaban con una mezcla de sulfuro de cinc y radio, y brillaban en la oscuridad. Las mujeres que trabajaban en las fábricas utilizaban finos pinceles para aplicar esta pintura luminosa; y para dar a los pinceles una adecuada suavidad en la punta sus utilizadoras solían mojarlo con los labios. Como consecuencia, casi todas las “iluminadoras” caían enfermas, con las encías sangrientas y con anemia; y eventualmente, la mayoría experimentaban sarcoma de pulmón -cáncer de pulmón- por la acumulación de radio en sus cuerpos. Una sola fábrica pequeña en New Jersey produjo más de cuarenta víctimas, entre la plantilla, entre 1915 y 1926.

El radio que ahora parecía tan omnipresente se estaba produciendo en minas como la de plata de Joachimsthal, cuyo mineral de uranio, le permitió prolongar su vida de explotación. Pero los mineros de Joachimsthal -como ya describimos- eran proclives a la *Bergkrankheit*: cáncer de pulmón producido por inhalación de radón y los derivados del radón. Un trabajo médico de investigación había identificado, hacia 1930, la génesis de esta enfermedad y aclarado que podría haberse evitado garantizando la ventilación de las minas subterráneas de uranio, una lección que iba a ser dramáticamente ignorada en la carrera norteamericana por el uranio de los años 50. Entre los investigadores médicos, biólogos y los propios trabajadores de radiaciones ya existía, a lo largo de los años 20, la sospecha de que la radiación poseía algunos desagradables atributos, que podía resultar perjudicial para el organismo humano. Pero no existía, en todo este tiempo, ninguna preocupación pública particular, ni un sentimiento generalizado de desconfianza sobre los materiales radiactivos y sus usos. Parecía como si la controversia sobre la radiación tuviera un período de latencia aún más largo que las enfermedades radiactivas.

Desde 1939 a 1945 no hubo ni oportunidad ni deseo de poner en cuestión las consecuencias que podrían surgir en la fabricación y el uso de los materiales radiactivos: ninguna oportunidad, debido a que la mayor parte de los frenéticos esfuerzos que se desarrollaban en ese momento, tenían lugar bajo estrictas medidas de secreto, y ningún deseo, porque los afectados estaban preocupados con el mucho más inmediato y preocupante temor de que la Alemania nazi consiguiera antes la tecnología de las armas nucleares. Como todo el mundo sabe ahora, los nazis no lo consiguieron. Los Estados Unidos consiguieron la tecnología y las armas; y las usaron, terminando devastadoramente la

Segunda Guerra Mundial.

Como consecuencia de las bombas de Hiroshima y Nagasaki, el gobierno de los Estados Unidos creó la Comisión de Damnificados por la Bomba Atómica. Su función era doble. En la medida en que afectaba a las víctimas japonesas, era una fuente de ayuda médica para los que habían sobrevivido a las explosiones nucleares pero habían ya sufrido o podían sufrir, como consecuencia, los efectos de la radiación. En la medida en que afectaba a los Estados Unidos, era una oficina que podía desarrollar un estudio a gran escala y obtener documentación de los efectos de la radiación en los seres humanos: como puede apreciarse, los dos papeles no eran totalmente compatibles. Muchos japoneses se resistieron, debido sobre todo al papel que veían que se les había forzado a desempeñar, como conejos de Indias, para la mayor gloria del primero y único utilizador de las bombas nucleares.

Sin embargo, los investigadores médicos norteamericanos que estudiaban los efectos de las radiaciones pronto encontraron oportunidades dentro de casa. Quince días después de la bomba de Hiroshima, el 21 de agosto de 1945, Harry Daghlian, un físico de Los Alamos, hizo, accidentalmente, que una muestra de material fisible alcanzara criticidad mientras estaba manejándolo. Sus manos y su cuerpo resultaron abrasados por un estallido masivo de radiaciones, rayos gamma y neutrones. Llevado al hospital antes de que transcurriera media hora, Daghlian perdió la sensación de sus dedos, después se quejó de dolores internos y, finalmente, se puso a delirar. Se le cayó el cabello. Los glóbulos blancos se incrementaron, mientras que sus tejidos dañados intentaban en vano recuperarse. Necesitó veinticuatro días para morir.

La muerte de Daghlian introdujo en la comunidad entera de Los Alamos el siniestro conflicto ético en el que los mismos físicos nucleares - los “científicos atómicos”- se encontraban ya. Es muy meritorio, considerado más de treinta años después, que los primeros en reconocer el dilema de la energía nuclear -el conflicto entre sus potenciales constructivo y destructivo- fueran los propios físicos nucleares.

Incluso antes de la caída de la bomba de Hiroshima, un grupo de aquellos que habían ayudado a crearla, firmaron un memorándum, llamado desde entonces el “informe Franck”, que fue sometido al Secretario de la Guerra norteamericano del 11 de junio de 1945, contemplando con precisión desoladora la carrera de armas nucleares, en el caso del uso de la bomba atómica contra un objetivo militar. James Franck y sus colegas propusieron, por el contrario, que la bomba fuese exhibida en un lugar remoto, desierto o isla, ante representantes de Japón y de las Naciones Unidas Aliadas, y que los Estados Unidos renunciaran entonces a su uso, asegurados de que el resto de las naciones del mundo acordaran hacer lo mismo. Pero las propuestas de Franck, como el mundo sabe, cayeron en suelo pedregoso (al contrario de como lo hicieron las bombas de Hiroshima y Nagasaki). Los firmantes de este informe, con otros colegas igualmente preocupados, fundaron, a finales de 1945, el *Bulletin of the Atomic Scientists*. Desde su comienzo, el *Bulletin*, publicado en Chicago, se ha mantenido como una de las más sensibles y prestigiosas voces que se han alzado en el debate nuclear en todas sus vertientes.

El 21 de mayo de 1946, Louis Slotin, un físico canadiense que trabajaba en Los Alamos, llevaba a cabo un ejercicio que llamó “despellejar la cola del dragón”. Había hecho la operación muchas veces mientras determinaba experimentalmente los detalles del conjunto crítico rápido de las semiesferas del uranio-235, que tenían que golpearse mutuamente para producir la deseada explosión nuclear. De esta forma, Slotin había determinado experimentalmente la masa crítica de la bomba de Hiroshima. El ejercicio de Slotin implicaba deslizar las dos semiesferas gradualmente una hacia la otra a lo largo de una barra usando dos destornilladores y observando cómo los indicadores

de detección de neutrones iban conduciendo a la criticidad. El 21 de mayo estaba enseñando el fenómeno a un grupo de media docena de colegas, cuando el destornillador resbaló. La sala se llenó de una luz azul. Slotin separó las semiesferas con sus manos desnudas, con lo que probablemente salvó la vida de sus colegas. Pero él estaba condenado y lo sabía. Murió nueve días después, siendo registrada meticulosamente su enfermedad radiactiva fatal por los por otra parte impotentes médicos de plantilla. A los colegas de Los Alamos de Slotin se les prohibió, por razones de seguridad, alterar sus actividades rutinarias o revelar cualquier cosa acerca del accidente, mientras presenciaban su lenta muerte.

El conjunto que mató a Louis Slotin estaba reservado para la segunda bomba de un par de pruebas atómicas que la Marina norteamericana pensaba llevar a cabo en el atolón de Bikini, en las Islas Marshall. Las Islas Marshall habían sido, antes de la Segunda Guerra Mundial, un protectorado alemán: esta responsabilidad fue asumida por los Estados Unidos al final de la guerra, por la “protección” dada en adelante suena como reminiscencia de la “protección” a la que se refieren los chantajistas. Las pruebas “Capaz” y “Panadero” se llevaron a cabo el 30 de junio y el 25 de julio de 1946. “Capaz” fue una explosión nuclear en la atmósfera; “Panadero”, una explosión en las aguas profundas del lago de Bikini. Ambas produjeron ásperas protestas en muchos científicos, principalmente de la *Federation of Atomic Scientists* (Federación de Científicos Atómicos) una federación recientemente formada por grupos locales de científicos preocupados por las implicaciones de su trabajo; después se convirtió en la *Federation of American Scientists* (Federación de Científicos Americanos), y treinta años después sigue implicada profundamente y de forma abierta en los temas nucleares. Se dijo que la Marina de los Estados Unidos preparó las pruebas de Bikini, principalmente, para mostrar que el Ejército no era la única rama de los militares con capacidad nuclear. Alrededor de 42.000 espectadores llegaron en 250 barcos y 150 aviones: militares, políticos, diplomáticos, más otros miles adicionales de científicos con un guión de la obra. Los científicos no implicados insistieron en que las pruebas servirían muy poco a los propósitos experimentales iniciales y que aparecieron como una hipocresía mientras las Naciones Unidas se enfrentaban con el problema de control internacional de la tecnología nuclear. Para ellos y para muchos otros, toda la operación resultaba un espantoso ejercicio de relaciones públicas para mostrar al mundo el último logro de los Estados Unidos.

Cualquiera que fuese su motivación las pruebas de Bikini presentaban un aspecto que el público no conoció en ese momento. Con el fin de despejar el espacio necesario para sus actividades, la Marina norteamericana expulsó sin contemplaciones, en marzo de 1946, a 167 habitantes de las Marshall, transportándolos desde Bikini a Rongerik, otra isla a muchos kilómetros de distancia, con vegetación, suelo y pesca mucho más pobres, haciendo grandes promesas a los indígenas, que fueron, a continuación, prácticamente olvidados. La Marina aseguró repetidamente a los indígenas que todo estaría pronto en condiciones para el regreso a sus casas. Lo que no dijo fue que las pruebas de 1946 hicieron estragos en la fértil laguna de Bikini, dejándola llena de barro radiactivo y convirtiendo la vida marina, en más de 150 kilómetros, en algo inseguro de comer. Hasta 1968 no se permitió a los primeros nueve habitantes de la isla el regreso a Bikini, a una isla alterada hasta casi hacerla irreconocible, debido a las explosiones nucleares y a sus efectos posteriores. Las ruinas magulladas de los barracones y torres militares norteamericanas destacaban sobre la maleza. La nueva vegetación era tosca e improductiva; incluso los cangrejos de coco, enormes crustáceos trepadores de árboles, considerados como una exquisitez de las Islas Marshall, habían acumulado tanto estroncio-90 en sus conchas que hubo de prohibirse a los indígenas comerlos. Las primeras pruebas de Bikini fueron llamadas, grandilocuentemente, Operación “Encrucijada”. Para los indígenas de las Marshall debió de parecer, más bien, como el final del camino.

Apenas las bombas de Hiroshima y Nagasaki trajeron su desconcertante final a la Segunda Guerra

Mundial se hizo evidente la primera manifestación de paranoia nuclear. Las bombas se habían construido, desde luego, a través de un esfuerzo combinado entre científicos e ingenieros norteamericanos, británicos y canadienses; pero el *Manhattan Engineering District* (Distrito de Ingeniería de Manhattan) -nombre en código dado al proyecto de desarrollo de la bomba- tenía sus más importantes instalaciones en Estados Unidos. Hacia mediados del verano de 1945 los americanos se habían apoderado, virtualmente, del proyecto, incluyendo su dirección y, lo que es más importante, la información que había generado. Solamente, unos días después de la bomba de Nagasaki se presentó un proyecto de ley al Congreso cuya pretensión final, era como la Ley McMahon de 1946, convertir en ilegal desde ese momento para los americanos el facilitar a sus aliados de antaño cualquier nuevo acceso a la información sobre energía nuclear. Las discusiones de alto nivel, incluyendo las mantenidas entre los tres jefes de gobierno, resultaban contradictorias en el contenido y sin ningún resultado concluyente. Finalmente, los tres socios; de la época de guerra se embarcaron en programas separados. Las fugaces esperanzas de un control internacional efectivo de la energía nuclear habían nacido muertas. Por otro lado, con las pruebas militares norteamericanas en las islas Bikini, en el Pacífico, comenzó la carrera de armas nucleares. Siempre ha parecido, desde entonces, que era una carrera que nadie podría ganar.

La Ley McMahon - Ley de Energía Nuclear de 1946, si hemos de darle su verdadero nombre - no fue considerada como un paso particularmente desafortunado ni siquiera por los científicos británicos y canadienses (y, mucho menos, por sus colegas norteamericanos). Los científicos, hay que reconocerlo, se dieron cuenta demasiado tarde de las consecuencias contradictorias de la ley. Por el contrario, fue saludada como una victoria de la razón, en lo que al desplazamiento de cualquier pretensión militar sobre el desarrollo nuclear se refería. Efectivamente, la Ley McMahon estableció dos órganos civiles para ejercer esta responsabilidad y este control: la *US Atomic Energy Commission* (Comisión de Energía Atómica norteamericana, AEC), y el *Congressional Joint Committee on Atomic Energy* (Comité Conjunto del Congreso para la Energía Atómica, JCAE). La Ley dio a la AEC completo control para establecer y dirigir el desarrollo y la investigación nucleares en la posguerra, en el terreno militar y en el civil. La JCAE iba a ser el perro vigilante de la AEC, el canal a través del cual los representantes elegidos por el pueblo dirigirían y vigilarían las actividades norteamericanas en el campo nuclear.

La Ley McMahon introdujo un orden inmediato en la situación nuclear posterior a Nagasaki, al menos dentro de los Estados Unidos. El 1 de enero de 1947 comenzó su existencia formal la AEC. Se benefició de una saludable tajada del presupuesto federal, y se hizo cargo de las instalaciones construidas para el Proyecto Manhattan; desde ese momento en adelante, el esfuerzo nuclear norteamericano asumió una nueva dimensión.

La finalidad fundamental de la AEC fue, por supuesto, el desarrollo de armas nucleares más potentes y eficientes, y la provisión de la infraestructura necesaria para construirlas masivamente. Sin ninguna duda, la polémica más feroz de los primeros años de la AEC se centró en proseguir o no el desarrollo de un nuevo tipo de arma nuclear, durante mucho tiempo mencionada simplemente como la "Super". Existe un límite para la cantidad de material fisible que puede, todo él, adherirse eficientemente en una configuración crítica instantánea. Como consecuencia, hay un límite para la liberación de energía posible en una bomba pura de fisión. Ya que esta liberación de energía es equivalente a la de varios cientos de miles de toneladas de TNT -varios centenares de "kilotones"- puede considerarse suficiente para la mayoría de los objetivos; pero los diseñadores soviéticos y americanos de armamentos pensaban de otra forma. O, al menos, algunos de ellos. Robert Oppenheimer, el brillante director del Laboratorio de Los Alamos durante la guerra, pensó que la "Super" era desaconsejable, y no se privó de dar su opinión; en su momento, esto se convirtió en la base de uno de los episodios más degradantes de la historia científica de Norteamérica, el "juicio"

de Oppenheimer en abril de 1954, que le privó permanentemente del acceso a la información nuclear que él, antes que nadie, había contribuido a desarrollar.

El caso Oppenheimer subrayó una actitud de la AEC que iba a perdurar mucho después de que las actividades de la AEC se diversificaran en aplicaciones civiles de la energía nuclear. Uno de los poderes extraordinarios concedidos por la Ley McMahon permitía a la AEC recurrir a los servicios de ramas del Ejecutivo tales como el FBI y la CIA. La AEC gastó millones cada año en exhaustivas prohibiciones a los empleados, aparentemente por razones de “seguridad nacional”; y el control de la AEC sobre el acceso a la información estableció una pauta que fue después difícil de romper, incluso en cuestiones a todas luces no militares.

El principio de la Super fue acertado. Si una bomba de fisión se rodea de un material que contiene núcleos de hidrógeno pesado - deuterio o, mejor todavía, tritio (hidrógeno-3 con un protón y dos neutrones en su núcleo) - el rabioso calor de la explosión de fisión despide los núcleos ligeros a fin de que colisionen y se adhieran juntos, como núcleos de helio. Cada “fusión” de dos núcleos de hidrógeno en un núcleo de helio libera un chorro de neutrones y energía nuclear adicional: una vez más, la masa se convierte en energía.

Ya que no hay límite superior inmediato en la cantidad de material “fusible” que puede ser disparado, la energía liberada de una fisión - bomba de fusión o “termonuclear”, más comúnmente llamada bomba de hidrógeno - es efectivamente ilimitada. También son posibles perfeccionamientos adicionales, si es que pueden llamarse así. La reacción de fusión, como la de fisión, libera neutrones rápidos libres. Como consecuencia, puede hacerse una bomba de cubierta triple: una bomba de fisión rodeada de hidrógeno fusible rodeado de agua ordinaria (mucho más barata que el hidrógeno pesado y sin limitaciones desde el punto de vista de la criticidad). La capa más exterior de uranio intercepta la barrera de neutrones procedentes de su interior y produce la fisión, añadiendo todavía más energía al resultado (y, de paso, añadiendo una contribución adicional enorme de productos de fisión, muchos más de los que proceden de la pequeña fisión de “disparo”).

Durante los últimos años 40 y en los primeros 50 dominó la polémica nuclear un tema primordial: la aceleración de la carrera de armas entre, los Estados Unidos y la Unión Soviética, y la continuación de la bomba de fusión. El espionaje, el contraespionaje y el clima de la Guerra Fría hicieron del secreto nuclear y de los secretos nucleares una fuente de paranoia colectiva. Fuese el que fuese el efecto de la Ley McMahon dentro de los Estados Unidos, los socios de antaño la consideraron como un acto, de traición. La furia y el resentimiento que engendró todavía perdura en los más altos niveles de las comunidades nucleares británicas y canadienses. Incluso el anuncio oficial norteamericano de la bomba de Hiroshima fue considerado en Gran Bretaña como decepcionante para el prestigio (si es que lo era) de los Estados Unidos; el 6 de agosto de 1945 el Primer Ministro británico emitió un duro comunicado señalando el papel clave jugado por los colaboradores británicos y canadienses en el Proyecto Manhattan. Pese a todo, una vez que el agravio inicial fue finalmente eliminado, los gobiernos británico y canadiense reaccionaron muy diferentemente. Los canadienses decidieron que Canadá ni quería ni podía construir armas atómicas. Los científicos británicos que se habían unido al Laboratorio de Montreal del proyecto de tiempos de la guerra fueron llamados a Gran Bretaña; realmente, los canadienses sintieron algo parecido a, como si, habiendo construido instalaciones importantes, hubieran sido abandonados con un caro e inútil fardo. Volveremos dentro de poco a tratar la participación canadiense.

En Gran Bretaña, la Ley McMahon dolió profundamente, y no se dudó nunca, en realidad, de que debía inmediatamente embarcarse en su propio programa de armas nucleares. El pueblo británico -y en él incluimos a casi todo el Parlamento - no supo, hay que decirlo, prácticamente nada de esto.

Solamente una referencia de pasada, el 12 de mayo de 1948, en una contestación del Ministro de Defensa en la Cámara de los Comunes, dio alguna indicación sobre la actividad febril que ya se había iniciado: “La investigación y el desarrollo continúan recibiendo la máxima prioridad en el campo de la defensa, y se están desarrollando todos los tipos de armamento, incluyendo el atómico”. Esto fue todo; el Ministro no se extendería, ya que no iba en “interés del público” hacerlo así. La organización que recibió la misión de desarrollar las armas nucleares fue la *Division of Atomic Production* (División de Producción de Energía Atómica), del Ministerio de Suministros, que con el tiempo se convertiría en la *United Kingdom Atomic Energy Authority* (Junta de Energía Atómica del Reino Unido).

En solamente dos años y medio la División de Producción había acabado la planta de uranio y de fabricación de combustible de Springfields, el primer reactor de Windscale con combustible de Springfields alcanzó criticidad en julio de 1950. En este momento, todavía no había comenzado la construcción de la planta de reprocesado; el primer combustible irradiado entró en la planta de reprocesado a finales de febrero de 1952. El 3 de octubre de 1952 la primera bomba británica vaporizó la fragata Plym en aguas de las Islas de Monte Bello, justamente frente a la costa noroeste de Australia.

Junto a Gran Bretaña, los Estados Unidos y Canadá, varias naciones tenían un pie puesto en el tema nuclear. Alemania, Polonia, Hungría y otros países de Europa Oriental eran el origen de muchos de los científicos que pusieron a disposición de Gran Bretaña y los Estados Unidos su capacidad después de la llegada de los nazis (y, por supuesto, de muchos que no lo hicieron). En las conversaciones, durante la guerra, que condujeron al Proyecto Manhattan participaron científicos franceses. Noruega poseía la planta de producción de agua pesada de Vermok, hasta que los partisanos la volaron en 1943. La Unión Soviética ya ponía todos sus anhelos en temas nucleares bastante antes de la Segunda Guerra Mundial.

De estas naciones, la primera en embarcarse en un programa nuclear de investigación y desarrollo fue la Unión Soviética. Como cualquier otra nación, entonces y ahora, la Unión Soviética consideró los temas nucleares como materia gubernamental, para no ponerse en manos de la industria o la Universidad. En 1943, incluso, cuando el ejército invasor alemán estaba muy adentro de las fronteras soviéticas, el Gobierno soviético construyó un instituto de investigación de armas nucleares en Moscú, dirigido por Igor Kurchatov y que después llevaría su nombre. El programa nuclear soviético fue tan intenso como el norteamericano, conduciendo a una explosión nuclear de fisión en agosto de 1949 y a una bomba termonuclear en el mismo mes, cuatro años después.

En 1950, cuando el Presidente Truman dio el visto bueno para el desarrollo norteamericano de la Super, otra enorme instalación de la AEC quedó consolidada: el complejo del río Savannah, en Carolina del Sur, con más reactores productores de plutonio (esta vez moderados por agua pesada), una planta de reprocesado totalmente provista, almacenamiento de residuos y todo el conjunto. Pero la Super permaneció evasiva. Se atribuye comúnmente a los norteamericanos el haber realizado la primera explosión termonuclear en Eniwetok, en las Islas Marshall, el 1 de noviembre de 1952; pero no fue una bomba H en su sentido verdadero. Fue una explosión de una instalación experimental a gran escala, aproximadamente sesenta toneladas de equipos delicados; no hubiera podido ser lanzada sobre un objetivo del tipo de una fábrica completa. La explosión termonuclear soviética del 12 de agosto de 1953 fue una verdadera bomba H, transportable y arrojable. Cuando el 8 de diciembre de 1953, el Presidente Eisenhower dirigió una importante alocución a las Naciones Unidas proponiendo un programa de “Átomos para la Paz”, por lo menos una parte no desdeñable de la AEC tenía en su mente otros pensamientos. El 1 de marzo de 1954 los Estados Unidos hicieron estallar su primera bomba H, llamada “Castillo Bravo”. Esperaban una explosión

equivalente a 7 millones de toneladas -megatonnes- de TNT. Consiguieron una equivalente a 15 megatonnes.

La alocución presidencial no presagiaba todavía, de ningún modo, una transformación consecuente en la escena nuclear norteamericana. En 1954 una nueva Ley de Energía Atómica hizo posible para contratistas privados el construir reactores y poseer material fisible con permiso de la AEC, y desbloqueó una amplia gama de información utilizable. No obstante, las perspectivas a corto plazo para la generación de energía eléctrica de origen nuclear no parecieron muy tentadoras para la industria norteamericana. La tecnología era ciertamente prometedora y las estimaciones insistentes de que los costes probables de generación habrían resultado persuasivos, de no haber sido por los bajos costes del petróleo, que prevalecían, y de lo que era incluso más competitivo, la permanente abundancia del gas natural y del carbón propios.

Muy pocos dudaban de que podían construirse reactores de potencia de diversos modelos, y de que podían realmente generar electricidad a un coste que era razonable. Pero únicamente los más apasionados anticipaban que los reactores de potencia pudieran competir económicamente en los Estados Unidos con las centrales generadoras de combustible fósil antes de los años 60. Por otra parte, estaba claro que si esta nueva tecnología iba a implantarse por sí misma no podía esperarse que fuera económicamente viable desde su nacimiento. Como consecuencia, la AEC empezó a diseñar planes para un Proyecto Cooperativo de Desarrollo de un Reactor de Potencia, y la industria norteamericana empezó a mostrar señales crecientes de interés.

La superioridad norteamericana en experiencia nuclear y en recursos produjo cierta confusión en las opciones cuando se llegó a las aplicaciones civiles; pero esta misma riqueza de recursos también hizo que no resultase propicio el ambiente económico. La situación británica era precisamente la inversa. Sus difíciles circunstancias la obligaban a centrar sus esfuerzos en una gama reducida de tecnologías. Pero el contexto de la economía europea de la postguerra, con suministros limitados de otros combustibles, asequibles a precios moderadamente rígidos, hizo que la producción de energía por medios nucleares resultase apetecible. A finales de los 40, el Centro Británico de Investigación sobre Energía Atómica, en Harwell, fue acometiendo con decisión los problemas de diseño planteados por los reactores de potencia.

En agosto de 1952, los jefes militares de Estado Mayor lanzaron una llamada para que se incrementara sustancialmente la producción de plutonio militar. Un reactor de potencia produciendo plutonio como subproducto habría de considerarse, por el momento, como un reactor de plutonio produciendo energía como subproducto. Ya se habían acometido los diseños para un reactor con esa doble finalidad, llamado "Pippa" (Pila Presurizada Productora de Energía y Plutonio). Pasando por alto la prelación en las dos últimas letras, "Pippa" recibió la autorización para su construcción en marzo de 1953. Hoy la conocemos como el primer reactor de Calder Hall. En algunos aspectos, su diseño fue elección de Hobson: no podían garantizarse, para otros diseños más deseables, ni el suficiente uranio enriquecido, ni la suficiente agua pesada, por lo que el reactor rápido no alcanzó la categoría de reactor de energía para objetivos a corto plazo. Ya existía, sin embargo, un largo y concienzudo estudio sobre las características económicas de un reactor de energía de uranio natural: había sido preparado por R. V. Moore, de Harwell, al principio del otoño de 1950, comparando las características de una central nuclear de 90 MWe con una central similar de carbón (ver págs. 223-6). El informe identificó las bases esenciales de la comparación económica que se iban a convertir en permanentes: el carbón implica bajos costes de capital y altos costes de funcionamiento, mientras que la energía nuclear implica altos costes de capital y bajos costes de funcionamiento. El análisis de Moore, que señaló el punto de intersección en el que la electricidad nuclear procedente del uranio natural resulta más barata por unidad que la del carbón, estaba muy

bien enfocado, en el entorno de los criterios nucleares.

Ya en los 70, algunos de los supuestos de Moore resultan ingratos de recordar por ejemplo, aquello de un tipo de interés del 4 por 100. Pero la esencia de su argumentación ha permanecido singularmente vigente. Desde que los precios internacionales del petróleo iniciaron su alza espectacular, los atractivos de la generación de energía eléctrica nuclear se han reforzado notablemente. El punto en el que resulta más barata, teniendo en cuenta tanto los costes de capital como los de funcionamiento, para generar una unidad de electricidad procedente del uranio, con respecto a la procedente del petróleo, se ha desplazado visiblemente, a favor del uranio. Las consideraciones medioambientales y de mano de obra en la industria del carbón han producido un desplazamiento semejante en el equilibrio entre uranio y carbón. Por supuesto que el tema de los costes no es la única cuestión nuclear. Pero ni siquiera se han resuelto tan fácilmente los interrogantes sobre estos mismos costes, como veremos en el Capítulo 8.

5. Mas allá de lo imaginable

Mientras tanto, las pruebas militares continuaron, y sentaron las bases para la primera manifestación pública importante sobre la política nuclear. El tema se centró en los residuos radiactivos procedentes de las explosiones nucleares: la “lluvia radiactiva”. Después de las pruebas norteamericanas, en 1946 y 1948, en el Pacífico, la AEC estableció una localización más conveniente en Mercury Nevada. El *Nevada Test Site* (Polígono de Pruebas de Nevada), se previó inicialmente para bombas más pequeñas, pero el criterio del tamaño disminuyó gradualmente de importancia y en este lugar se llevó a cabo una creciente proporción de pruebas norteamericanas, hasta que la *Partial Test Ban* (Prohibición Parcial de Pruebas Nucleares), de 1963, las trajo a territorio nacional definitivamente. Ya en 1951 las explosiones en el Polígono de Pruebas de Nevada ocasionaron problemas. Los residuos radiactivos depositados en el Medio Oeste de los Estados Unidos contaminaron la paja empleada para embalar películas fotográficas. y Eastman Kodak montó en cólera al ver destruidas sus películas. La AEC aceptó informar a Kodak de los tipos de lluvia radiactiva que podían afectar el embalaje de películas. La AEC demostró estar menos atenta a la posibilidad de que la lluvia pudiera también afectar a otros elementos del entorno, como los seres humanos.

Yucca Flats fue el lugar destinado para la serie “Conclusión-Ojo de Nudos” de doce pruebas nucleares, en 1953, algunas de las cuales tuvieron lugar con soldados y observadores situados dentro de los tres kilómetros alrededor de la explosión. El 25 de abril de 1953, una prueba de 43 kilotonnes, en Yucca Flats, de código “Simon”, se ganó su propio distintivo. “Simon” fue una prueba atmosférica que hizo explosión a menos de 100 metros por encima del desierto. Su nube radiactiva surgió a una altura de más de diez kilómetros; la porción superior empezó a dirigirse hacia el noroeste. El 27 de abril, a unos 200 kilómetros al norte de la ciudad de Nueva York, la nube radiactiva se encontró con un violento tornado. Aquella mañana, el profesor Herbert Clark, del Instituto Politécnico Rensselaer, estaba preparándose para llevar a cabo algunos experimentos con sus alumnos de Radioquímica. Para su sorpresa, se encontraron con que todos sus contadores Geiger daban lecturas mucho más altas de lo normal. Las lecturas en el exterior demostraron ser todavía más altas especialmente cerca del agua de lluvia. El profesor Clark llamó a un colega del Laboratorio de Sanidad y Seguridad de la AEC en Nueva York, y se puso en marcha una vigilancia atenta. El público supo, como consecuencia, que la “lluvia” había depositado de 35 a 70 curios de radiactividad por kilómetro cuadrado en torno a Troya y Albany. El informe detallado de la AEC y sus alumnos pudieron comprobar emisiones similares de radiactividad en el agua de los depósitos que abastecían Troya y Albany, después de un cierto número de pruebas posteriores de la serie “Conclusión Ojo de Nudo”. La experiencia de Troya aportó los primeros datos para una acumulación incipiente de información sobre la exposición pública a la radiación nuclear de bajos niveles.

Mientras tanto, los ciudadanos de St. George (Utah), Las Vegas (Nevada) y otros centros mucho más próximos al Polígono de Nevada que el estado de Nueva York, empezaban a considerar las pruebas atómicas inconfortablemente próximas, al tiempo que, una tras otra, dejaban caer radiactividad sobre ellos. La AEC no se inmutaba. En su decimotercer informe semestral, en 1953, señalaba que “la lluvia radiactiva está muy por debajo del nivel que podría ser causa de un incremento observable de mutaciones o variaciones hereditarias”; y que el único peligro posible para las personas, procedente de animales alimentados con pasto contaminado con estroncio-90, podría surgir de “la ingestión de astillas de hueso que pudieran entremezclarse con el tejido muscular durante el sacrificio y el corte de la carne”.

En cualquier caso, la población de Troya y St George fue afortunada, en comparación con los 236

habitantes de Rongelaap, Rongerip y Uterik, en las Islas Marshall, y con los 23 miembros de la tripulación japonesa de un pesquero llamado *Fukuryu Maru*. Como ya hemos dicho, los Estados Unidos de América hicieron explotar su primera bomba de hidrógeno, de código “Castillo Bravo”, el 1 de marzo de 1954, en el atolón de Bikini. Se esperaba que su rendimiento fuese de unos siete megatones; demostró ser más del doble. Un destructor norteamericano se encontró en el mismo paso del polvo radiactivo; su tripulación respondió poniendo en práctica medidas contra la radiación, asegurando las escotillas, situando todas las pertenencias debajo de la cubierta y esperando que las mangueras fijas hubieran limpiado la contaminación de las superficies exteriores del barco. Pero nadie había dicho a los isleños o a los pescadores japoneses nada acerca de las precauciones contra la radiación.

Uterik, Rongerik y Rongelaap están a unos 160 kilómetros al este de Bikini. Pero el viento, en una dirección que no había sido prevista por los responsables de las pruebas militares, llevó las escorias de la bomba directamente hacia las otras islas. El 11 de marzo, la AEC hizo pública una nota de prensa:

“En el transcurso de una prueba atómica rutinaria en las Islas Marshall fueron trasladados 28 norteamericanos y 236 residentes desde los atolones próximos a la isla Kwajalein, de acuerdo con lo previsto en las medidas de precaución. Estos individuos fueron inesperadamente expuestos a cierta radiactividad. No hubo quemaduras. Todos fueron encontrados en buen estado. Después de que se realicen las pruebas atómicas, los nativos serán reintegrados a sus hogares.”

Roger Rapoport, un incisivo periodista norteamericano, había observado que las evacuaciones correspondían realmente a un “plan”, pero que el plan no se había establecido hasta después de que ocurriera el accidente:

“Las víctimas presentaban quemaduras beta, depilaciones salteadas de la cabeza, cambios de pigmentos y cicatrizaciones. Y muchos de los nativos no se encontraban nada bien. Sufrían anorexia (pérdida del apetito), náuseas, vómitos y depresión temporal de los componentes de su sangre. A lo largo de los dieciséis años siguientes, veintiuno de los nativos de la isla Rongelaap sufrirían anomalías en tiroides, y en dieciocho de ellos aparecían tiroidectemias. Con la excepción de dos, los diecinueve niños que tenían menos de diez años cuando sucedió el accidente experimentaron anomalías en el tiroides; y dos de ellos dejaron de crecer para siempre.”

Durante los tres años siguientes al “Castillo Bravo”, Rongelaap permaneció demasiado radiactiva para que los nativos pudieran regresar. En 1972, uno de los isleños alcanzados por la lluvia del “Bravo” murió de leucemia, a los 19 años.

La intervención del servicio de helicópteros de la Marina norteamericana en Kwajalein cubrió dos finalidades en cuanto a los maltratados isleños de las Marshall se refiere. Les procuró mucha de la atención médica necesitada; también aseguró que esta atención no fuera acompañada de cualquier otra más potencialmente embarazosa para los experimentadores atómicos. La Marina norteamericana no sabía, sin embargo, que su avión de patrulla había divisado el barco pesquero japonés *Fukuryu Maru*. El *Fukuryu Maru* navegaba en busca de atunes al este de Bikini el 1 de marzo, fuera del perímetro de la zona marcada para la prueba, cuando, de repente, pareció a los pescadores como si el sol estuviera saliendo por el oeste. Durante algunas horas el barco fue alcanzado por cenizas blancas, que se esparcieron dentro de la cubierta y sobre los cabellos y ropas de la tripulación. Por la tarde, dos miembros de la tripulación estaban vomitando y eran presa de mareos. El 3 de marzo todavía sufrían síntomas similares con dolores en los ojos y picores en la piel. Estaba claro que algo no iba bien. El barco pesquero se dio la vuelta y se dirigió a casa, a su

puerto de Yaizu. Llegó quince días después, con toda la tripulación sufriendo dolencias de la radiación y el barco todavía contaminado con radiactividad. Seis meses después, algunos miembros de la tripulación estaban todavía en el hospital. El 2 de septiembre de 1954 el operador de radio, Aiticki Kuboyama, murió.

La odisea del *Fukuryu Maru* produjo grandes titulares en la prensa de todo el mundo. Lo curioso de su nombre traducido significa Dragón Feliz dio un sesgo irónico a esta triste historia. Los japoneses habían sido las primeras víctimas de la bomba atómica; ahora podía decirse que un japonés era el primero en morir a causa de una bomba de hidrógeno. El traumatizante golpe del incidente del *Fukuryu Maru* reforzó la profunda repulsión psicológica con que los japoneses miraban la energía nuclear. Tres décadas después de las bombas de Hiroshima y Nagasaki, y dos décadas después del *Fukuryu Maru*, la desconfianza japonesa ante la energía nuclear permanece tan profundamente asentada como siempre¹¹.

El retorno radiactivo del *Fukuryu Maru* alertó al mundo, con un impacto tremendo, ante el fenómeno de la “lluvia radiactiva”. Un mes después, en abril de 1954, la India pidió una detención de las pruebas de armas nucleares; obtuvo muy poca respuesta.

El incidente del *Fukuryu Maru* fue seguido por la Ley de Energía Atómica de 1954, que sacó del secreto algunos aunque no todos datos sobre pruebas de armas nucleares. Los científicos que examinaron los datos ahora disponibles y los compararon con los comentarios de la AEC de 1953 sobre los posibles peligros de la lluvia radiactiva, encontraron alarmantes discrepancias. Uno de los primeros y más efectivos críticos de las condiciones de la AEC era el físico nuclear Ralph Lapp. En una incisiva serie de artículos en el *Bulletin of the Atomic Scientists*, comenzando en noviembre de 1954, señaló algunas verdades evidentes ante las que la AEC se mostraba reticente. La AEC había asumido, erróneamente, que la lluvia se depositaría más o menos uniformemente sobre toda la tierra. Por el contrario, es expulsada para ser confinada principalmente en el hemisferio de origen, en las latitudes medias (es decir, las más pobladas áreas del mundo). Además, una gran parte de ella cae en el plazo de meses, en lugar de permanecer arriba sin peligrosidad, durante años, mientras que los isótopos; de vida media corta decaen. En cualquier caso, se dedujo rigurosamente que el problema no se debía tanto a cierta dosis alta de promedio, debido a la lluvia, sino a las dosis máximas reales debido a concentraciones locales, como las que aparecieron después de la lluvia de 1953 sobre Troya. (La importancia de la lluvia de Troya no fue identificada, de hecho, hasta que Lapp llamó la atención sobre ella en un artículo en *Science*, en 1962.)

En 1955, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó una resolución estableciendo un

11

En este momento no podemos sino hacer constar la sorprendente insensibilidad, en contra de la opinión de Patterson, de la opinión pública japonesa en relación a la energía nuclear “civil”: el programa nuclear japonés corre pareja, en intensidad, con el soviético y el francés, siendo todas las informaciones que nos llegan, en este sentido, de lo más desconcertante.

comité científico para investigar sobre los efectos de las radiaciones y de las pruebas atómicas, el *UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas, UNSCEAR). Pero las trampas entre las potencias atómicas continuaron sin disminuir, al igual que las pruebas y la lluvia radiactiva y los esfuerzos de los científicos y el público por llevar cierta sensatez a este comportamiento. Bertrand Russell elaboró una llamada, confirmada por Albert Einstein dos días antes de su muerte, que fue conocida como el Manifiesto Russell-Einstein. Llamada a los científicos de todas las naciones a unirse para encontrar una salida a la encerrona en qua habían metido a la humanidad los descubrimientos nucleares. El profesor Joseph Rotblat, que había abandonado Los Alamos cuando resultó evidente que la Alemania nazi no podría construir armas atómicas, se encargó de la organización de una conferencia científica no oficial. Un norteamericano millonario se prestó a cubrir los gastos de la primera convocatoria, en su lugar de nacimiento, en Pugwash, Nueva Escocia. El movimiento Pugwash creció a partir de esta primera reunión hasta llegar a ser una de las vías internacionales más efectivas e influyentes de contacto entre científicos de primera magnitud de los Estados Unidos, la Unión Soviética y otros países; su objetivo central era y sigue siendo encontrar formas de controlar los avances nucleares, reducir las amenazas sin igual que encierran.

Hacia 1956, la AEC estaba a punto de admitir que para la gente resultaba más fácil beber leche que consumir astillas de hueso. En su primer pronunciamiento habla contemplado, de alguna manera, el hecho de que si un animal por ejemplo, una vaca come hierba regada con estroncio⁹⁰, químicamente similar al calcio, no solamente sus huesos contendrán el radioisótopo, sino también su leche. Muy a destiempo, la AEC reconoció que la leche era, con mucho, la más significativa fuente de estroncio⁹⁰ en la dieta humana. En 1956, Norman Cousins, editor del influyente *Saturday Review*, fundó, con varios colegas, el National Committee for a Sane Nuclear Policy (Comité Nacional por una Política Nuclear Razonable), normalmente llamado SANE. Adlai Stevenson, candidato presidencial por el Partido Demócrata, se pronunció por un cese en las pruebas nucleares; su oponente a la Vicepresidencia, Richard Nixon, denunció la pretensión de Stevenson como “catastrófica insensatez”. El ganador del Premio Nobel de Química, Linus Pauling, elaboró una petición firmada eventualmente por 11.021 científicos de cuarenta y ocho países pidiendo una pausa en las pruebas nucleares.

En 1957, el *AEC Biological and Medical Advisory Committee* (Comité Consultivo Biológico y Médico, de la AEC) concluyó, de forma contraria a las primeras opiniones de la AEC, que la lluvia radiactiva procedente de las pruebas nucleares durante 1956, lejos de estar desprovista de repercusiones genéticas, resultaba ya suficiente como para producir ente 2.500 y 13.000 deformaciones genéticas importantes por año en el total de la población. Mientras tanto, los científicos no pertenecientes a la AEC, estaban descubriendo radioisótopos problemáticos que la AEC no había tomado en serio o había ignorado completamente, como el carbono¹⁴, señalado por Pauling, y el yodo¹³¹, señalado por el genético de California, E. B. Lewis. Como resultaba evidente, los estudios de la AEC sobre la lluvia radiactiva despreciaban completamente el yodo¹³¹ debido a su corto, período de semidesintegración de ocho días, despreciando el hecho de que, como Lewis observaba, el yodo¹³¹ podía concentrarse, como todos los isótopos del yodo, en el tiroides humano, y podía, además, resultar dañino especialmente para los niños en proporción mucho mayor que la correspondiente a su concentración en el medio exterior. La inconsistencia de los pronunciamientos oficiales estaba empezando a ser demasiado llamativa como para aceptarse; desde mayo a julio de 1957 el JCAE desarrolló una encuesta sobre “La Naturaleza de la Lluvia Radiactiva y sus Efectos en el Hombre”. No obstante, los testimonios de la AEC insistían en que las pruebas eran seguras, y el Comité aceptó las protestas de la AEC, a despecho de algunas sorprendentes contradicciones en las audiencias, que hubieran sugerido que la AEC estaba tergiversando intencionadamente lo que sabía muy bien.

En 1957, principalmente como resultado de la presión pública y de la comunidad científica de fuera de los Estados Unidos, el Servicio de Sanidad Pública norteamericano estableció un sistema monitor de lluvia radiactiva que pronto se extendió a una ancha gama, tomando muestras frecuentes; en poco tiempo, estos monitores de lluvia radiactiva habían identificado el estroncio-89 y 90, el yodo-131 y otros radioisótopos peligrosos en cantidades suficientemente grandes como para no sentirse tranquilos. El clásico estudio de Ralph Lapp, *El Viaje del Dragón Feliz* demostró que la AEC se mostraba todo menos escrupulosa en sus responsabilidades sobre la salud pública; y la intranquilidad aumentó. Lo mismo hicieron, inexorablemente, los programas de explosiones. Por miedo a que estos temas se convirtieran en exclusivamente domésticos para los americanos, los británicos se lanzaron con su primera explosión atómica de hidrógeno en la Isla Christmas, el 15 de mayo de 1957.

La bomba de hidrógeno británica de mayo de 1957 pareció espolear a los Estados Unidos y a la Unión Soviética para redoblar esfuerzos. En los Estados Unidos, desde luego, los norteamericanos habían estado sometidos a su propia lluvia radiactiva desde el comienzo de las pruebas en el emplazamiento de Nevada, en 1951¹²; el incendio de Windscale que permitió que la radiactividad se escapara, cruzara el Canal y se extendiera por algunas partes de Europa del Norte, dio a los europeos su primera oportunidad para encontrarse con una lluvia radiactiva autóctona, en cierta manera, aunque fuese un encuentro relativamente decoroso. Ni los norteamericanos ni los europeos se sentían precisamente felices con esta situación; y al principio de 1958 tuvo lugar el nacimiento de dos organizaciones que iban a jugar papeles distintos en la política nuclear de los años siguientes. Como contraste con la similitud de sus iniciales CND en Gran Bretaña, y CNI en los Estados Unidos sus posturas eran notablemente diferentes, y ofrecían una oportunidad de contrastar dos categorías características de la respuesta pública a los temas nucleares.

La CND, *Campaign for Nuclear Disarmament*, (Campaña para el Desarme Nuclear), se desarrolló a partir de un movimiento fundado en el norte de Londres, a mediados de los 50 y a través de un influyente artículo en el *New Stateman*, de J B Priestley, hasta la celebración de un mitin en el Central Hall de Westminster, en febrero de 1958, que reunió 2.000 personas, en el que este movimiento se convirtió en el CND. Entre bastidores, un grupo más orientado a la acción, centrado en *Peace News*, preparó un plan para una marcha desde Londres hasta el Centro de Investigaciones Atómicas Militares en Aldermaston, a celebrar en el fin de semana de Pascua. La respuesta al plan dejó atónitos a los organizadores: cinco mil personas reunidas en Trafalgar Square el Viernes Santo, para salir hacia Aldermaston. Bajo la dirección de la CND, soportando un pésimo tiempo, caminaron durante cuatro días; sus efectivos llegaron a 10.000 en el momento culminante, junto a la alameda de púas del Centro de Aldermaston. El slogan de la marcha de Aldermaston era ((Prohibición de la Bomba)). El símbolo de la CND, las señales de semáforo con los tres brazos de la DN desarme nuclear colocados en las cuatro, ocho y doce horas de una esfera de reloj dentro de un círculo, iba a convertirse, con el tiempo, en un signo universal de paz, que aparecería después en los cascos de los soldados en Vietnam y otros lugares igual de incongruentes.

Sería apostar con ventaja decir que poca gente que ahora ostenta el símbolo conoce su origen, o realmente considera el deseo del “desarme nuclear” como otros de interés histórico. Pero en el apogeo de la CND la llamada era clara y nada ambigua: Gran Bretaña tenía una bomba de

12

En marzo de 1980 un comité especial de la Cosa Blanca estimó que los ensayos nucleares atmosféricos de Nevada, realizados entre 1951 y 1960, ocasionaron diversas muertes entre la población de Nevada, Arizona y Utah, por las que un cierto número de ciudadanos de estos estados exigen 2.000 millones de dólares como indemnización

hidrógeno, había demostrado su capacidad para construirla y hacerla explotar; Gran Bretaña todavía poseía categoría internacional entre las otras naciones líderes; Gran Bretaña debía tener el dramático gesto moral de renunciar al uso de armas nucleares, unilateralmente si era necesario. El debate que estalló fue intenso y polémico por ambos lados. En la conferencia del Partido Laborista, en 1960, la influencia de la CND consiguió una moción aprobando el desarme nuclear unilateral. Pero no sucedió nada de eso. El movimiento empezó a extenderse, ampliándose su foco a una protesta más y más generalizada. La marcha de Aldermaston se institucionalizó y, gradualmente, se superó, tanto en número como en interés. En los años 70 la CND sobrevive, pero a un ritmo reducido; la amenaza que la había empujado a la existencia también se ha, aparentemente, institucionalizado, sin pasar de ser un objetivo aceptable para la disconformidad social.

La CND fue política desde su aparición, y poco después resultó un movimiento político explícitamente partidista. Su desafío se planteaba a nivel político, en los conceptos abstractos de lo acertado y lo erróneo: una organización cuyo compromiso era, ante todo y sobre todo, ético. No se preocupaba mucho de las circunstancias científicas o técnicas que subyacían a la política que debatía; resulta improbable que las consideraciones científicas o técnicas hubieran ejercido algo más que una influencia moderada. No era necesario saber cuantas bombas de hidrógeno podían acabar con la humanidad; bastaba con saber que aquello era una suficiente base para la acción.

Pero en San Luis, en los Estados Unidos, un grupo de científicos estaban considerando la situación nuclear desde un ángulo muy diferente. Para estos científicos estaba claro que el público, en general, estaba confundido y asustado por expresiones como “lluvia radiactiva” y “estroncio-90”, y que las respuestas oficiales eran inadecuadas, si no claramente deshonestas. En abril de 1958, los científicos, establecidos en la Universidad de Washington, en San Luis, se unieron en un *Committee for Nuclear Information* (Comité para la Información Nuclear, CNI), y ofrecieron sus servicios al público para responder a preguntas, dar charlas y abordar problemas no resueltos, que la ciencia oficial parecía estar escondiendo. La CNI declinó explícitamente opinar sobre si la política nuclear oficial como tal, era o no correcta. Los informes pretendían únicamente clarificar y explicar los aspectos específicamente técnicos y científicos médicos, físicos, químicos, biológicos para que el público pudiera formarse su propia opinión con un conocimiento más claro del tema. Esto no resultó, de hecho, tan objetivo como se pretendía. Lógicamente, los comentarios del CNI insistían en el lado oculto del acontecimiento, la mitad del cual había sido dado a conocer por fuentes oficiales; y la actitud del CNI fue, precisamente, plantear ante el público un enfoque distinto, al elegido por los medios oficiales.

En 1957, San Luis había llegado a ser una de las seis ciudades norteamericanas cuya leche era muestreada por el Servicio de Salud pública, para analizar el estroncio-90. El caudal contradictorio de datos descarnados y de interpretaciones conflictivas dejaron a los ciudadanos alarmados y confusos. Cuando el CNI ofreció información sincera sobre lo que se conocía y lo que no de la lluvia radiactiva, la ciudad dio su bienvenida al ofrecimiento. Mientras crecía la reputación del CNI, sus miembros llegaban cada vez más lejos. Los datos del CNI sobre el yodo-131 alrededor del polígono de pruebas de Nevada apuntaron que los niños podían haber recibido muchos cientos de veces la exposición máxima recomendada para la radiación, como resultado de las explosiones de 1953 y de después; cuando el CNI presentó esta información al JCAE, la AEC lo rechazó totalmente, incluso pese a que un informe elaborado, precisamente, por un miembro de la dirección de la propia AEC, el Dr Knapp, coincidiera con el testimonio del CNI. Tendremos que decir algo más sobre el informe de Knapp, después. En 1958, un bioquímico americano, Herman Kalckar, publicó en *Nature* un artículo señalando que los niveles de estroncio-90 en el cuerpo de los niños podían medirse analizando, simplemente, sus dientes de leche, después de que los hubieran mudado. El CNI se encargó de la tarea de organizar la colecta de dientes de niños. El Análisis del

Diente Infantil se desarrolló desde diciembre de 1958; en 1966, con la cooperación de las madres y los niños de San Luis, el estudio había recolectado unos 200.000 clientes, cuyo análisis hizo posible el primer informe detallado de la absorción de estroncio-90 procedente de la lluvia radiactiva, entre una población extensa de niños.

El CNI fundó un boletín mensual de noticias, *Nuclear Information*, que, a principios de 1960, se convirtió en *Scientist and Citizen*, y en 1969, en *Environment*, cuando ya su circulación era tanto nacional como internacional, así como su reputación, debido a sus agudos escritos científicos de investigación. El CNI creció también. Científicos pertenecientes a otras ramas de la investigación se unieron en comités similares de información y establecieron un vínculo nacional para intercambiar informaciones y coordinar su política. A finales de los años 60, el movimiento a escala nacional dio lugar a la creación del *Scientist's Institute for Public Information* (Instituto de Científicos para la Información Pública, SIPI) con sede en Nueva York, con muchas organizaciones afiliadas, incluyendo el CNI original de San Luis. En enero de 1973, el SIPI, cuyo consejo de asesores incluía por entonces un despliegue impresionante de científicos de renombre, entre ellos Margaret Mead, Lamont Cole y René Dubos, se convirtió en editor de *Environment*. Barry Commoner, uno de los miembros originales del CNI de San Luis y, más tarde, uno de los líderes del movimiento medioambiental norteamericano, se convirtió en el presidente del SIPI. Tendremos más que decir, después, sobre el papel del SIPI en la polémica nuclear.

En noviembre de 1958, los Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña iniciaron una moratoria para las pruebas nucleares que duró casi tres años. No obstante, en esos tres años no todo fue dulce ni fácil. Francia explotó su primera bomba nuclear en febrero de 1960. Una reunión en la cumbre entre el presidente Eisenhower y el “premier” Krushev resultó abortada cuando un misil tierra-aire soviético derribó un avión espía norteamericano U2, a gran altura, sobre territorio soviético. En agosto de 1961 se produjo la crisis de Berlín y la construcción del “muro”. El 17 de octubre de 1961 la Unión Soviética anunció que iba a experimentar un prototipo de 50 megatones para una bomba de 100 megatones. La prueba tuvo lugar, puntualmente, el 30 de octubre, con una potencia estimada en 58 megatones. Se abrió la veda para la lluvia radiactiva con el mayor estrépito. Una de las pruebas norteamericanas alcanzó nuevos límites, tanto en altura como en demencia. A despecho de las inquietudes expresadas por algunos famosos científicos, que fueron seriamente intimidados por el secreto oficial, los Estados Unidos hicieron detonar el 9 de julio de 1962, el Proyecto “Estrella de Mar”, una explosión nuclear a gran altura sobre el Pacífico. El resultado de la explosión, a una altura orbital, fue la dislocación semipermanente de algunos de los cinturones de radiación natural de la tierra, recientemente descubiertos, cuyo papel en el equilibrio atmosférico del planeta estaba muy lejos de ser bien conocido.

En octubre de 1962, los servicios de inteligencia norteamericanos descubrieron que la Unión Soviética estaba tratando de instalar proyectiles balísticos en Cuba. El resultado fue un forcejeo durante el cual una parte importante de los habitantes de la tierra temieron que en cualquier momento se produjera el holocausto nuclear final.

El riesgo de desastre precipitó la cooperación internacional: después de la firma del Tratado de Prohibición Parcial de pruebas nucleares, el 31 de julio de 1963, las explosiones fueron subterráneas. Pero antes de esto, los experimentadores norteamericanos decidieron la preparación de una extremadamente complicada en Nevada. Llamada Proyecto “Montaña Rusa”, era una de las que pretendían suministrar información sobre lo que podría suceder si una bomba atómica resultara afectada en un accidente no nuclear, que hiciera detonar el disparador de alto explosivo sin ocasionar una explosión de fisión. La primera “Montaña Rusa”, disparada el 15 de mayo de 1963, resultó acertadamente llamada. El alto explosivo llenó la atmósfera con una nube de plutonio que

transportó el viento cubriendo la distancia entre el Polígono de Nevada y California.

En todo caso, pese a que las pruebas norteamericanas y soviéticas fueron subterráneas después de julio de 1963, no debe de pensarse que su número decreció, todo lo contrario. Entonces fue cuando, el 16 de octubre de 1964, la República Popular China llevó a cabo su primera explosión nuclear.

Hacia 1962, cuando las pruebas se incrementaban en proporción creciente, las dudas empezaron igualmente a aumentar, incluso dentro de la AEC. El Dr Harold Knapp, de la División de Biología y Medicina de la AEC, había completado su lento y esmerado estudio sobre la historia radiológica del yodo-131, desde su aparición debido a las pruebas militares, a través de su deposición en la hierba, la ingestión del ganado, su reaparición en la leche y su llegada final al tiroides de los consumidores de leche, especialmente los niños. El informe de Knapp hizo picadillo las afirmaciones iniciales de la AEC en el sentido de que los niveles de exposición habían permanecido siendo insignificantes. Como podía esperarse, el informe no entusiasmó a la AEC. Ya que el Dr Knapp era miembro de la plantilla de la AEC, el informe fue retenido mientras era escrutado por un comité especialmente preparado de “científicos cualificados con formación especializada” de la AEC, que fue conocido como el “Comité Langhan”.

Cuatro de sus cinco miembros eran, desde luego, científicos cualificados; uno era el Dr Gofman, del Laboratorio Lawrence Livermore, de la AEC; los cuatro estuvieron, en líneas generales, a favor del informe de Knapp. El único disidente no solamente no era un científico, sino que era el jefe de la Organización de Seguridad Radiológica Exterior, del Polígono de Pruebas de Nevada. Como era de esperar ya que era suya la responsabilidad de prevenir cualquier consecuencia indeseable del yodo radiactivo procedente de las pruebas atómicas su opinión era “completamente negativa” sobre la naturaleza y la utilidad del informe Knapp. Debido a esta actitud, la AEC pudo declarar que el juicio del Comité sobre el informe de Knapp “no era unánime”. El informe fue finalmente publicado en 1963, en una tercera versión, ya que la AEC había suprimido la primera y había clasificado la segunda como secreta. La tercera versión se publicó con la versión “no unánime” del Comité; el día de la publicación, Knapp dimitió en la AEC. La experiencia del Dr Gofman como miembro del Comité Langhan fue un factor fundamental para convertirlo, de un miembro valioso de la plantilla de la AEC, en uno de sus adversarios más francos y tenaces.

Desde principios de los 60 en adelante, el Dr Ernest Sternglass, profesor de Física de las Radiaciones en la Universidad de Pittsburg, fue preocupándose progresivamente de la lluvia artificial procedente de las pruebas atómicas, según se manifestaba en las estadísticas de mortalidad infantil posterior a las pruebas. Le interesaban los efectos, que estaban abiertos a un amplio margen de interpretaciones, debido a la oblicuidad de los datos estadísticos y la insuficiencia de las muestras estadísticas utilizables. Lo que encontró en las estadísticas le dio a entender que incluso la radiación de bajo nivel, asociada con una precipitación de radiactividad como la que cayó sobre Troya en 1953, produce un aumento identificable de leucemia en niños expuestos. La respuesta oficial de la AEC a sus conclusiones no fue, simplemente, negar su validez, sino tratar de desacreditar al Dr. Sternglass, sembrando dudas sobre su nivel profesional y esforzándose en evitar cualquier discusión abierta sobre sus tesis. Se pidió a un biofísico del Laboratorio Livermore que preparara una crítica de las opiniones de Sternglass. En un simposio patrocinado por la AEC, celebrado en Hanford en mayo de 1969, el Dr Sternglass entregó un artículo declarando que unos 400.000 niños de menos de un año habían muerto, probablemente, como resultado de la lluvia nuclear entre 1950 y 1965. También estaba presente en este simposio la radiobióloga británica, Dra Alice Stewart, su clásica investigación sobre el cáncer infantil, publicado en junio de 1958 había demostrado primero que la dosis aplicada a las madres embarazadas, por un diagnóstico de rayos-X, podía producir un aumento detectable en la frecuencia del cáncer en el niño expuesto. Esta dosis, de

pocos rads o incluso menos aún, es comparable a la que resulta de la lluvia radiactiva del tipo de la caída sobre Troya, St George y otros lugares.

Como se había realizado desde fuera, los científicos de la AEC tacharon el trabajo del Dr. Sternglass de científicamente indefendible, Pero el *Bulletin*, que había publicado en abril de 1969 un artículo del Dr Sternglas llamado “Mortalidad Infantil y Pruebas Nucleares” publicó en junio otro, titulado “¿Pueden Sobrevivir los Bebés?”. La revista *Esquire*, alertada por nuevas revelaciones, publicó un número especial en septiembre de 1969, “La Muerte de Todos los Niños”, escrita por el Dr Sternglass a petición del director, Harold Hayes. *Esquire* decidió publicar el número con un anuncio a toda página en el *New York Times* y el *Washington Post*, y enviando copia anticipada a cada congresista y cada senador. El Congreso estaba debatiendo, en ese momento, la conveniencia de decidirse por la instalación de un sistema de misil antibalístico (ABM), que podría interceptar cualquier misil nuclear agresor y destruirlo con misiles nucleares norteamericanos. Evidentemente, si las afirmaciones de Sternglass eran dignas de crédito, el telón consecuente de lluvia radiactiva tendría, probablemente, efectos a largo plazo tan letales globalmente como los de la guerra nuclear total. Pese a todo, quince días después el Congreso dio luz verde al sistema de misil antibalístico.

En octubre de 1969, el Dr Sternglass fue invitado a debatir sus tesis en Berkeley, frente al científico que había preparado la crítica de la AEC sobre sus análisis, y cuyo artículo sobre la polémica iba a aparecer en el *Bulletin*. El nombre del científico de la AEC era Arthur Tamplin. El Dr Tamplin había sido contratado por unos años para trabajar en el Laboratorio Livermore, desarrollando predicciones sobre los cambios biológicos y los destinos finales de los radioisótopos procedentes de las explosiones nucleares. Sus credenciales, como crítico de los análisis de Sternglass, estaban, evidentemente, en orden. Pese a ello, el resultado del nombramiento del Dr Tamplin fue uno de los fallos más irónicos de toda la historia de las relaciones públicas de la AEC.

Como la AEC había, sin duda, esperado, el Dr Tampin se mostró evidentemente en desacuerdo con el Dr Sternglass. El Dr Sternglass postulaba que la lluvia había ocasionado la muerte de 400.000 niños; el Dr Tamplin corrigió los datos y llegó a la conclusión de que el Dr Sternglass había sobrestimado el tema con un factor de, por lo menos 100. Desgraciadamente, desde la posición de la AEC ésto significaba que el propio Dr Tamplin consideraba que la lluvia radiactiva había matado nada menos que a 4.000 niños. Los superiores del Dr Tamplin, en la AEC, le invitaron a borrar esta cifra indeseable de su crítica; el Dr. Tamplin, apoyado por el director adjunto del Laboratorio Livermore, Dr John Gofman, se negó a ello. En el debate de Berkeley, el Dr Gofman veterana autoridad en la relación entre radiación y defectos cromosómicos y cáncer descalificó ante la audiencia la posición oficial de la AEC; declaró que, por lo que él sabía, ninguno de los datos procedentes de los experimentos con animales se referían a los efectos de las bajas dosis (sino a pequeñas reducciones en el peso de las aves y a la capacidad para luchar contra las infecciones), que las hipótesis de Sternglass identificaban como motivos radiogénicos para el incremento de la mortalidad infantil. Mientras la presión de la AEC sobre los Dres Gofman y Tamplin se acentuaba más abiertamente, se encontraron, pese a ser miembros veteranos de la plantilla de la AEC, en primera línea del desafío naciente a las normas y procedimientos de la AEC.

Hasta 1969, el Dr Sternglass se había preocupado casi exclusivamente por los efectos de las radiaciones de bajo nivel producidas por la lluvia radiactiva de las pruebas militares; también la crítica de Tamplin se había dirigido a este fin. Pero en ese momento había empezado a atraer su atención otra fuente de radiaciones de bajo nivel: los escapes de radiactividad de las centrales nucleares y las plantas de reprocesado de combustible. A finales de 1969, los Dres. Sternglass, Gofman y Tamplin se sintieron crecientemente preocupados con los efectos sobre le salud pública de las instalaciones nucleares civiles; y no estaban solos.

En Minnesota, la sociedad Northern States Power construía una central nuclear en Monticello con un reactor de agua en ebullición de 545 MWe, en el curso más alto del río Mississippi. La Agencia de Control de la Polución de Minnesota (MPCA), un órgano del Estado, pidió a la empresa algunos detalles sobre las descargas previstas al Mississippi y recibió un rechazo brusco. La empresa no tuvo empacho en explicar que las descargas de radiactividad era de la responsabilidad de la AEC, a nivel federal, y fuera de la jurisdicción del Estado. En 1967, la MPCA pidió ayuda al Dr Dean Abrahamson, de la Universidad de Minnesota. Como el Dr Gofman, el Dr Abrahamson era, aparte de un cualificado doctor en Medicina, un cualificado físico nuclear, el Dr Abrahamson y sus colegas que, en su momento, formaron el Comité de Minnesota para la Información Medioambiental pronto se vieron implicados hasta el cuello en un choque entre la AEC y el Estado de Minnesota en torno a las normas sobre las radiaciones. En marzo de 1969, el Dr Ernest Tsivoglou recomendó que el Estado estableciera los niveles de descarga de acuerdo con las características dadas por la empresa y los constructores General Electric - con respecto a los residuos radiactivos (estos niveles, como consecuencia, resultarían unas cincuenta veces por debajo de las normas nacionales establecidas por la AEC). La AEC declaró que Minnesota no tenía competencia para establecer sus propias normas, tanto en seguridad como en otras cuestiones; y la empresa recurrió a los Tribunales del Estado.

Con el apoyo de la AEC, la empresa ganó la causa, en su momento, pero el episodio no pasó desapercibido. Las comunidades locales destinadas a albergar nuevas centrales nucleares demostraron una preocupación creciente por los peligros de la radiación. Sus preocupaciones ya no eran teóricas sino que se manifestaban en la oposición legal a la autorización de las instalaciones proyectadas. A finales de 1960 el JCAE mantuvo una serie de audiencias sobre los efectos medioambientales de la producción de energía eléctrica, obteniendo un extenso documento de los testimonios contradictorios de los oradores participantes, en todos los aspectos del tema, especialmente el nuclear. Las áreas de especial desconfianza incluían la seguridad de operación y los peligros de la radiación durante el funcionamiento normal. La vaga intranquilidad del gran público quedaba ahora reforzada por la opinión experta de autoridades innegables, particularmente los Dres Gofman y Tamplin. Ya no fue posible para el *establishment* nuclear eludir las objeciones diciendo que los objetores no estaban cualificados.

El 3 de diciembre de 1970, la AEC publicó unas enmiendas a las instrucciones sobre los niveles de radiación. Después de las audiencias de enero y febrero de 1971, anticipó las revisiones propuestas de normas únicas para el control de descargas radiactivas procedentes de centrales nucleares a fin de mantener estas descargas “tan bajas como fuese posible”. El resultado de la revisión era, en esencia, hacer lo que los Dres Gofman y Tamplin habían sugerido: reducir en un factor de, aproximadamente, cien, las cantidades de radiactividad que se permitía descargar en los límites de una central nuclear. Algunos radioisótopos, especialmente el yodo radiactivo, se sometían a un control aún más restrictivo, reduciéndose sus descargas autorizadas en un factor de 100.000. Evidentemente, el criterio de “tan bajo como fuese posible” simplemente reconocía que las descargas de rutina podían, con la tecnología al uso, mantenerse a nivel sin dificultad. La AEC iba, como comentó el doctor Gofman, “respondiendo sensatamente a las presiones sensatas”. Las presiones, sin embargo, no iban a relajarse.

En todo caso, estaba claro que los sistemas nucleares civiles no resultaban del mismo tipo que las armas nucleares, cuando se consideraba la radiactividad medioambiental. El 18 de diciembre de 1970, una explosión nuclear de 20 kilotonnes, llamada “Fruta Envenenada”, esparció radiactividad sobre doce estados y sobre la frontera con Canadá (lo que contravenía el Tratado de Prohibición Parcial de Pruebas Nucleares). La explosión “Fruta Envenenada” fue detonada a 300 metros de profundidad en el Polígono de Nevada, pero reapareció impulsando una nube radiactiva a unos tres

kilómetros de altura, obligando a la evacuación del lugar a 600 trabajadores y contaminando a otros 300, así como 80 automóviles. Un campo de trabajos cercano al sitio de la explosión, resultó tan gravemente contaminado que permaneció inseguro para el trabajo durante dos meses. Después de la “Fruta envenenada” la AEC suspendió las pruebas nucleares para examinar los niveles de seguridad. Pero a mediados de 1971 volvía otra vez a la carga.

Ni que decir tiene que la AEC ya iba consiguiendo por entonces un volumen creciente de quejas. Por ello, la AEC buscó un lugar para pruebas que no molestara a la gente del propio país, pero que tampoco molestase a los extranjeros. La elección resolvió ambas cosas, mejor que en cualquier otra prueba anterior. Para una prueba subterránea, de 5 megatones, llamada “Balde”, la AEC se estableció en la isla aleutiana de Amchitka, en una de las regiones más sísmicas de todo el planeta. En el momento en que se realizó la prueba, la explosión se oyó en todo el mundo. Las protestas llegaron desde casi todos los países que rodeaban el Pacífico, incluyendo Canadá, Perú, Nueva Zelanda, Australia y Japón. Un grupo de decididos oponentes intentaron dirigirse a la zona de la prueba en un pequeño barco arrastrero rebautizado *Greenpeace* (Paz Verde). El gobierno canadiense, aguijoneado por un número de contestatarios que alcanzaba los millones pidió que la experiencia fuera suspendida. En los propios Estados Unidos, los oponentes llevaron su protesta hasta el Tribunal Supremo que por una mayoría de cuatro contra tres rehusó intervenir. El líder de la mayoría en el Senado calificó la prueba como un “peligro y un ultraje” y treinta y cinco senadores pidieron al Presidente Nixon que la detuviera. Pero el 6 de noviembre de 1971, “Balde” estalló. Los expertos declararon que el terremoto que golpeó Hokkaido y Honshu, en Japón, el día siguiente, no tenía nada que ver con la prueba. Las autoridades de Alaska estimaron que más de 300 nutrias marinas habían muerto. La radiactividad liberada por la explosión no se hizo inmediatamente presente en el aire o el agua adyacentes; pero los contestatarios observaron que un área que soporta anualmente docenas de temblores difícilmente podía ser un lugar adecuado para los muchos millones de curiosos de radioisótopos de vida larga.

Los temores que habían impulsado el primer Greenpeace, mientras tanto, fueron dirigiéndose hacia el sur. Desde 1966, Francia había experimentado bombas en la atmósfera sobre el atolón de Mururoa, a unos 1.600 kilómetros al sur de Tahití. En agosto de 1971, Perú advirtió a Francia que las relaciones diplomáticas quedarían rotas si Francia persistía en sus pruebas, arguyendo que la radiactividad producida era ya detectable en la nieve de los Andes. Cuando la serie de pruebas de 1972 estaba a punto de iniciarse, otro, barco canadiense, el queche *Greenpeace III*, fue golpeado por un navío de guerra francés en aguas internacionales, justamente al lado de la zona de pruebas. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano aprobó una resolución, por 52 votos a favor y ninguno en contra, a propuesta de Nueva Zelanda y apoyada por casi todos los países ribereños del Pacífico excepto los Estados Unidos y China condenando las experiencias de armas nucleares. Los sindicatos australianos y neozelandeses boicotearon los barcos franceses y las líneas aéreas. Pero el 28 de junio tuvo lugar la primera prueba, pese a todo. El mismo episodio se sucedió en 1973, salvo que en esta ocasión el navío francés abordó el *Greenpeace III* y maltrató a la tripulación, hiriendo seriamente al patrón canadiense. Desafiando el clamor internacional, Francia repitió esto en 1974, como de costumbre, pese a haber anunciado planes para convertir en subterráneas las pruebas siguientes.

Para cualquiera que pudiera hacerse cargo de que, en un contexto nuclear, una bomba es una bomba, había otra actividad de los constructores de bombas que se prestaba a confusión adicional. En un intento de encontrar un productivo uso no militar a las bombas atómicas, la AEC creó, en julio de 1957, la División de Explosivos Nucleares Pacíficos. Su programa recibió el bíblico nombre de “Reja de Arado” como algo contra lo que las espadas nucleares podían estrellarse. Los proyectos de desarrollo de explosiones de ingeniería civil, con bombas nucleares, parecían

económicamente prometedores, especialmente para proyectos a gran escala para los cuales los explosivos químicos ordinarios de alto poder resultarían prohibitivamente caros. Había, desde luego, dificultades. Entre otros casos, el punto en el que un ingenio explosivo nuclear sencillo resulta menos caro que el explosivo químico equivalente, está por encima de las 1.000 toneladas de TNT. La viabilidad de explosiones sencillas de esta magnitud para ingeniería civil es algo relativa. Más embarazoso todavía es el hecho de que los productos de fisión permanecerán después sobre el lugar, haciéndolo ligeramente insalubre.

Al principio, los proyectos de la “Reja de Arado” ignoraron el problema de la radiactividad residual. Uno de los primeros planes que se discutieron seriamente fue el Proyecto “Carroza”, un intento de volar un puerto en la costa norte de Alaska mediante una explosión nuclear. Pero las investigaciones de algunos científicos asociados al CNI revelaron que la lluvia radiactiva resultante se acumularía en el líquen ártico que los renos y caribús comían y se concentraría lo suficiente como para presentar un peligro radiológico a los esquimales que comían esos animales. Cuando los científicos del CNI expusieron sus conclusiones a la población local, en Alaska, su respuesta persuadió a la AEC a abandonar el proyecto. Un programa de obra magna semejante era el grandilocuente proyecto de un nuevo canal a través de América Central, en algún lugar al sur del Canal de Panamá, del que se decía que era demasiado pequeño para grandes buques y que, en cualquier caso, estaba en un área en la que los Estados Unidos encontraban cada vez mayor dificultad para controlar políticamente. El nuevo canal nuclear requeriría la detonación simultánea de unos 250 megatonnes de explosivos nucleares (una “reja de arado” para labrarlo, evidentemente). Se reconoció que era una molestia la expulsión de miles de nativos de las zonas próximas, así como la probabilidad de que la radiactividad residual hiciera imprudente para ellos el regresar antes de unos años después. Pero después de seis años de trabajos, entre 1964 y 1970, la Comisión de Estudio del Canal Interoceánico Atlántico-Pacífico informó que la mejor solución sería utilizar cantidades manejables y ordinarias de explosivos convencionales, para ensanchar el canal existente.

En 1969, pese al entusiasmo de defensores como el Doctor Edward Teller, las posibilidades de las aplicaciones de la “Reja de Arado” fueron ciñéndose a aquellas que pudieran al menos teóricamente confinar los productos resultantes de la fisión, en lugar de expulsarlos a la atmósfera (la Unión Soviética tenía menos escrúpulos y, después de las primeras explosiones del tipo “Reja de Arado” a finales de 1960, todavía propone, en 1975, utilizar explosiones nucleares pacíficas para el desvío de ríos y otras aplicaciones cósmicas. Los efectos laterales no solamente los radiológicos continúan preocupando a muchos observadores). Las proposiciones norteamericanas más convincentes para las aplicaciones eran las destinadas a explosiones subterráneas para crear cámaras gigantes de almacenamiento, especialmente para residuos peligrosos, y fracturar formaciones geológicas conteniendo hidrocarburos. No se evidenció que fueran intereses industriales los que apoyaran la excavación de almacenes subterráneos mediante explosivos nucleares, pero el llamado “estímulo del gas” ha llegado a ser una actividad fuertemente conflictiva, especialmente en Colorado.

La primera explosión subterránea de “estímulo del gas” del programa “Reja de Arado” tuvo lugar en enero de 1967, cerca de Farmington, New México; se llamó “Loco por el Gas”. La siguiente se llamó “Rulison”, y consistió en una bomba de 43 kilotonnes, al noroeste de Grand Junction, Colorado, en septiembre de 1969. Ninguna de estas explosiones “experimentales” produjo gas de muy alta calidad. El gas producido ha sido quemado principalmente en la parte superior de los pozos de gas, practicados en formaciones dispersas. Los objetores locales a las explosiones también se han mostrado preocupados por este quemado, señalando que el gas contiene tritio radiactivo, que se ha diseminado, en consecuencia, en la atmósfera de Colorado. Todavía les inquieta más la idea de que el gas radiactivo pueda conducirse a las tuberías de distribución y aparecer con cierta

radiactividad en las cocinas domésticas.

El tercer proyecto, llamado “Río Blanco”, provocó la mayor oposición conocida hasta entonces. Era un plan para la utilización de tres bombas, una sobre otra, en un mismo eje, tratando de crear una enorme cavidad a través de la cual el gas pudiera dirigirse a los pozos. “Río Blanco” hubo de enfrentarse a los Tribunales; pero en el momento previsto, el 17 de mayo de 1973, se realizó la explosión. No consiguió su objetivo, aparentemente; las tres cavidades separadas no se unieron. Ya se han pagado unos 40.000 dólares en reclamaciones por los daños ocasionados por la onda de choque (“Rulison” supuso una indemnización total de 155.676 dólares); el aseguramiento, de las edificaciones en las proximidades de la explosión “Río Blanco” costó otros 142.500 dólares. El programa nuclear de estímulo del gas supondría, según la Oficina de Contabilidad General, la realización de 5.680 pozos y la preparación de 29.680 explosiones nucleares en los próximos 35 a 65 años.

Una vez creada, la radiactividad es un riesgo medioambiental que puede mantenerse durante un tiempo inimaginablemente largo. Crearla en condiciones de descontrol, especialmente si es en la atmósfera, es un acto de irresponsable brutalidad biológica. Incluso cuando se crea en condiciones de confinamiento posee una triste habilidad para escaparse. Si continuamos creando, radiactividad en cantidades cada vez mayores vamos a tener que mejorar nuestra válvula de vigilancia o arriesgamos a infligir un daño irreparable al tejido de la vida sobre la Tierra.

6. Reactores: Parados y en marcha

Desde el principio, la toma de decisiones en temas nucleares ha sido prerrogativa de gobierno. Esto resulta evidentemente adecuado en tanto las actividades nucleares estuvieran totalmente dirigidas hacia fines militares. Sin embargo, en la medida en que las aplicaciones civiles de la energía nuclear fueran llegando más lejos, la relación entre el gobierno, la comunidad científica, la industria y el comercio se fue haciendo cada vez más compleja. Como veremos, los detalles concretos son distintos de una nación a otra. Pero los acuerdos de colaboración, desarrollados de una forma sin paralelo semejante en cualquier otro campo del esfuerzo humano, especialmente en el ciclo del combustible nuclear, sector por sector, empezaron a mostrar tanto el lado civil como el militar.

La primera nación en resaltar tanto los efectos civiles como militares, de las actividades nucleares fue Canadá. En su calidad de tercer participante, con Gran Bretaña y los Estados Unidos, en el proyecto Manhattan para el desarrollo de la bomba, Canadá fue escogido como el lugar de construcción de las instalaciones experimentales más importantes, incluyendo el primer reactor fuera de las fronteras USA. Poco después de la Segunda Guerra Mundial, Gran Bretaña reclamó la mayor parte de sus científicos al Canadá, para acometer su programa nuclear. Privado de esta forma, el gobierno canadiense no consiguió ningún progreso en el programa de armas nucleares; esta situación se ha mantenido desde entonces. No obstante, Canadá se encontró con los comienzos de una instalación nuclear en Chalk River, a menos de 200 kilómetros al norte de Ottawa, cuya construcción estaba ya bastante avanzada cuando se fueron los británicos.

Los dos primeros reactores de Canadá, construidos en Chalk River, fueron el pequeño reactor ZEEP y el reactor NRX, considerablemente mayor, que alcanzó criticidad en 1947 y alcanzó su potencia nominal de 40 MWt en mayo de 1948. El NRX era un reactor de investigación, en algunos aspectos el primer precursor del CANDU. Al igual que la mayoría de los modelos de agua pesada, el NRX era un eficiente productor de plutonio (que Canadá vendía a los Estados Unidos y a Gran Bretaña) según procedimiento que se ha seguido y ampliado en los reactores canadienses posteriores. Pero las tareas en Chalk River, se centraron principalmente en el uso del NRX para una amplia gama de investigaciones básicas. Pronto se constituyó en el reactor experimental de mayor éxito del mundo. Entonces, irónicamente, el único país que había decidido, tras la Segunda Guerra Mundial, desarrollar su incipiente capacidad nuclear exclusivamente para investigación, resultó ser el primero en sufrir un accidente importante de reactor.

El 12 de diciembre de 1952, un técnico de la base del edificio del NRX abrió, erróneamente, tres o cuatro válvulas (nunca se aclaró el número exacto) que extrajeron tres o cuatro barras de parada, de las doce del reactor, fuera del núcleo. Viendo las luces rojas, el supervisor se dirigió a la mesa de control, dejó a su ayudante al cargo y fue a ver lo que estaba pasando. En la base, comprendió inmediatamente lo que había sucedido, repuso válvulas y telefoneó a su ayudante para que pulsara los botones 4 y 3 para volver al funcionamiento normal. En su apresuramiento, dijo inadvertidamente "4 y 1", antes de que pudiera corregirse, su ayudante había ya colgado el teléfono y obedecido. Tanto el supervisor como su ayudante ignoraban que la reposición de las válvulas había apagado las luces rojas sin que las barras se reinsertaran completamente; el ayudante no tenía motivos para cuestionar la seguridad del hecho de pulsar el botón 1. Haciendo esto, extrajo cuatro barras más de parada fuera del núcleo; el nivel de potencia del reactor empezó a aumentar. A los veinte segundos, el ayudante comprobó que nada iba bien, Y apretó el botón de parada de emergencia. Esto debiera haber reinsertado todas las barras de parada; pero no fue así. Solamente una de las siete, u ocho barras retiradas descendió, y esto sucedió tan lentamente que necesitó noventa segundos para caer justamente desde tres metros. Los operadores decidieron que sería necesario descargar el agua pesada desde la calandria, que es un recurso de última instancia

para detener la reacción de fisión. El agua pesada necesitó treinta segundos para ser extraída del tanque, y los instrumentos señalaron que el nivel de potencia del reactor había caído a cero.

Pero en la base, el supervisor y otros miembros directivos pudieron ver, a través de una mirilla, que el agua goteaba fuera del sistema. Se abalanzaron con un barreño, creyendo que era agua pesada, pero, de hecho, era refrigerante de agua ligera y, por lo tanto, radiactiva. Se produjo un estruendo sobre ellos y el agua salió arrojada fuera del reactor. Les alarmas de radiactividad empezaron a sonar, tanto en el edificio del reactor como en el edificio de extracción química, en otro lugar de las instalaciones de Chalk River. Las sirenas recomendaron al personal del complejo que se refugiara en el interior; pocos minutos después llegó la orden superior de evacuar la planta entera. Solamente el personal de la sala de control permaneció en el interior, utilizando máscaras de gas. Desde el principio hasta el fin, el período total del accidente había ocupado sólo setenta segundos.

La extracción involuntaria de las barras de control había permitido a la velocidad de la reacción de fisión alcanzar un valor tal que el calor liberado había fundido parte del combustible de uranio. La energía de fisión por sí misma, no produjo explosión. Pero el calor hizo hervir parte del refrigerante, formando burbujas de vapor que eran mucho menos absorbentes de neutrones, haciendo que la reacción de fisión se acelerase aún más. En unos pocos segundos, el combustible de uranio se fundió y la vaina de aluminio empezó a reaccionar con el agua y el vapor; el uranio metálico caliente extrajo el oxígeno de las moléculas de agua, dejando libre el hidrógeno, éste se mezcló con el aire entrante a través de las tuberías agrietadas y la explosión resultante elevó un contenedor de helio de cuatro toneladas hasta la parte superior, comprimiéndolo ahí.

La elevación de presión y temperatura, las reacciones químicas y las explosiones casi demolieron el núcleo del reactor, y desparramaron radiactividad en todas direcciones. Unos 10.000 curios de productos de fisión de larga duración alcanzaron la base debido a la fuga de 4 millones de litros de agua de refrigeración. Afortunadamente, las instrucciones de emergencia de la planta fueron efectivas. Como consecuencia, se informó que ningún empleado recibió exceso de exposición a la radiación durante el accidente propiamente dicho y que durante la limpieza una dilatada y sucia tarea que duró muchos meses la dosis individual más alta fue de sólo 17 roentgens, con la mayoría por debajo de 4 roentgens. Aún estando muy por encima de los niveles recomendados, eran exposiciones comparativamente modestas, dadas las circunstancias, cuando se comprobó que la secuencia del accidente incluyó un fallo casi completo del sistema de barras de parada de emergencia, el personal del reactor pudo considerarse incluso afortunado.

Ni que decir tiene que la persistente contaminación radiactiva representó el obstáculo más embarazoso para los encargados de limpiar las partes afectadas. Se les puede atribuir una serie de aciertos: consiguieron, en su momento, encontrar un método por el que pudieron extraer la calandria, completamente contaminada, del interior del blindaje del reactor, y reemplazarla con una nueva estructura. Muy pocos en Chalk River, la noche del 12 de diciembre de 1952, habrían esperado nunca ver el NRX de nuevo en servicio, después de su resonante "hipo". Pero en sólo catorce meses el NRX volvió a funcionar, con tiempo de sobra para sorprender otra vez, más tarde, mientras su sucesor de 200 MWt, el NRU, sufría dos meses de descontaminación masiva. La descontaminación se hizo necesaria el 25 de mayo de 1958 cuando se partió un elemento del combustible irradiado y se incendió dentro de la máquina de recarga del NRU. En determinado momento, un elemento combustible ferozmente radiactivo, de un metro, cayó desde la máquina de recarga y se incendió. Afortunadamente fue a parar a un hueco de mantenimiento; la dosis de radiación en el hueco se evaluó nada menos que en 10.000 roentgens por hora. Unos 600 hombres se vieron envueltos en la limpieza, y se descontaminaron 400.000 metros cuadrados alrededor del edificio del NRU.

Igual que los canadienses, los franceses participaron en las etapas iniciales del Proyecto Manhattan y fueron, entonces, gradualmente desplazados de la escena. Como los canadienses, los franceses crearon, después de la Segunda Guerra Mundial, una empresa nuclear gubernamental destinada exclusivamente a la investigación: La Comisariado de Energía Atómica (CEA). Igual que los canadienses, los franceses se encontraron con recursos de uranio propios capaces de ser explotados. No obstante, y al contrario que los canadienses, empezaron a preguntarse, a mediados de los 50, si no sería conveniente proceder al desarrollo de armas nucleares.

Su primer reactor de investigación, Zoé o menos poéticamente EL1, alcanzó criticidad en 1948, en el centro de investigación de FontenayauxRoses, cerca de Paris. El primer programa nuclear francés de potencia estaba definido hacia 1952. El reactor G1, refrigerado por aire y moderado por grafito, en Marcoule, reactor de 40 MWe de doble finalidad plutonio y energía alcanzó criticidad en 1956, como su pariente británico de Calder Hall. Igual que en Gran Bretaña, las primeras centrales nucleares comerciales en Francia eran vástagos de los reactores productores de plutonio. La central de Chinon1, de 70 MWe, construida sobre el Loire por Electricité de France, alcanzó criticidad en septiembre de 1962.

Después del arranque de la “primera central atómica de potencia” APS11, de Obninsk, y con la gradual relajación de la tensión EsteOeste, el esfuerzo nuclear soviético también se extendió desde las aplicaciones militares a las civiles. La primera central nuclear de potencia, a gran escala, fue construida en Troitsk, en el suroeste de Siberia, y empezó a funcionar en 1958. Sus reactores, que llegarían a ser seis, eran descendientes de 100 MWe de la central de Obninsk, con un diseño peculiar soviético que utilizaba moderador de grafito encerrado en tubos de presión rellenos con refrigerante de agua a presión. El primer PWR, de 265 MWe, arrancó en Novovorenezh, en octubre de 1963.

La Junta de Energía Atómica Británica, AEA, fue creada el 1 de enero de 1954, y un “Libro Blanco” gubernamental publicado en febrero de 1955 estableció las bases para un programa de energía nuclear civil en Gran Bretaña. El “Libro Blanco” señaló el crecimiento previsto de la demanda de electricidad en Gran Bretaña, la incapacidad de la industria del carbón para abastecer esta demanda y la posibilidad de que la electricidad nuclear resultara más barata que la producida por el carbón; no trató de argumentar que la electricidad nuclear pudiera resultar inmediatamente competitiva con la del carbón, pero advirtió que el liderazgo de Gran Bretaña en la tecnología no debía dejarse perder. Sobre la base de que los costes podrían ser comparables a los de la electricidad del carbón, el gobierno dió luz verde a su programa de doce centrales nucleares para ser construidas a lo largo de la siguiente década. Este programa fue, posteriormente, revisado dos veces, en octubre de 1957 y en junio de 1960, convirtiéndose en algo menos ambicioso. Pero incluso antes de que arrancara Calder Hall, la Agencia Central de Generación de Electricidad ya había iniciado el encargo de la primera generación de centrales comerciales Magnox, empezando con las centrales de reactores gemelos Berkeley, en Gloucestershire, y de Bradwell, en Essex.

El 8 de octubre de 1957, el físico encargado del reactor de producción de plutonio Windscale Número Uno, accionó un interruptor antes de tiempo. Llevaba a cabo una operación rutinaria, conocida como “liberación de energía Wigner” que consiste en elevar y disminuir el nivel de potencia. De acuerdo con los instrumentos dedujo que la temperatura del núcleo estaba fallando, sin completar la liberación Wigner deseada. No disponía del manual de manejo del reactor, con sus apartados especiales sobre la liberación Wigner, para auxiliarse, ni disponía de instrucciones suficientemente detalladas. Sin embargo, el físico decidió dar al nivel de potencia otro breve empujón para volver a elevar la temperatura y completar la liberación Wigner. Lo que no sabía era

que los termopares que registraban las temperaturas del núcleo no estaban en la parte más caliente de éste. Las temperaturas del núcleo eran, en algunos puntos, considerablemente más altas de lo que al físico advirtió. Cuando, a las 11,05 de la mañana, retiró las barras de control para elevar el nivel de potencia otra vez, la elevación de temperatura adicional que se produjo quemó, finalmente, por lo menos una barra de combustible.

El fisido no tenía ni idea de que algo andaba mal. Hasta las 5,40 del 10 de octubre 42 horas y 35 minutos más tarde no hubo ningún signo externo, de que no todo iba bien en el interior del núcleo del reactor Windscale Número Uno. Entonces, los instrumentos empezaron a señalar que la radiactividad estaba alcanzando los filtros del extremo superior de la chimenea de descarga del aire de refrigeración. Estos filtros eran conocidos como la “locura de Cockcroft”; Sir John Cockcroft había insistido en que se instalasen, después de que la chimenea se hubiera construido, como una medida de precaución (para mofa de sus colegas). Mientras actuaba, la “locura de Cockcroft” probablemente impidió que un accidente grave se convirtiese en catástrofe. En el momento en que el personal de Windscale supo que algo iba mal, el fuego se había convertido en un infierno, y se extendía rápidamente.

Desgraciadamente, estaba muy poco, claro lo que podía hacerse con él. El uranio y la vaina fundidos, empapados de productos de fisión, arrieron ferozmente en unos 150 canales de combustible, aventados por la arremetida de aire, que en ese momento no tenía posibilidades de refrigerar el núcleo. También el grafito se inflamó. Tom Tuohy, más tarde director general de Windscale, recordaba cómo se mantenía en la tapa del reactor, llevando una máscara para respirar, mirando a través de una ventanilla encima de la piscina de refrigeración y viendo las llamas extenderse desde la cara de descarga del núcleo y lanzándose contra el blindaje de hormigón de la pared exterior (hormigón cuyas características exigen que debe mantenerse por debajo de una cierta temperatura para que no se debilite y se deshaga). Por encima del fuego, estaban ardiendo once toneladas de uranio.

La dirección de Windscale solamente sabía bien que el agua y el metal fundido, en contacto, pueden reaccionar; oxidándose el metal y liberando hidrógeno, para mezclarse con el aire entrante y explotar. Nadie podía estar seguro de que una explosión así no desgarrara y abriera el blindaje, vomitando una nube infernal de abrasadora radiactividad. Algunos de los responsables insistieron en que debía hacer, primero, la prueba del dióxido de carbono, pese a la advertencia insistente de que a la temperatura del fuego el oxígeno del dióxido de carbono aventaría las llamas tan eficazmente como el aire.

Acababa de llegar al complejo un tanque ICI¹³ cargado de refrigerante de dióxido de carbono líquido, recién producido, con destino a los reactores de Calder Hall. Pero la predicción de Tuohy demostró ser correcta; alimentadas con dióxido de carbono, las llamas no hicieron más que

13

Las siglas corresponden a la firma industrial química Imperial Chemical Industries, una de las más importantes del mundo

intensificarse. El único recurso era el agua. En las primeras horas del viernes 11 de octubre se tomó la decisión: el Chief Constable de Cumberland fue advertido de la posibilidad de una emergencia. Se alzaron las mangueras contra incendios hasta la cara de carga del reactor. Sus bocas estaban cortadas, y las mangueras fueron acopladas, sin embargo, a las aberturas de entrada en una línea de canales de combustible de aproximadamente un metro, sobre el centro del incendio. En este momento, el fuego, ya causaba estragos, fuera de control, desde hacía más de veinticuatro horas. Tuohy ordenó abandonar la planta a todo el mundo, excepto él mismo, un colega, y el jefe local de incendios. A las 8,55 hicieron, funcionar las mangueras.

Y fue bien. Lentamente, el fuego cedió y se apagó. Pero los problemas en Windscale estaban lejos de acabar. Los empleados habían luchado a brazo partido con el fuego, durante más de un día antes de que llegara a oídos de la prensa y al público, incluyendo la población local, de que algo iba mal en la planta. Incluso cuando Tuohy y su gente intentaban vencer las llamas estaba claro que el fuego, había liberado una considerable nube de radioisótopos de combustible fundido. Sus filtros de la chimenea habían atrapado una gran proporción de la fuga de radiactividad pero en absoluto toda. Fuera de la planta, la pregunta era: ¿cuánta radiactividad ha escupido la chimenea y descendido sobre Westmoreland y Cumberland? Había llegado a otros sitios? ¿De qué tipo era y cómo de peligrosa? Lo más importante de todo era saber qué había que hacer y hacerlo rápido.

Entre todos los radioisótopos, uno fue rápidamente identificado como el más peligroso el yodo-131, por su corto período de semi-desintegración, alta actividad y tendencia a instalarse en el tiroides humano, (en su momento se estimó que se habían vertido a la atmósfera unos 20.000 curios de yodo-131). Se tomaron decisiones. El ganado que pastaba en los campos donde habían descendido los radioisótopos podría producir leche conteniendo yodo radiactivo; esa leche no debía ser bebida. Por acuerdo entre la AEA, la policía local, y la Oficina Comercial de la Leche y el Ministerio de Agricultura, Pesca y Afimentación, la leche procedente de un área de más de 500 kilómetros cuadrados unos dos millones de litros fue vertida a los ríos y al mar. Se dijo en la zona que la peor consecuencia del incendio de Windscale era el hedor ácido de todos los cauces fluviales durante las semanas posteriores. Los granjeros fueron compensados por el gobierno; también se dijo que, a juzgar por la cantidad de reclamaciones. el ganado local debía haber producido más leche que cualquier otro en el país.

Nunca se ha explicado por qué el gobierno optó por el dramático gesto de verter la leche, en lugar de, simplemente, secarla y almacenarla durante unas semanas, hasta que el yodo radiactivo hubiera decaído suficientemente, Debe de suponerse que el gobierno se anticipó al temor público a cualquier intento de aprovechar la “leche radiactiva” en el mercado. También es razonable suponer que el gobierno, con el generoso gesto de derramar la leche, buscaba distraer la atención sobre otras posibles consecuencias que solamente pudieran presentarse muchos años después. No parece haberse dedicado ningún esfuerzo a seguir la pista de la gente próxima a Windscale durante el incendio. Todo esto sucedió hace casi dos décadas; a mediados de los 70 sólo permanece la persistente sospecha local de que, en estos días, es mucha la gente que parece morir de enfermedades como el cáncer. Puede que no haya, en absoluto, ninguna base médica o estadística para tales rumores. La evidencia, en un sentido o en otro, no parece haberse comprobado con datos concluyentes.

Con posterioridad al incendio de Windscale, el reactor de producción Número Dos, fue apagado mientras se desarrollaban las investigaciones. Nunca se publicó el informe completo de la investigación; la versión pública estableció claramente que los cambios de diseño a introducir en el reactor Número Dos, para prevenir la repetición del incendio, podrían resultar prohibitivamente caros. Ambos reactores estaban, en ese momento, encerrados en hormigón y enterrados.

Afortunadamente, las centrales Magnox las instalaciones militares de Calder Hall y Chapelcross y las plantas comerciales del reciente programa civil funcionaban a una temperatura suficientemente alta como para excluir la necesidad de la liberación Wigner. El incendio de Windscale fue un acontecimiento para no repetirse. Para aquellos que se vieron implicados en él, muchos de los cuales se han convertido en figuras de la institución nuclear británica, con una vez ya fue suficiente¹⁴.

En 1959, el Parlamento aprobó la Ley sobre Instalaciones Nucleares (Autorización y Seguro), que creaba la Inspección de Instalaciones Nucleares, responsable de la seguridad de las centrales nucleares de potencia y de los reactores de investigación. La Inspección Nuclear era competente desde el momento en que una central nuclear era solicitada, pasando por su diseño, y construcción, su tiempo de vida útil y, finalmente, su desmantelamiento, como si de hecho fuera un representante técnicamente cualificado del público. La ley también introducía medidas fuertemente restrictivas en cuanto a la responsabilidad frente a terceros en el caso de un incidente nuclear, lo que difícilmente podía considerarse como un voto de confianza a la recién establecida Inspección.

Mientras que la AEA construía Calder Hall y Chapelcross también iba construyendo la remota instalación de Dounreay, en la punta más septentrional de Escocia; el reactor rápido de Dounreay alcanzó criticidad el 14 de noviembre de 1959. Los primeros reactores de las centrales Magnox de la CEBG en Berkeley y Bradwell alcanzaron criticidad en agosto de 1961. El reactor AGR, de 32 MWe, de Windscale, el primero de su género, alcanzó criticidad en agosto de 1962, mientras la AEA continuaba el desarrollo de reactores diferentes. En años posteriores, las centrales de Berkeley y Bradwell iban a resultar los soportes principales del sistema de la CEBG.

En los Estados Unidos, con un proyecto conjunto financiado por la AEC, la Duquesne Power & Light Company of Pennsylvania adquirió la central nuclear de Shippingport, la primera central nuclear de potencia del país. De esta central que utilizaba un reactor naval trasplantado no se esperaba que cubriera costos. Como se indicó en el Capítulo 4 (pág. 138), los Estados Unidos poseían abundancia de petróleo y gas a precios que ciertamente descartaban los costes nucleares, pero estaban decididos a mantenerse a la misma altura del desarrollo nuclear en Europa. La fanfarria en torno a Calder Hall hizo que muchos americanos se sintieran con la mosca detrás de la oreja.

En 1965, la AEC estableció un Programa Cooperativo Conjunto de Demostración de Reactor de Potencia, ofreciendo una sustancial financiación oficial a las empresas en condiciones de unirse a la AEC para construir centrales generadoras de origen nuclear. Pese a los atractivos financieros, la falta de interés de las empresas estaba, en este caso, totalmente justificada. De las primeras centrales experimentales respaldadas por la AEC, solamente sobrevivían los reactores principales de agua ligera Shippingport, Dresden-1, Yankee Rowe, Indian Point-1, Big Rock Point, Humboldt Bay, La Crosse y el pequeño HTGR de Peach Bottom. Todos los demás tuvieron que ser cerrados pronto debido a que no funcionaban, a que costaban demasiado o a que demostraban ser vecinos de poca confianza. Los reactores de Hallam (sodiogradio), CVTR (agua pesada a presión), Piqua (moderador orgánico) y otros tres de agua en ebullición (Elk River, Pathfinder y BONUS)

14

En julio de 1979 volvió a producirse un incendio en un refugio subterráneo de la planta de Windscale, produciendo la contaminación leve de seis empleados y de una zona de varios kilómetros cuadrados. Este acontecimiento se produjo, prácticamente, coincidiendo con una gran polémica nacional en torno a la ampliación de dicha planta.

invirtieron entre su criticidad y su parada un máximo de ocho años y, en un caso (Hallam) sólo dos. En los Estados Unidos, más que en ningún otro país, el período de gestación de la energía nuclear fue dilatado y molesto. Curiosamente, fue el EBR-1 la primera fuente del mundo de electricidad nuclear que sentó los cimientos para los esfuerzos nucleares en los Estados Unidos.

Al EBR-1 se le había dado, por decirlo así, un corazón transplantado; pero el nuevo núcleo se portaba mal. Parecía tener un “coeficiente positivo de temperatura de reactividad”: un incremento en la temperatura del núcleo provocaba un incremento de reactividad, lo que, a su vez, reforzaba el incremento de la temperatura. Por razones obvias, un coeficiente positivo de temperatura como cualquier coeficiente positivo de reactividad presenta problemas de control para un diseño de reactor, si no verdaderos problemas de seguridad. La dirección de la NRTS decidió llevar a cabo, una prueba en el núcleo del EBR-1, Mark II, que incluía la interrupción del flujo del refrigerante de sodiopotasio, lo que haría subir /a temperatura. La prueba se llevó a cabo oportunamente el 29 de noviembre de 1955. Desgraciadamente, cuando el operador fue a parar el reactor, utilizó equivocadamente las barras de control de actuación lenta en lugar de las barras de parada de emergencia. La temperatura del núcleo se elevó por encima de los 1.100o C . El combustible, uranio-235 altamente enriquecido con vaina de acero inoxidable, se reblandeció y derritió, derramándose hasta el fondo de la contención, donde el refrigerante entrante lo solidificaba otra vez formando una campana que recogió la mayor parte del combustible fundido (después se supo que del 40 al 50 por 100 del combustible se había fundido). Las barras lentas detuvieron la reacción, pero el núcleo resultó destruido. Ninguno de los presentes recibió ninguna exposición a la radiación. Tampoco después del accidente se produjo ninguna exposición. Ni siquiera Lewis Strauss, Presidente de la AEC, supo nada de ello, pese a que se podía haber esperado que le interesara.

De no sentirse Strauss interesado por cualquier otra razón, pudiera haber deseado evocar la reunión de un año antes, el 10 de noviembre de 1954, cuyo contenido todavía estaba considerado como secreto por la AEC en el momento de la fusión del EBR-1. Entre los físicos norteamericanos de la máxima categoría presentes en la reunión de 1954 en las oficinas de Detroit Edison, estaban Walter Zinn, diseñador del EBR-1, y Hans Bethe, físico de prestigio internacional. Estaban allí para considerar algunas cuestiones no resueltas acerca de las características de los reactores rápidos. Una de las cuestiones más urgentes se refería a la posible fusión en un núcleo de reactor compuesto de material fusible compacto, como el del EBR-1.

En un reactor térmico, el material fusible se diluye tanto que no es fusible uranio-238, material estructural, moderador, refrigerante más que si la configuración de operación de combustible del reactor se encuentra en el punto óptimo para la reactividad. No puede decirse lo mismo con seguridad, para un núcleo desprovisto de moderador y hecho de materiales fisibles altamente concentrados, como el uranio-235 o el plutonio. Los físicos de la reunión de Detroit Edison tuvieron que admitir que, en la medida de sus conocimientos, un núcleo de un reactor rápido que se fundiera podía colapsarse y adquirir una configuración todavía más reactiva (posiblemente introduciendo tanta reactividad adicional que la inserción completa de las barras de control no sería suficiente para bloquear la reacción en cadena). El resultado podía ser un desbocamiento, un “desmantelamiento”, es decir, una pequeña explosión nuclear.

Las posibilidades de un desbocamiento no podían descartarse. Para algunos de los presentes, la única posibilidad que quedaba podía ser construir el primer reactor de ese tipo, fuese de la potencia que fuese, en un lugar remoto, para minimizar las consecuencias de que algo sucediese incorrectamente. Esto es lo que hicieron los británicos, situando su primer reactor rápido de cierta envergadura en la costa norte escocesa. Pero la Detroit Edison, anfitriona de la reunión, tenía

razones de peso para oponerse a este punto de vista; ya que ellos proponían que la AEC debía ayudarles a construir su central de reactor rápido de potencia no lejos de Detroit. Ellos encerrarían, por supuesto según decían, el reactor en una contención suficientemente robusta como para resistir cualquier explosión posible y confinar cualquier escape de radiactividad. En cualquier caso, un accidente de ese tipo era altamente improbable.

La fusión del EBR-1, sólo un año después, desmontó esa cómoda suposición, pero algunas de las partes más obviamente interesadas no supieron esto hasta unos meses después. Hasta que, el 5 de abril de 1956, el *Wall Street Journal* planteó una pregunta directa sobre la fusión del EBR-1 a Strauss, como Presidente de la AEC, a la que contestó que eso era “nuevo para él”. No fue hasta esa tarde, y a petición personal de Strauss, cuando la AEC emitió una nota de prensa admitiendo que se había producido la fusión. Esto no pudo constituir una noticia especialmente buena para la Detroit Edison, que en ese momento capitaneaba un consorcio de unas treinta y cinco empresas y fabricantes, la Power Reactor Development Corporation, cuyo objetivo era construir para Detroit Edison una central prototipo de reactor rápido de potencia. El Comité Consultivo para la Salvaguardia de los Reactores ACRS pudo haber tomado nota del episodio del EBR-1; el 6 de junio de 1956 emitió un informe declarando que no se sabía lo suficiente para garantizar la seguridad pública si una planta así fuese a funcionar cerca de un núcleo urbano. Todavía, y de buen grado, la Cooperación para el Desarrollo el Reactor de Potencia acordó formalmente con AEC, el 4 de agosto de 1956, la solicitud del permiso de construcción para una central de reactor rápido, de 300 MWe, a ubicarse en Lagoona Beach, en el Lago Erie, cerca de Monroe, en Michigan, a medio camino entre Detroit y Toledo (a unos cuarenta kilómetros de estas ciudades de Ann Arbor, y a unos cincuenta kilómetros de Windsor, en Ontario, al otro lado de la frontera canadiense). La central propuesta iba a llevar el nombre del creador del primer reactor, Enrico Fermi.

La proyectada central Fermi, no contaba con el entusiasmo de los habitantes de las ciudades de alrededor. Si hubieran conocido las dudas expresadas por el ACRS, todavía se habrían mostrado menos satisfechos. Pero el escéptico informe no se hizo público; por el contrario, de acuerdo con el congresista Chet Holifield, del JCAE, fue inmediatamente eliminado. Teniendo en cuenta sus pronunciamientos posteriores es difícil de creer, pasados veinte años, que la oposición a la construcción de la planta Fermi fuera urgida por Holifield, por su colega en el JCAE, Senador Clinton Anderson, y por el delegado a la AEC, James Ramey. Pero ese fue, realmente, el caso. Anderson llevó a cabo una campaña por teléfono para conseguir que la United Auto Workers, bajo el liderazgo de Walter Reuther, emitiera una prohibición para impedir la construcción de la planta Fermi. Reuther encargó a su lugarteniente, Leo Goodman, que dirigiera la oposición y Goodman, a su vez, persuadió a Reuther de que apoyara el desafío a la Detroit Edison con 350.000 dólares de los fondos de la Unión.

La primera Conferencia de Ginebra sobre Utilización Pacífica de la Energía Atómica, en 1955, ya había abordado el intrincado tema de la seguridad de los reactores. El 6 de julio de 1956, a petición del JCAE, la AEC ordenó preparar a un equipo de sus expertos, la mayoría de ellos del Laboratorio Nacional Brookhaven, un detallado análisis de las posibilidades y las implicaciones para la salud pública de los accidentes de reactor. El JCAE se preocupó por la incertidumbre sobre la responsabilidad, en caso de accidente, de las empresas que construyeran centrales nucleares. El análisis, codificado como el documento WASH-740; llevaba el título de “*Posibilidades y Consecuencias Teóricas de Accidentes Graves en Centrales Nucleares de Gran Potencia*” y fue publicado en marzo de 1957. Aparentemente, la AEC esperaba que el informe, que incidía en la extrema improbabilidad de tales accidentes, ayudaría a apaciguar el clamor existente en el extremo occidental del lago Erie. Si así era, las expectativas de la AEC se extraviaron dramáticamente. Por determinadas razones, los lectores profanos se veían inclinados a despreciar las estimaciones del

WASH-740 que señalaban que la probabilidad de un accidente grave estaba en 1 posibilidad entre 100.000 y 1 entre 1.000 millones por reactor-año. Ya que las estimaciones estaban basadas en una casi total falta de experiencia real de funcionamiento, su capacidad para impresionar a los lectores puede considerarse inapreciable. Lo que si atraía la atención era la dimensión de las consecuencias de que ocurriera uno de esos, al parecer, altamente improbables acontecimientos: en el peor de los casos, 3.400 muertos, 43.000 heridos y daños a la propiedad por 7.000 millones de dólares. Este “accidente máximo creíble”, como se llamó, ocurría bajo estos supuestos: el reactor era de, como máximo, 200 MWe de potencia y su núcleo, próximo al momento de recarga, y como consecuencia, conteniendo la cantidad mayor de productos de fisión; estaba situado a cincuenta kilómetros de una ciudad con una población de un millón de habitantes; el accidente contemplaba una brecha en la contención del reactor suficiente para dejar escapar la mitad de las existencias de productos de fisión del núcleo hacia el entorno exterior, en un momento en que el viento llevaría la nube radiactiva en la dirección del centro de la población. Pero esta combinación de circunstancias, que llevaban a unas estadísticas tan aterradoras, no era lo peor que podía producirse, presumiblemente.

La rama de investigación y desarrollo de la Power Reactor Development Corporation encargó al Instituto de Investigación e Ingeniería, de la Universidad de Michigan, la preparación de un análisis con un informe esencialmente similar al del grupo de Brookhaven. El estudio del Instituto, concentrado específicamente en la propuesta de la Detroit Edison, se publicó cuatro meses después del WASH-740, en julio de 1957; su contenido convertía el WASH-740 en una lectura relajante, para leer en cama. A diferencia del WASH-740, este estudio consideraba una rotura completa de la contención del reactor, posiblemente acompañada de una explosión, de manera tal que todos los productos de fisión del núcleo fueran expulsados al aire. En cuanto a las condiciones climatológicas, se consideró la inclusión de inversión de temperatura, impidiendo la mezcla vertical del aire, y de un viento soplando suave y persistentemente en la dirección de Detroit. Sobre esta base, el estudio estimó que 133.000 personas podrían recibir dosis de radiación de por lo menos 4.540 roentgens, lo que se considera fatal; 181.000 podrían recibir de 150 a 450 roentgens, ocasionando heridas inmediatas; y 245.000 podrían recibir de 25 a 150 roentgens, capaz de producir daños a largo plazo o alteraciones genéticas. Los autores del estudio, comprensiblemente, no hicieron ningún intento, después de esto, de evaluar los daños materiales.

Como el WASH-740, el estudio del Instituto ponía el acento en que un accidente así era, en realidad, de muy remota probabilidad. Esta cualidad voluntaria de remoto, no obstante, unida a las cifras astronómicas que, sin embargo, se producirían, planteó al sector de seguros un interrogante sin precedentes. Precisamente, esta incertidumbre había empujado al JCAE a encargar la preparación del WASH-740. Pero no esperaron a verlo, muy pronto después de haberlo encargado, dos miembros del Comité, Melvin Price y Clinton Anderson, presentaron un proyecto de ley ante las dos Cámaras del Congreso que, durante dos décadas, ha figurado en los anales nucleares, uniendo sus nombres, como la Ley Price-Anderson.

La Ley Price-Anderson fue promulgada en 1957. Su objetivo era claro, así como sus previsiones. En esencia, equivalían a esto: “las empresas privadas no construirán ni manejarán centrales nucleares si pueden ir a la bancarrota, debido a las reclamaciones a consecuencia de un accidente grave de reactor. Por esto, dejemos a las empresas que se informen de la contratación con aseguradores privados, del máximo de cobertura que puedan dar frente a la garantía nuclear contra terceros. Por otra parte, el gobierno aportará 500 millones de dólares adicionales de los fondos federales. Más allá de esta cantidad total no habrá garantía financiera adicional”. Esto significa que, en el caso de los 7.000 millones de dólares en daños materiales, considerados como la peor situación posible por el WASH-740 que podía darse en un día negro, estaría disponible un máximo de mientras lo aportara 500 millones de dólares del Gobierno, más de 60 millones de dólares de los

aseguradores privados. Las reclamaciones por los 6.440 millones restantes no se tendrían en consideración.

A pesar del WASH-740, la Ley Price-Anderson unida a la velada amenaza de que la propia AEC entraría en el sector de la producción de electricidad persuadió a la Commonwealth Edison, la Consolidated Edison, la Pacific Gas & Electric, y otras importantes empresas a dar sus primeros pasos por la senda nuclear. En asociación con la AEC, comenzaron la construcción de la primera generación de los que llegarían a ser los reactores más vendidos del mundo, el de agua a presión y el de agua en ebullición. El BWR de Dresden-1 alcanzó criticidad en octubre de 1959, el PWR de Yankee Rowe, en agosto de 1960 y el PWR de Indian Point-1, en agosto de 1962.

Al final de los años 50, la experiencia nuclear no trascendía la propiedad exclusiva de las naciones con armamento nuclear y sus aliadas de la Segunda Guerra Mundial. Sin duda, el tráfico internacional de ese tipo, relativo a temas nucleares, tuvo un difícil comienzo. Erase una vez, y resumiendo, una Comisión de Energía Atómica de las Naciones Unidas. Fue creada por la Asamblea General, en enero de 1946, por la primera resolución de la ONU referida a energía nuclear. Sin embargo, ni duró mucho ni cumplió mucho. Después el 8 de diciembre de 1953, cuando se suavizó la Guerra Fría, el presidente Eisenhower se dirigió a la Asamblea General declarando que era el momento de crear un nuevo órgano internacional, bajo la ONU, dedicado a la idea de “Átomos para la Paz”: la *International Atomic Energy Agency - IAEA* (Organismo Internacional de la Energía Nuclear, OIEA).

La aprobación de un borrador de Estatuto para el Organismo no se produjo hasta el 26 de octubre de 1956. Entre las cuestiones espinosas se incluía el tema de control del material fisible, las disposiciones mediante las cuales los inspectores del Organismo iban a desarrollar este control y, en general, el conjunto del denso tema de las “salvaguardias”: las garantías que permitirían asegurar que los “átomos para la paz” lo seguirían siendo. Tendremos más que decir sobre esta crítica consideración en los Capítulos 9 y 10.

Otras actividades del Organismo, quizás menos cruciales pero también menos controvertidas, se abrieron camino mucho mejor. La primera Conferencia de Átomos para la Paz de Ginebra, en 1955, fue seguida por otra en 1958 y otras dos posteriores, en 1964 y 1971, celebrada cada una con más éxito que su precursora, en cuanto al intercambio de información técnica y al mutuo entusiasmo. El cuartel general en Viena se convirtió en una importante cámara de intercambio para las actividades nucleares internacionales, y en una vigorosa propagandista de los beneficios que producirían para todos. En diciembre de 1957, bajo los auspicios de la Organización para la Cooperación Económica Europea - OCEE), dieciocho países europeos formaron la Agencia Europea de Energía Nuclear (AEEN), para impulsar el desarrollo conjunto y la armonización de las aplicaciones civiles de la energía nuclear. En su momento, estableció tres proyectos conjuntos: el proyecto “Dragón”, el proyecto de reactor de agua pesada en ebullición de Halden, en Noruega, y la instalación de reprocesamiento de combustible Eurochemic, de Mol, en Bélgica. Se promovieron intercambios de información científica y técnica, se formaron grupos internacionales de trabajo de expertos, para estudiar áreas especializadas, y los esfuerzos empezaron a coordinar la legislación nuclear y la protección radiológica. En 1960, la OCEE se convirtió en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), comprendiendo también a los Estados Unidos, Canadá y Japón. Cuando Japón se convirtió en un miembro de pleno derecho, la AEEN perdió el “Europea” para convertirse en Agencia de Energía Nuclear (AEN) de la OCDE (NEA).

La primera asociación económica importante de la postguerra en Europa fue la Comunidad Europea del Carbón y del Acero, cuyas actividades sentaron los cimientos para la Comunidad Económica

Europea. Los países de la que iba a ser pronto la CEE decidieron establecer una empresa conjunta, imitando la Comunidad del Carbón y del Acero, que llamaron Euratom. No obstante, el grandioso programa de investigación, desarrollo y administración internacional de temas nucleares resultaba ineficaz cuando se enfrentaba a los obstinados intereses nacionales.

Más bien, el aspecto internacional de la actividad nuclear se inició sobre una base esencialmente bilateral, entre parejas de países que podían ver ventajas recíprocas en el intercambio de información y tecnología. Buena parte del impulso inicial de tales intercambios procedió, bien extrañamente, de los intereses norteamericanos, que consideraban que otros países con déficit de energía podían suponer un mercado aprovechable. Esto fue, en parte, el aspecto que apresuró las inversiones, de otra manera ruinosas, en centrales nucleares en el interior de los Estados Unidos; los compradores extranjeros, se pensó, opondrían reservas para encargar una tecnología todavía no dominada en el mercado interno norteamericano.

Los Estados Unidos apoyaron el desarrollo nuclear extranjero mediante el suministro de uranio enriquecido a precios mínimos y la asistencia técnica; en algún caso, esta última resurgió, como consecuencia, en la forma de un vigoroso desarrollo propio de reactores de agua a presión y en ebullición, como en Suecia, Alemania Occidental y Suiza, de tal manera que las firmas europeas más importantes resultaron una dura competencia para la industria americana. Alemania Occidental fue la primera nación sin armamento nuclear en poner en marcha una central nuclear de potencia, un BWR de 15 MWe en Grosswelzheim, en noviembre de 1960. Mientras tanto, Gran Bretaña vendió dos reactores Magnox al exterior, a Italia y a Japón. La central Magnox de Latina alcanzó criticidad en diciembre de 1962, y la central Magnox de Tokai Mura, en mayo de 1965. Estos fueron los únicos reactores británicos de potencia que encontraron compradores extranjeros. En Suecia, la central de potencia de 12 MWe, de Agesta, empleando un reactor de agua pesada a presión, de diseño sueco, alcanzó criticidad en julio de 1963.

Canadá y Gran Bretaña habían experimentado los primeros accidentes serios de reactor en una etapa ingratamente temprana de los programas de desarrollo: no así los Estados Unidos, que durante casi dos décadas sólo sufrieron errores menores relativos a los reactores. El accidente de fusión del núcleo del EBR-1, Mark II, no era, en absoluto, trivial, pero sólo produjo una pequeña exposición al personal. Otros accidentes incluyeron la destrucción del reactor experimental BORAX, en 1954, el daño al combustible en uno de los reactores de producción de Hanford, la fusión de combustible en uno de los reactores de producción de Hanford y la fusión del combustible en el Experimento de Transferencia de Calor en el Reactor, en el Experimento del Reactor de Sodio y en el Reactor de Prueba Westinghouse. El daño era, en varios sentidos, costoso, como era la limpieza. Pero todos estos vanados episodios, mientras no se repitieran en su diversidad y frecuencia, resultaban, en definitiva, pequeños.

El primer accidente grave de reactor en los Estados Unidos, cuando finalmente se produjo, no resultó solamente grave, sino desagradable. El 3 de enero de 1961, a las 4 de la mañana, John Byrnes, Richard McKinley y Richard Legg, tres técnicos jóvenes, estaban de servicio en el Reactor Estacionario de Baja Potencia no. 1, (SL1), en el NRTS de Idaho. El SL1 era un prototipo militar de central nuclear de potencia, de 3 MWt. Había sido parado por revisión en la instrumentación y se habían desconectado los accionadores de las barras de control. Byrnes, McKinley y Legg habían estado numerando estos accionadores para rearmarlos. Esto exigía que la barra central de control estuviese elevada exactamente diez centímetros y conectada al mecanismo de control remoto, un procedimiento correcto que los tres habían seguido muchas veces. Nadie sabe exactamente lo que sucedió el 3 de enero de 1961. La reconstrucción posterior de los cuatro segundos fatales indicó que la reposición había sido efectivamente completa. Sin embargo, por razones que permanecerán

siempre desconocidas descuido, quizás broma la barra central de control número 9 fue extraída del núcleo. El informe oficial de los investigadores de la AEC sugirió que la barra de control estaba bloqueada y que Lee y Byrnes intentaron levantarla manualmente. Cuando quedó suelta se alzó no simplemente diez centímetros, sino casi cincuenta. El resultado fue catastrófico. El núcleo, casi instantáneamente, se hizo supercrítico, el combustible se puso a hervir y la explosión de vapor resultante lanzó al lecho del reactor un proyectil de agua prácticamente sólida. La vasija del reactor se levantó tres metros en la vertical, a través de la tapa. Legg y McKinley murieron instantáneamente; el cuerpo de McKinley se incrustó en la estructura del techo, lanzado por un casquete de barra de control. Byrnes fue derribado por una ráfaga seca de radiación. Los sistemas automáticos de alarma alertaron a los equipos de emergencia, pero aún antes de que llegaran al reactor sus dosímetros de radiación marcaban fuera de escala, más de 500 roentgens por hora, que es un nivel letal de radiación. El nivel incluso dentro del edificio del reactor era aún más alto, ruds de 800 roentgens por hora. Pese a todo, dos hombres penetraron en los escombros y rescataron a Byrnes. Pero Byrnes murió en la ambulancia en camino hacia el hospital de Idaho Falls.

La recuperación de los otros dos cadáveres del interior del reactor fue una operación dilatada y difícil, y hubo de llevarse a cabo con equipos de manejo remoto. En la operación de rescate de emergencia otros catorce hombres recibieron dosis de radiación de más de 5 roentgens, y algunos de ellos, bastante más. Los tres cadáveres permanecieron tan radiactivos que pasaron veinte días antes de que pudieran ser manejados para su inhumación; hubieron de ser enterrados en ataúdes revestidos de plomo colocados en unos nichos revestidos, a su vez, de plomo. Hasta muchos meses después al nivel de contaminación en el edificio del SL1 no descendió lo suficiente como para permitir la investigación de lo que había sucedido.

Otro reactor militar pudo haber estado envuelto en un desastre todavía más serio, dos años después (nadie podrá nunca estar seguro). El vicealmirante Hyman Rickover, un ordenancista intransigente, dirigía la oficina de Reactores Navales de la AEC con celo autocrático. Rickover era uno de los más duros clientes con el que pudiera tratar cualquier fabricante nuclear. Su actitud sobre el control de calidad rayaba en el fanatismo, lo que es, en el contexto, de los reactores nucleares, acertado y razonable. Pese a ello, en abril de 1963, el *USS Thresher*, un submarino nuclear con 112 marineros y 17 civiles a bordo, hizo una prueba de inmersión profunda a unos 330 kilómetros de la costa, frente a Cape Cod, y nunca volvió a la superficie. Hasta of momento, resulta incierto lo que fue del *Thresher*; en una nave de esa complejidad son innumerables las posibilidades de avería. A algunos observadores cualificados no les cabe duda de que el *Thresher* sufrió un accidente de reactor, basándose en las características de los fragmentos de restos que se dijo que hablan sido recuperados. En cualquier caso, las posibles razones de la desaparición fueron avanzadas por el mismo almirante Rickover, tanto antes como después del suceso. El almirante se lamentaba insistentemente de los problemas repetitivos con los constructores y suministradores de la Marina: dirección alejada de los diseñadores y trabajadores de tierra, supervisión e inspección inadecuadas, fallo en los plazos, fallos en la determinación de características hasta el punto, incluso de emplear materiales inadecuados fracaso en completar correctamente las tareas, fracaso en el descubrimiento de otros fallos, debido a las chapuceras pruebas de mantenimiento, etc. El almirante Rickover, testificando en las audiencias de 1964 sobre la pérdida del *Thresher*, reveló que una inspección inmediatamente anterior al viaje fatal localizó tantas soldaduras defectuosas en los sistemas de tuberías críticas que resultaba evidente que “el barco tenía varios cientos de juntas incorrectas cuando se hizo por última vez a la mar”. La pérdida del *Thresher* subrayó las implicaciones de un insuficiente control de calidad en los sistemas nucleares, tanto militares como civiles, qua era un problema qua iba a hacerse permanente.

Desde 1954 en adelante, la AEC ejerció dos funciones señaladas por la Ley de Energía Atómica, que estaban radicalmente en conflicto. Por una parte, estaba encargada del manejo de sus propias

instalaciones nucleares y de la promoción de las demás; por otra, era la única responsable de la definición y reforzamiento de la reglamentación sobre la seguridad del personal y del público frente a la energía nuclear y las radiaciones. En marzo de 1961, para facilitar una actitud exterior más comprensiva, la AEC se dividió a sí misma, arbitrariamente, en dos. Una sección se encargaría de las funciones de manejo y promoción y la otra, de las funciones de autorización y reglamentación. Aunque esta estructura estuvo vigente durante trece años, cada vez fue más criticada. La separación nominal de las actividades de promoción y reglamentación dejaba sin convencer a muchos observadores, especialmente después del surgimiento de las actividades nucleares privadas, que comenzaron en 1963.

En diciembre de 1963, la New Jersey Central Power & Light Company anunció que iba a encargar a General Electric un reactor de agua en ebullición de más de 500 MWe (más de dos veces la potencia de cualquier central nuclear anterior); esta central, a construir en Oyster Creek, no contaría con asistencia federal. Parecía que la energía nuclear había encontrado por fin el punto de inflexión económica profetizado durante tanto tiempo. El pedido de Oyster Creek inició un goteo que iba a convertirse en inundación.

La Southern California Edison encargó el reactor de agua a presión de 430 MWe de San Onofre, que se convirtió en marzo de 1964 en el primero de la nueva generación de centrales en recibir permiso de construcción. La Connecticut Yankee Atomic Power encargó el PWR de Haddam Neck, la Commonwealth Edison añadió un segundo BWR a su central de Dresden; la Niagara Mohawk Power Corporation encargó el BWR de Nine Mile Point, la Rochester Gas & Electric encargó el PWR de Robert Emmet Ginna; la Connecticut Light & Power encargó el BWR de Millestone; la Consumers Power of Michigan encargó el PWR de Palisades. Commonwealth Edison, en ese momento a punto de convertirse en la sociedad con más potencia nuclear del país, añadió un tercer BWR, el Dresden3, gemelo al Dresden2, y continuó con una nueva central no lejos de allí, la de Quad Cities-1 y 2. A mediados de 1965, el aumento de los pedidos de centrales nucleares en los Estados Unidos se aceleró notablemente. En el momento en que la central de San Onofre había alcanzado su máxima potencia, en enero de 1968, los pedidos de centrales nucleares totalizaban una potencia de casi 50.000 MWe, y el ritmo era, si cabe, más febril; otros 22.000 MWe fueron encargados en 1968.

Estos pedidos no se encontraron, ni mucho menos, con la bienvenida de los vecinos que estaban destinados a hacer de anfitriones. Desde 1961 en adelante, empezaron a surgir movimientos de desconfianza por todos los lugares, simbolizados por la oposición a la central Enrico Fermi. El 12 de junio de 1961, el magistrado Brennan, del Tribunal Supremo, hizo público el veredicto de la mayoría del Tribunal en favor de la confirmación para la Cooperación para el Desarrollo del Reactor de Potencia de la licencia para construir la primera central de reactor rápido, Enrico Fermi-1; la decisión no fue, de ninguna manera, unánime, con el hiriente disenso de los magistrados Douglas y Black. Pero el AEC y la Cooperación para el Desarrollo del Reactor de Potencia consiguieron su luz verde, con las consecuencias que describiremos muy pronto. Mientras tanto, en el verano de 1961 otra confrontación se convirtió en nuclear. Durante más de dos años, la Pacific Gas & Electric Company (PG&E) había ido adquiriendo silenciosamente terrenos en Bodega Head, a unos ochenta kilómetros al norte de San Francisco. La oposición local, que ya era obstinada, se hizo todavía más vehemente cuando, a mediados de 1961, la PG&E anunció que la central proyectada iba a ser nuclear. Hasta ese momento, el principal punto de objeción había sido la conservación de la naturaleza; pero ahora, una dimensión notablemente distinta aparecía en el debate: el emplazamiento se encontraba a sólo 300 metros de la conocida falla de San Andrés, la fuente de terremotos más prolífica del país, incluyendo entre sus récords el terremoto de 1906 que casi borró del mapa a San Francisco. La idea de situar un reactor nuclear, con su terrible contenido

de radiactividad, sobre una zona sísmica pareció a mucha gente un ejemplo de temeridad rayano en lo lunático.

La PG&E insistió en que su reactor y su contención resultarían suficientemente fuertes como para disipar cualquier temblor concebible. Hacia 1963, la sociedad había comenzado a excavar los cimientos, pese a que la oposición local, dirigida por un abogado y miembro del Sierra Club llamado David Pesonen, seguía vehementemente el desarrollo de la obra a través del proceso de autorización. En octubre de 1963, los inspectores del US Geological Survey (Servicio Geológico) aparecieron en escena, examinando una falla recientemente descubierta a través de la propia excavación. Pero la PG&E se empeñó en su afirmación de que el emplazamiento era adecuado y que su diseño podría evitar todos los obstáculos. Entonces, según iba haciéndose más acalorado el debate, el PG&E anunció, el 30 de octubre de 1964, que iba a abandonar sus planes, señalando que ellos “serían los últimos en desear la construcción de una central existiendo cualquier tipo de duda sustancial con respecto a la seguridad del público”. Una década después la totalidad de Bodega Head permanece como un monumento a la confianza de 1963, que se convirtió en la duda de 1964.

La Consolidated Edison, asimismo, arrinconó sus planes para una central nuclear en Ravenswood, en Queens, ciudad de Nueva York; los planes, anunciados el 10 de diciembre de 1962, encontraron una feroz oposición y obligaron a David Lilienthal, el primer presidente de la AEC, a declarar que él “no soñaría en vivir en Queens si se situaba allí una gran central nuclear”. A principios de 1964, la Consolidated Edison cambió los planes (al menos, *pro tem*). En la otra costa, el proyecto de la PG&E de una central nuclear en la famosa playa de Malibu fue retirado después del colérico clamor popular.

La central de Enrico Fermi-1, no obstante, fue tomando poco a poco forma al sur de Detroit, y alcanzó criticidad en agosto de 1963. Después de esto, una sucesión de problemas la mantuvo bastante alejada de sus valores nominales, de diseño, cuando no estaba totalmente parada. Dilataciones y distorsiones del combustible, corrosión del sodio en el núcleo, problemas con el mecanismo de manejo del combustible y problemas sin fin con los generadores de vapor elevaron los costes por las nubes y mantuvieron la producción eléctrica a nivel de goteo. Al fin, pese al estrépito en los generadores de vapor, pareció que habían sido doblegados; los operadores se prepararon para arrancar el reactor. El 4 de octubre de 1966, las barras de control fueron extraídas del núcleo poco a poco y la temperatura del refrigerante de sodio empezó a aumentar. Se mantuvo el reactor a un bajo nivel de potencia durante toda la noche; la mañana siguiente, 5 de octubre, empezó la subida de potencia. Un fallo de válvula ocupó la mañana; desde la hora de comer hasta las 3 de la tarde el nivel de potencia se había elevado hasta 20 MWt, con otra interrupción para resolver un fallo de bomba. Un momento antes de las 3, el operador del reactor advirtió que un monitor de neutrones enviaba señales erráticas desde el núcleo. Conmutó de control automático a manual. Cuando cesó la señal errática recomenzó la subida de potencia. Cinco minutos más tarde, a 34 MWt, la anomalía se dejó ver otra vez. Otros instrumentos parecían indicar una extracción de las barras de control superior a la normal y temperaturas sorprendentemente altas en dos puntos del núcleo. Pero antes de que los empleados de la sala de control pudieran resolver lo que estaba sucediendo, las alarmas de radiación empezaron a sonar.

A 3,20 de la tarde, se insertaron seis barras de parada de emergencia para apagar el reactor, y los responsables de la central supieron de donde venía la radiación y por qué el reactor se comportaba de forma rara. Se descubrieron muestras del refrigerante de sodio y del gas argón de la tapa cargadas con productos de fisión altamente radiactivos. Evidentemente por razones totalmente desconocidas parte del combustible del núcleo, se había fundido.

Las implicaciones de esta situación eran extremadamente ominosas. El reactor Fermi era un reactor rápido: su núcleo era un cilindro compacto de solamente 75 centímetros de alto y de 75 centímetros de diámetro, el tamaño de un tambor de bajos, que estaba diseñado para producir más de 200 MWt (es decir, tanto como, 200.000 estufas eléctricas de una resistencia). Para conseguir esta tremenda energía, sus delgadas varillas de combustible, 14.700 en total, hechas de uranio enriquecido al 28 por 100 y con vaina de acero, inoxidable, tenían que estar alineadas meticulosamente, con tolerancias de no más de un milímetro, o cosa parecida, entre ellas. Además, esta configuración tenía que mantenerse a una temperatura de más de 400oC mientras estaba sumergida en un torrente entrante de sodio líquido que pasaba a través de minúsculos canales entre las varillas. Cualquier alteración de la geometría en el núcleo del Fermi podría impedir el flujo del refrigerante, conduciendo a expansiones térmicas desequilibradas y a alteraciones sucesivas.

La geometría del núcleo tenía otra característica crucial común a los reproductores rápidos. A diferencia de un reactor térmico, cuyo combustible está dispuesto normalmente en una geometría óptima para maximizar reactividad, un reactor rápido dispone su combustible con una configuración que puede estar lejos de la reactividad teórica máxima que puede proporcionar. Si el núcleo del Fermi había sido alterado y fundido podía, como consecuencia, ser susceptible de variaciones locales de reactividad destellos, calientes intensos, que podían llevar, por su parte, a reacciones químicas entre el combustible, el envainado y el refrigerante, e incluso a explosiones químicas violentas. Esas explosiones químicas, rebotando en una masa, que se desploma de combustible fisible altamente enriquecido, podían incluso ocasionar una explosión nuclear en todo el sentido de la palabra.

Nadie en la central Fermi tuvo la menor idea eficaz de lo que había que hacer. Cualquier intento de entrar en el reactor; con el sistema habitual de control remoto podía alterar el precario equilibrio del núcleo roto. Un embotamiento absoluto se destacó de la incertidumbre que torturaba los nervios: no debía hacerse nada de forma apresurada. Debido a una de esas ironías que parecen abundar en la historia nuclear, el aterrador resultado del que algunos ciudadanos de Detroit habían advertido durante todo el proceso hasta el Tribunal Supremo, había estado a punto de producirse.

Cuando se tuvo conocimiento de las dimensiones exactas del accidente, se lanzó una alerta a la policía local y a las autoridades de la defensa civil para que prepararan la evacuación de emergencia de Detroit y otras ciudades. Por lo menos, ésto dicen algunos de los que recibieron la alerta. La información oficial no deja evidencia de esta alerta, la única forma de conciliar los relatos contradictorios es suponer que se dió, como consecuencia, una orden para borrar todo rastro de ella. Sea como fuese, la dirección de la central Fermi dejó pasar algunas semanas antes de su primer y cauteloso intento de investigación del núcleo. Finalmente, después de casi un año, averiguaron, a través de una sonda hecha especialmente para trabajar con la opacidad del sodio, que algo estaba, errando en el fondo del reactor. Cuando los ingenieros de la Fermi se encontraron con aquello, se pusieron furiosos.

Unos años antes, cuando todavía el ACRS se mostraba confuso sobre la solicitud de la Detroit Edison, éste había dedicado mucha atención a la posibilidad de una fusión del núcleo en ese tipo de reactor. Especialmente, temían que una fusión provocara que el material fisible concentrado se desplomara y diera lugar a un conjunto crítico rápido. Un aumento rápido de reactividad y la emisión resultante de energía podía reventar la contención del reactor y desparramar su radiactividad por todo el entorno. Esta posibilidad se hizo tan persistente que el ACRS cuando estaba el reactor en su fase final de construcción exigió una precaución especial de seguridad para

prevenir el derrumbamiento de la mesa del combustible desde su estructura para formar una masa, concentrada en la parte central de la contención, bajo el núcleo. Ordenaron que se construyera una pirámide metálica en el piso de la contención con el fin de que el combustible fundido pudiera desplazarse desde los lados y se extendiera. Los ingenieros que construían el reactor protestaron enérgicamente por obligárseles a añadir este elemento extraño por una idea de última hora. Cuando se hizo así los ingenieros protestaron. Uno de los seis triángulos de circonio que formaban la cubierta de la pirámide del “sujetador del núcleo” no estaba anclado con seguridad. En algún momento, el flujo entrante de sodio líquido levantó este triángulo de circonio, de unos veinte centímetros de longitud y lo desplazó en el cuidadosamente alineado núcleo, bloqueando parcialmente el flujo de sodio. La temperatura de las varillas de combustible, refrigeradas inadecuadamente, aumentó, las varillas se fundieron, deformando otras varillas y, además, obstruyendo los pasillos de refrigeración con la distorsión progresiva del conjunto que afortunadamente no llegó, por muy poco, a la fusión completa.

Nadie está suficientemente seguro de lo que podría haber sucedido de no haber sido así. Una posibilidad fue sardónicamente calificada como el “Síndrome de China”. La masa fundida del combustible altamente radiactivo, generando su propio y tremendo calor; y descartada toda esperanza de refrigeración o de control podía abrirse paso a través de toda la contención y el suelo, hasta los cimientos del reactor; hundiéndose, quemando y explotando mientras se dirigía hacia China. El derrame consecuente de radiactividad admitiendo que el accidente hubiera abierto un camino hacia el entorno, convertiría al lugar en una tierra de nadie para siempre.

Sin embargo, no sucedió así. Por muy poco.

En Gran Bretaña, los cuatro reactores de las centrales Magnox de Berkeley y Bradwell, habían alcanzado plena potencia en la segunda mitad de 1962 y se estaban convirtiendo en los principales soportes de la red de la CEBG. La central de Trawsfynydd siguió muy de cerca a la de Hinkley Point A, alcanzando plena potencia a principios de 1965; les siguieron Dungeness A y Sizewell A, a principios de 1966. La central de Oldbury, encargada a principios de 1961, estaba a medio construir a principios de 1965, cumpliendo las previsiones; la central gigante de Wylfa, encargada a mediados de 1963, iba avanzando algo más lentamente. Más allá de la línea de separación, la única central de Escocia, la de Hunterston A, había alcanzado plena potencia a finales de 1964. La contribución nuclear al abastecimiento británico de energía eléctrica, en ese momento había adelantado, con mucho, a cualquier otra parte del mundo, incluyendo los Estados Unidos.

Pero el modelo Magnox parecía haber llegado al final de su camino; el coste de capital asociado a los enormes reactores de Wylfa no resultaba atrayente y otros modelos más compactos, utilizando uranio enriquecido, parecían ahora más prometedores: especialmente, el reactor norteamericano de agua a presión, el de agua en ebullición y el reactor británico avanzado y refrigerado por gas, del que solamente existía, en ese momento, el prototipo de 32 MWe de Windscale. A finales de 1964 la misma CEBG estaba dispuesta a encargarse de una segunda generación de centrales nucleares, para suceder a la serie Magnox.

Tres grupos industriales distintos estaban preparados para ofertar; se trataba de dos versiones del AGR, el PWR en asociación con Westinghouse o el BWR en asociación con General Electric, respectivamente. El tercer grupo, capitaneado por Atomic Power Constructors, ofreció un modelo AGR muy semejante al de la UKAEA, y forzando las tolerancias al límite estaba en condiciones de persuadir a la CEBG y al gobierno de que su oferta era, con mucho, la más favorable. El 25 de mayo de 1965, el Ministro de Energía informó a la Cámara de los Comunes que el segundo programa de energía nuclear estaría basado en el modelo AGR. En el verano de 1965, la Atomic

Power Constructions ganó el contrato para construir Dungeness B, la primera central AGR de reactores gemelos, próxima a la fiable central Magnox de Dungeness A.

Las consecuencias fueron traumatizantes para la industria nuclear británica. La Atomic Energy Constructions se reveló incapaz de habérselas tanto con los problemas de organización como con las agudas dificultades de ingeniería y, en su momento, cerró. Los contratos para las centrales AGR, de reactores gemelos, de Hinkley Point B y Hunterston B, fueron adjudicados a The Nuclear Power Group, uno de los otros dos consorcios; la British Nuclear Design and Constructions recibió el encargo para las centrales de Hartlepool y Heysham. Los contratos eran todos “llave en mano”, por los que los constructores fijaban un precio para la central completa por el cual había que traspasarla a la empresa eléctrica lista para funcionar. En el momento en que escribe esto, ninguna de las cinco centrales AGR ha alcanzado todavía criticidad, y mucho menos, ha producido energía¹⁵. Se espera que Dungeness B necesite más de diez años para completarse, y ninguna de las centrales se espera que estén dispuestas para funcionar a su plena potencia nominal. El arranque en cabeza británico en energía nuclear civil se fundamentó tan erróneamente en las AGR que no se ha vuelto a recuperar. El resultado final todavía está sin resolver.

En Suecia el reactor de agua pesada a presión de 10 MWe de Agesta, diseñado y construido por la firma sueca ASEA, alcanzó criticidad a mediados de 1963, y alcanzó plena potencia a principios de 1964. Se pretendió que fuera el precursor de una serie de reactores de potencia de diseño sueco de agua pesada; pero el primer sucesor a gran escala, el reactor de Marviken, en Norrköping, nunca alcanzó criticidad. Las sucesivas modificaciones no consiguieron vencer las desfavorables características del núcleo, lo que obligó a los constructores, como consecuencia, a abandonar el proyecto. Se construyó una central térmica de combustible fósil para mover el turbogenerador, incitando a los lugareños a apodarar la planta de Marviken como “la única central nuclear del mundo movida por petróleo”. Afortunadamente para la ASEA, ya habían desarrollado un reactor autóctono de agua en ebullición; la central de Oskarshamn1 fue encargada en 1965, iniciándose su construcción en 1966 y alcanzando criticidad a finales de 1970.

También Suiza, inició sus primeros pasos hacia la energía nuclear con un modelo propio y con resultados igualmente desgraciados. El reactor de Lucens, primer reactor nuclear suizo, era un modelo experimental, un reactor de tubos de presión refrigerado por dióxido de carbono y moderado por un tanque de agua pesada. Por un rasgo de lo que resultaría ser singular previsión, fue construido en una cueva, bajo una colina.

El reactor de Lucens alcanzó criticidad en diciembre de 1966; necesitó unos dos años. Después de conseguir su potencia nominal de 30 MWt, el 9 de septiembre de 1968, funcionó a unos 7,5 MWe hasta el 24 de octubre, cuando se paró según lo previsto para tareas de rutina. El reactor volvió a arrancar el 21 de enero de 1969. El incremento de potencia se inició a las 4 de la tarde. A las 5,20, con el reactor en un nivel de potencia de 12 MWt. los monitores de radiación y los detectores de cambio de presión, pararon bruscamente el reactor y cerraron las válvulas de ventilación, mientras la cueva del reactor se llenaba de radiactividad. Afortunadamente, la cueva estaba aislada por compuertas estancas; nadie estaba en la parte del reactor de las compuertas cuando sonaron las alarmas. Los instrumentos de la sala de control señalaron dosis de radiación de cientos de rems por hora en la cueva del reactor. Aparentemente. era en la sala de control donde la presión del

15

A lo largo de 1976 y 1977 entraron en funcionamiento los reactores AGR de Hinkley Point B1, Hunterston B1, Hunterston B2 y Hinkley Point B2, de 660 MWe cada uno.

refrigerante, normalmente de cincuenta atmósferas, iba descendiendo rápidamente; a los diez minutos había caído a la presión de equilibrio en la cavidad del reactor ligeramente por encima de la presión atmosférica. El refrigerante de dióxido de carbono había escapado, de alguna manera, más o menos completamente, desde el circuito primario hasta la cavidad del reactor: el reactor había sufrido un accidente de pérdida de refrigerante. No obstante, todavía había refrigerante de dióxido de carbono, aunque ya no presurizado, dentro de las tuberías del reactor. La cueva, con su techo de cincuenta metros de espesor de roca, había lógicamente aguantado el golpe de presión producido por el estallido del circuito primario. Los instrumentos señalaron temperaturas en continuo descenso mostrando que las circulantes de gas primario eran capaces, pese a la pérdida de presión, de extraer suficiente calor como para evitar que la radiactividad de los productos de fisión acumulados recalentaran el núcleo. Ya que el reactor de Lucens era refrigerado por gas, su densidad de potencia relativamente baja y el refrigerante residual que permanecía en el circuito primario hicieron posible la extracción del “calor de desintegración” y de los productos de fisión. Como veremos pronto, las consecuencias de un accidente de pérdida de refrigerante en otros diseños pudiera no haber sido controlada tan fácilmente.

Inmediatamente se avisó a las autoridades de seguridad nuclear del gobierno suizo. Se encontró que la radiactividad se escapaba lentamente desde la cavidad estanca del reactor hasta la sala anexa de máquinas y el almacén de combustible. La ventilación para estas cámaras era estanca. La radiactividad se abrió camino a lo largo de la galería subterránea hacia la sala de control; a eso de las 6,15 el personal recibió instrucciones para utilizar máscaras de gas. La persistente fuga de radiactividad había sido confinada dentro de las instalaciones subterráneas de la colina, pero estaba claro que fugas adicionales podrían producir contaminación radiactiva fuera de la planta. Se requirieron equipos de protección radiológica, que empezaron a vigilar los niveles de actividad en la colina, fuera de la planta. La vigilancia continuó toda la noche; no se encontró ninguna actividad, salvo en el caso del rubidio88, con una vida media de solamente dieciocho minutos. La contaminación radiactiva dentro de la planta resultó consistir, principalmente, en rubidio-88 e isótopos de yodo.

Al final de la tarde del día siguiente los niveles de radiactividad en todas las cámaras subterráneas, excepto en la propia cavidad del reactor, había remitido considerablemente. La sala de control, la galería de acceso, el almacén de combustible y la sala de máquinas estaban de nuevo acopladas a los sistemas de ventilación que los comunicaban con el aire exterior a través de filtros. Los equipos de control continuaban midiendo los niveles de actividad en torno a la colina y estaban en condiciones de confirmar que no se había escapado ninguna radiactividad detectable. Los empleados de la planta pudieron volver a la sala de máquinas y al almacén de combustible a la mañana siguiente, para preparar la entrada en la propia cavidad del reactor. La radiactividad en la cavidad podía muestrearse desde la sala de máquinas, e incluía el rubidio88, isótopos de yodo y tritio (este último, posiblemente originado en la evaporación del agua pesada). La noche del 24 de enero, la cavidad del reactor se ventiló a través de filtros, una vez más con los equipos de control manteniendo la vigilancia en el exterior. El agua pesada derramada se recuperó por control remoto.

Cuando el personal pudo entrar en la cavidad del reactor, se encontró con que los elementos combustibles no podían ser manejados por la máquina de recarga. Utilizando un largo periscopio, los investigadores averiguaron que el accidente se había originado en un tubo de presión, en el borde exterior del núcleo. El fallo del propio tubo o del elemento combustible de su interior le había hecho estallar catastróficamente. El consiguiente aumento brusco de presión se había transmitido a través del agua pesada, que lo envolvía, a todos los otros tubos de la calandria, aplastándolos casi todos contra los tubos de presión de su interior y extrujando los elementos

combustibles, dejándolos inmobilizados dentro de los tubos. El propio tanque de la calandria también sufrió graves daños, permitiendo que todo el agua pesada de dentro se derramara por la sala de máquinas, debajo del reactor. Los productos de fisión esparcidos en el canal roto de combustible habían sido transportados por todo el circuito de refrigeración del primario, así como, a través del tanque de la calandria y, escapándose por sus grietas, hasta la cavidad del reactor.

La descontaminación resultó una operación dilatada y problemática, al igual que el conseguir acceso al núcleo del reactor. Se cizalló la mayor parte de la tapa de cierre del reactor para acceder a los canales bloqueados de combustible; fue necesario tomar precauciones a cada paso, no solamente por la contaminación latente, sino también para evitar la contaminación adicional de, por ejemplo, la operación de corte de la vaina de los elementos que se iban liberando. De hecho, el acceso al núcleo, no se consiguió hasta el 23 de septiembre de 1970, veintiún meses después del accidente. Hubo de diseñarse y fabricarse equipo especial para estas operaciones.

En las fases finales hubieron de desmontarse las tuberías de refrigerante contaminado e, incluso, el blindaje axial de la parte superior; este último fue almacenado en un contenedor de acero, especialmente fabricado, que pesaba unas seis toneladas. Cuando se completó la limpieza de los restos maltratados del reactor tanque del moderador, tubos de presión, etc. se almacenaron fuera de los subterráneos y se decidió dedicar éstos para almacenamiento de residuos radiactivos. A principios de 1973, la Asociación Suiza de Energía Atómica, en su nota informativa hizo observar, tranquilamente: “Se tenía la intención en cualquier caso, de cerrar la planta en algún momento entre 1970 y 1971. En incidente puede, como, consecuencia, ser considerado como un experimento adicional y muy instructivo”. Para completarlo, pudieron muy bien haber añadido dos adjetivos más: “caro” y “peligroso”.

A finales de los 60, hubo accidentes importantes en Canadá, Gran Bretaña, Estados Unidos y Suiza. Los tipos de reactores implicados incluían el refrigerado por gas, el refrigerado por agua y el refrigerado por sodio; el moderado con grafito, con agua ligera, con agua pesada y sin ningún tipo de moderador el despresurizado, el de vasija de presión y el de tubo de presión; el experimental, el productor de plutonio y el productor de vapor: combinaciones de prácticamente todas las variedades de modelos de reactor. La industria recalcó que nunca había sucedido un accidente en un reactor comercial que se hubiera traducido en peligro para el público. Ciertamente, el incendio en el reactor de Windscale Número Uno supuso un riesgo de peligro para el público; pero no era, desde luego, un reactor comercial.

El accidente del SL1 mató a tres personas; pero no eran, desde luego, parte del público. El accidente del Enrico Fermi no liberó radiactividad fuera del emplazamiento (no la suficiente). La lógica de la argumentación de la industria era impecable. Pero a comienzos de 1970 el público empezó a mostrar, pese a todo, signos de inquietud cada vez más extendida. Irónica, aunque quizás obviamente, los modelos que más oposición suscitaron fueron los reactores de agua ligera reactores de agua a presión y de agua en ebullición que acabaron, precisamente, por dominar el mercado nuclear.

7. La carga de la Brigada Ligera

Durante la primera década de su existencia, los reactores de agua ligera - reactores de agua a presión (PWRs) y reactores de agua en ebullición (BWRs) - eran solamente dos modelos de entre las numerosas variaciones de diseño que surgían de las oficinas de proyectos de la industria. Al final de los años 60, iban alcanzando un liderazgo que pronto resultó prácticamente insuperable. Italia y Japón habían empezado con centrales Magnox importadas de Gran Bretaña; Suecia y Suiza habían empezado con modelos propios que se revelaron como un fracaso. Hacia 1970, sin embargo, estas cuatro naciones habían cambiado su trayectoria definitivamente a favor de los reactores de agua ligera, ya fueran importados o de fabricación propia. En 1970, Francia hizo lo mismo. A pesar de su primera generación de reactores de gas-grafito, sólo semejante por su potencia a la de Gran Bretaña, Francia liquidó el linaje de los refrigerados por gas. El pedido, en 1970, de Fessenheim-1, un PWR de 930 MWe, abrió la compuerta para un verdadero diluvio de reactores de agua ligera. Se extendieron por todo el mundo tan aprisa como para abrumar, casi, a las otras dos grandes líneas de desarrollo: los modelos británicos refrigerados por gas y los modelos canadienses de agua pesada. Sin embargo, la creciente estimación entre la industria de los reactores de agua ligera coincidió muy estrechamente, por el contrario, con su emergente impopularidad.

Era ciertamente verdad, como insistía la industria, que nunca había habido un accidente grave en un reactor de agua ligera. Pero en varias ocasiones había faltado muy poco.

El BWR de Dresden-2, cerca de Chicago, alcanzó criticidad por primera vez en enero de 1970. El 5 de junio, mientras era maniobrado gradualmente hasta la máxima potencia, un instrumento eléctrico del sistema de control de presión envió una señal parásita que provocó la apertura de las válvulas de presión, de tal manera que la turbina se desconectó y el reactor paró bruscamente. Esto cortó la reacción de fisión, pero no, desde luego, el calor de desintegración de los productos de fisión del núcleo. Ya que el reactor estaba todavía en su fase inicial, el calor producido por los productos de fisión estaba aún en un nivel relativamente bajo. Teniendo en cuenta lo que sucedió en los siguientes ochenta minutos, esto debió ser exactamente así.

La parada brusca del reactor, cortando la producción de calor del combustible, redujo le ebullición, y el nivel de agua en la vasija de presión del reactor descendió mientras se formaban burbujas. Las bombas de alimentación de agua, después de un arranque fallido, funcionaron con plena eficacia; ya que las válvulas de la línea de vapor estaban abiertas, las bombas no encontraron mucha resistencia y fueron capaces de esparcir agua en la vasija de presión de forma tan rápida que el nivel de agua se restableció. Un registrador de nivel marcó la posición "baja"; el operador del reactor encontró las otras lecturas correctas y pasó las bombas de alimentación a control manual y máxima entrada. Esto resultó tan felizmente que el agua entrante alcanzó casi el extremo superior de la vasija de presión, suministrando no ya vapor, sino agua a las líneas de vapor. Cuando el operador, treinta segundos después, abrió el registrador de llenado, su aguja se desplazó a fondo de escala; entonces llevó el caudal de alimentación al mínimo, pero una válvula resultó con fugas. Dos de los tres juegos de válvulas que había intentado abrir fallaron; uno de estos tallos no fue descubierto hasta pasados unos minutos.

Después de otros vaivenes del agua en el reactor, entró en la línea de vapor una nueva oleada de vapor; lo mezcló con el agua y lo lanzó como una bola a lo largo de la línea principal de vapor. Esta oleada abrió una válvula de seguridad - el chorro de agua y vapor de esta válvula abierta, golpeó los accionadores de otras dos válvulas de seguridad y las dejó abiertas, de tal manera que el vapor activo continuó fluyendo desde el sistema de presión hasta la cámara de presión (o "pozo seco"), espacio entre la vasija del reactor y la contención de hormigón del primario. La presión de

la cámara empezó a subir.

La presión de la cámara habría disparado los sistemas de refrigeración de emergencia. Pero el sistema de alta presión de refrigerado de emergencia estaba fuera de servicio por reparaciones debidas a daños anteriores, en todo caso, al igual que el sistema, de emergencia de baja presión, no habría funcionado debido a que la presión creciente en la cámara no iba acompañada de una pérdida de presión dentro del reactor (que eran las condiciones bajo las cuales la refrigeración de emergencia se dispararía). Cuando sobrepasó 5 libras por pulgada cuadrada desplazó el único indicador utilizable de presión de la cámara a fondo de escala. A partir de ese momento, el personal del reactor no supo nada más sobre la presión de la cámara.

Las instrucciones escritas de emergencia señalaban que si la presión de la cámara subía por encima de los 2 libras por pulgada cuadrada, debían de ponerse en funcionamiento los pulverizadores para condensar el vapor acumulado en la misma. Pero dos veteranos operadores del reactor, que no veían la forma de saber por qué la presión de la cámara iba subiendo, decidieron, sin embargo, ignorar las instrucciones de emergencia y evitar la conexión de los pulverizadores de la contención, debido a que el choque térmico de la pulverización fría repentina podía producir otros daños. Por el contrario, treinta minutos después de que el fallo eléctrico hubiera hecho arrancar todo el tiovivo, los operadores abrieron las válvulas haciendo que la presión de la cámara se escapase a la atmósfera exterior a través del sistema fijo de tratamiento de gases. La temperatura y la presión del vapor venteado estaban probablemente bastante por encima de las características de diseño del sistema, de tratamiento de gases, pero una aguja de registrador se salió del papel y se estropeó el registro. Ochenta minutos después de la señal parásita inicial, los operadores volvieron a actuar directamente contra las normas de la AEC sobre permisos de funcionamiento e instrucciones de planta; con la presión de la cámara todavía fuera de escala, la conectaron a través de un sistema de refrigeración y de unas bombas de drenaje, al sistema de agua radiactiva de deshecho. Dos horas después de la señal parásita, el reactor volvió por fin bajo control.

El incidente del Dresden-2 acabó felizmente, y pudo realmente ser llamado incidente, más que accidente. Pero habla concluido de forma poco, tranquilizadora. El nivel del agua subió y descendió tanto en la vasija de presión que el núcleo, probablemente, quedó parcialmente descubierto por lo menos una vez. La Commonwealth Edison, propietaria de la central, negó posteriormente que el combustible hubiera resultado dañado; pero el Dresden-2 fue recargado después del incidente, pese a que había sido recargado solamente dos meses antes. Las muestras tomadas en la cámara de presión indicaron que, por lo menos, algunos productos de fisión se habían escapado desde el núcleo hasta el refrigerante primario y, desde allí a través de las válvulas dañadas, hasta la cámara. La cantidad de yodo-131, en la cámara de presión, era el 5 de junio de algunos centenares de veces la concentración permisible, y 82 veces el 6 de junio. El sistema fijo de tratamiento de gases actuó para extraer casi toda la radiactividad cuando la cámara se ventiló, pese, incluso, a que la presión y la temperatura -que los operadores no conocían cuando la ventilaban- estaban bastante fuera de los límites de funcionamiento normal.

Como ejemplo de la interacción de fallos menores, falta de previsión en el diseño, métodos chapuceros de manejo y evidente incompetencia, el incidente del Dresden-2 debió de convertirse un clásico (al menos en la medida en que el personal del BWR de la Commonwealth Edison estuvo implicado). Parecía casi inconcebible que pudiera repetirse una situación así. Pero el BWR de Dresden-3, gemelo del Dresden-2, que alcanzó criticidad en enero de 1971, experimentó el 8 de diciembre de 1971 - once meses después - un incidente prácticamente igual (niveles de agua subiendo y bajando. agua en los circuitos de vapor y purga del vapor en la cámara de presión o en

la contención primaria, alcanzando, en esta ocasión, una presión de veinte libras por pulgada cuadrada: un tercio de la presión considerada capaz de dar lugar a un accidente de pérdida completa de refrigerante en el reactor),

Estos incidentes llegaron a formar parte, rápidamente, del folklore nuclear en los Estados Unidos. Reaparecieron repetidamente ante los tribunales, especialmente después de una notable innovación legislativa que entró en vigor el 1 de enero de 1970: la *National Environmental Policy Act* (Ley sobre Política Nacional del Medio Ambiente, NEPA). La característica básica de la NEPA era su exigencia de que cualquier proyecto importante de desarrollo acordara con la recientemente constituida *Environmental Protection Agency* (Agencia para la Protección del Medio Ambiente, EPA) un Informe de Impacto Medioambiental, EIA, que identificara anticipadamente todos los efectos medioambientales del proyecto en cuestión. Se exigía también un informe de impacto medioambiental para establecer las alternativas posibles al proyecto pretendido y, de forma contraria, para plantear un argumento *en contra* del proyecto, así como un argumento a su favor. Los tribunales tenían ante sí, una ardua tarea actuando en temas derivados de la NEPA, muchos críticos nucleares lo consideraron una suerte, por disponer al fin de los medios para denunciar la connivencia de los intereses mutuos compartidos por la AEC y la industria nuclear norteamericana.

Pronto se produjo el primer test para la NEPA, en el terreno nuclear. La Baltimore Gas Electric Company venía construyendo desde 1967, una central PWR en Calvert Cliffs, en la Bahía de Chesapeake. Los contestatarios, bajo la dirección de la Asociación de Protección Medioambiental de Chesapeake intervinieron en la información pública sobre el permiso de construcción. Su oposición a las descargas radiactivas de la central fue rechazada debido a que la AEC ya había establecido normas que obligaban a radioisótopos como el tritio; y la objeción de los contestatarios sobre los efectos de la descarga de agua caliente procedente de los condensadores de la turbina fue rechazada por la AEC por quedar fuera de su responsabilidad, y resultar, de esta manera, inadmisibles. Los contestatarios de Maryland no quedaron satisfechos. Plantearon un recurso contra la validez de las normas de autorización en su aplicación a Calvert Cliffs, a la luz de la NEPA. La AEC se mantenía obstinada, todavía a finales de noviembre de 1970, cuando los contestatarios presentaron una petición ante el Distrito de Columbia Circuit, del Tribunal de Apelaciones, pidiendo la revocación de la negativa de la AEC a contestar.

Con esto, la AEC se avino finalmente a hacer algo, publicando su interpretación, extremadamente restringida, de sus responsabilidades frente a la NEPA: las informaciones públicas de la AEC no necesitaban tomar en consideración los factores medioambientales excepto si los contestatarios ajenos lo requerían; en las audiencias anunciadas antes del 4 de marzo de 1971 no se contemplarían objeciones sobre temas que no fueran radiológicos; las audiencias serían inaccesibles a cualquier evaluación independiente de los factores medioambientales si hubieran sido consideradas como satisfactorias por otras agencias, ya fueran estatales, regionales o federales; y ninguna instalación ya autorizada para su construcción habría de sufrir modificaciones debido a la NEPA.

Los contestatarios de Calvert Cliffs insistieron en su recurso legal. La sentencia fue dada a conocer el 23 de julio de 1971 por el juez James Skelly Wright. Fue la primera exposición legal de los puntos de vista de los tribunales sobre la NEPA, y sentaron un magnífico precedente. El juez Wright suministró una punzante reprimenda a la AEC, declarando que la NEPA no era un texto vago de generalizaciones piadosas, sino una petición, sin ambigüedades, de establecimiento de prioridades en los procedimientos específicos de toma de decisiones, incluyendo muy particularmente las de la AEC. El juicio de Calvert Cliffs fue un hito en la historia judicial norteamericana y, como consecuencia, en la lucha medioambiental. Además, imprimió un impulso monumental a la moral de los grupos antinucleares de los Estados Unidos y - debido a la publicidad que recibió - favoreció

la unión, que se estrecharía gradualmente, entre los diferentes grupos locales.

Mas o menos al mismo tiempo, también en los Estados Unidos, había empezado a surgir un oscuro desacuerdo técnico acerca de la ingeniería de los reactores, que llegó a oídos de los ciudadanos críticos. No se sabe muy bien si tanto los de un lado como otro pudieron imaginar las ramificaciones consecuentes del tema. El desacuerdo se centró en ciertos sistemas auxiliares de los dos principales tipos de reactores americanos, el PWR y el BWR. Los sistemas auxiliares en cuestión eran los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo. Un reactor actual de agua ligera, de cualquier clase, posee una densidad de potencia relativamente alta. Supongamos que se rompe una tubería en el circuito primario de refrigeración. La alta presión dentro del circuito (de hasta 150 atmósferas en un PWR) expulsa casi toda el agua de refrigeración, a través de las grietas, muy rápidamente, mientras que el agua entre las varillas del combustible del núcleo, se convierte en vapor se trata de una “purga”, o “accidente de pérdida de refrigerante”. El vapor posee una capacidad calorífica muy inferior a la del agua y es mucho menos afectivo extrayendo el calor que continúa generando el núcleo. Incluso si los sistemas de parada automática bloquean inmediatamente el reactor, y detienen la reacción de fisión, el calor que producen los productos de fisión acumulados -el llamado “calor de desintegración”- pueden ser en el caso de un reactor de gran potencia, de unos 200 MWt; este calor no puede apagarse. A menos que se arbitren medios para extraer este calor, la temperatura en el núcleo del reactor se disparará con extrema rapidez, hasta que el envainado y el combustible se reblandecen y funden, y el núcleo empieza a colapsarse. Si sucede esto, la consecuencia -como ya hemos indicado en el caso del reactor Fermi- puede ser un escape catastrófico de radiactividad al entorno. Debido a esto, los reactores de agua ligera van provistos de varios sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo (*Emergency Core Cooling System, EMS*), diseñados para entrar automáticamente en funcionamiento -y muy rápidamente- si se despresuriza el circuito primario de refrigeración de un reactor de agua ligera.

Todas las conexiones externas de una vasija de presión de un PWR se realizan por encima del nivel del núcleo. Un PWR actual posee tres ECCS, uno “pasivo” y dos “activos”. El sistema pasivo es un sistema acumulador de inyección: dos o más grandes tanques por encima del reactor, conectados a las tuberías del primario, y llenos de agua fría borada, a una presión entre 13 y 43 atmósferas. Si se despresuriza el circuito primario, la caída de presión abre las válvulas y el agua fría penetra en el reactor. Los dos sistemas activos se componen de un sistema de baja presión que suministra agua de sustitución si una grieta importante hace descender la presión del primario drásticamente, y de otro sistema de alta presión, que suministra agua de sustitución si una grieta pequeña mantiene alta la presión del primario. Ambos sistemas, el de inyección de alta presión y el de inyección de baja presión comprenden bombas y válvulas accionadas eléctricamente, que se activan cuando los instrumentos de control responden a presiones o niveles anormales en los circuitos de refrigeración.

Un BWR posee una contención, del tipo de cámara de presión (“pozo seco”), que comunica con una piscina de relajación llena hasta la mitad de agua fría. Los primeros BWRs poseen un sistema pulverizador de núcleo, de alta presión; los posteriores, un sistema de inyección de refrigerante a alta presión, que se active bien por bajo nivel del agua en la vasija de presión, bien por baja presión en el circuito primario o bien por la alta presión en la cámara de presión (lo que indica escape de vapor del circuito primario). Si la inyección de alta presión y las bombas de alimentación no pueden mantener la vasija del reactor suficientemente llena de agua, se despresuriza completamente, mediante la descarga de vapor a la piscina de relajación; entonces entra en servicio un pulverizador de núcleo, de baja presión, para pulverizar agua por encima del núcleo, y un sistema de llenado, de baja presión, inunda la vasija del reactor desde abajo.

Mientras todo fuese así, todo iría bien (si estos diversos sistemas de refrigeración de emergencia del

núcleo funcionasen como está previsto). Sin embargo, a principios de 1971 fueron expresándose ciertas dudas serias, especialmente por un grupo de científicos e ingenieros; de la zona de Boston. Este grupo, la *Union of Concerned Scientists* (UCS o Unión de Científicos Responsables), a mediados de 1971 fijó inicialmente su interés en una curiosa y ligeramente inquietante circunstancia cuya significación no había recibido anteriormente mucha atención del público: la ausencia total de datos experimentales convincentes sobre las características del ECCS. Como se reveló más tarde, esta ausencia había sido observada, con preocupación creciente, por algunos de la propia plantilla de la AEC. Las historias de los ECCS se remontan, al menos, a mediados de los 60, cuando un equipo de trabajo de la AEC elaboró un estudio sobre la refrigeración de emergencia. Cuando esto se escribe, la historia continúa ampliándose, y dando lugar a tanto material que exigiría ya una librería completa. Uno de los documentos principales, el WASH-1400, pesa unos diez kilogramos; otro, con el epígrafe RM-50-1, tiene 22.000 páginas. Debe bastar aquí con anotar algunas características básicas de la controversia. En 1966, en el NRTS, empezaron los trabajos en la instalación *Loss-of-Fluid-Test* (LOFT o Prueba de Pérdida de Fluido), un reactor a gran escala cuya razón de ser original era un tributo a la información del ECCS. El reactor LOFT iba a llevar a cabo una serie de pruebas, culminando con el funcionamiento a plena potencia y, por decirlo así, tirar del tapón -permitiendo escaparse al refrigerante y al reactor tomar notas de sí mismo, con instrumentación depurada, para registrar su agonía final- dentro de una impresionante contención de protección, ya que sus estertores de muerte se esperaba que fuesen espectaculares.

Sin embargo, el reactor LOFT incurrió en una serie de retrasos y de costes excesivos que lo hicieron tan caro que nadie pudo evitar la idea de destruirlo a él mismo. Todavía no se ha completado, casi diez años después de que comenzara su construcción. El diseño de los sistemas de refrigeración de emergencia en los reactores de agua ligera de hoy día depende casi completamente de las simulaciones de computador, que están basadas en muy pocos datos experimentales y, por tanto, son de calidad cuestionable. Algunos de estos datos los produjeron los experimentos *Full-Length Emergency Cooling Heat Transfer* (Transferencia Total de Calor de la Refrigeración de Emergencia), llamados PWR-FLECHT y BWR-FLECHT, sobre elementos reales de combustibles dañados, calentados eléctricamente. Las pruebas PWR-FLECHT fueron desarrollados por Westinghouse, el principal vendedor de PWRs, y las pruebas BWR-FLECHT, por General Electric, el principal vendedor de BWRs. Los resultados de las pruebas no fueron reconfortantes: calentadores quemados, termopares averiados, y la Idaho Nuclear Corporation, la contratista de la AEC que entonces manejaba el NRTS, escribió una serie de disgustados memorándums, señalando en términos inequívocos, lo inútiles que eran las pruebas. Otra serie de pruebas, desarrolladas entre noviembre de 1970 y marzo de 1971, en un núcleo de PWR del tipo de tabla de mesa, falló en seis intentos sobre seis en proporcionar agua de refrigeración de emergencia al núcleo en cuestión, después de una rotura simulada de tubería.

Pese a todo, en junio de 1971, la AEC publicó sus Criterios Provisionales de Aceptación para los ECCS. No sorprendió a nadie que todos los reactores entonces en funcionamiento o a punto de ser autorizados cumplieran estos “nuevos” criterios. Muy poco después, la UCS publicó el primero de dos memorándums sobre el ECCS (el segundo apareció en octubre) tomando buena cuenta de la política señalada por la AEC y fijando la atención sobre las pruebas fallidas con los simuladores. Sus advertencias sobre el ECCS añadieron más leña al fuego en el tema de la intervención popular en los trámites de concesión de autorizaciones en los emplazamientos a lo largo de los Estados Unidos. La AEC, viendo que el tema del ECCS plantearla problemas engorrosos para su departamento de autorizaciones, tomó una drástica decisión. Anunció que mantendría audiencias especiales para elaborar la normativa sobre el ECCS; como consecuencia, la cuestión del ECCS quedó desde ese momento *sub judice*, y no podría introducirse más en las audiencias de autorización concreta.

Las audiencias para la normativa sobre el ECCS se convocaron en enero de 1972 en Bethesda, Maryland, y se extendieron, con interrupciones, a lo largo de un año. Produjeron un documento, el RM-50-1, de 22.000 páginas, más algunas exposiciones aún más extensas que, ya hacia mitad del verano de 1972, habían de transportarse hasta la sala de la audiencia, en una carretilla de gran potencia. La transcripción comprende cierto material sorprendente. Se incluyen los razonamientos de varias divisiones de la propia AEC; de los cuatro vendedores de reactores de agua ligera -Westinghouse, Combustion Engineering y Babcock & Wilcox (PWRs) y General Electric (BWRs), de las empresas eléctricas asociadas; y de los Interventores Nacionales Asociados, una coalición de más de sesenta grupos de oposición nuclear de todos los Estados Unidos, que respaldaron el testimonio técnico de la UCS, en las personas del doctor Henry Kendall, un físico nuclear del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT - Instituto de Tecnología de Massachusetts), y de Daniel Ford, un economista de Harvard.

Las audiencias de Bethesda revelaron las profundas discrepancias dentro de la AEC en cuanto a la adecuación del ECCS como era habitualmente entendido. Repetidamente, veteranos expertos en seguridad de la AEC testimoniaron las graves reservas que abrigaban sobre la eficacia del ECCS en el caso de un accidente de pérdida de refrigerante y sobre la base de datos fragmentarios en los que se fundaba la confianza en el ECCS. Todavía más desconcertante fue el descubrimiento de que los altos responsables de la AEC tenían la costumbre de “censurar” las informaciones originadas en los informes de seguridad de la AEC, si podían resultar embarazosas. Una serie de artículos de Robert Gillette en *Science*, en septiembre de 1972, dio más consistencia a la acusación de que la AEC suprimía regularmente la información obtenida dentro de ella, sobre los problemas de seguridad de los reactores, y amenazaba a sus propios empleados con el despido si se desviaban de los anodinos puntos de vista de la AEC.

Sea como fuera, en la primavera de 1973 la AEC promulgó las nuevas normas. Después de todo el gasto de dinero, tiempo y trabajo, se decidió que los criterios originales de aceptación del ECCS eran, con mínimas revisiones, completamente adecuados. Pero la historia del ECCS no acabó ahí y continuaron acumulándose los incidentes.

En la República Federal de Alemania, la primera gran central nuclear comercial, el BWR de 640 MWe de Wüergassen, alcanzó criticidad por primera vez el 2 de octubre de 1971, suministrando su primera electricidad a la red el 18 de diciembre de 1971 y soportando su primer accidente el 12 de abril de 1972. Con el reactor funcionando al 58 por 100 de su potencia de diseño, se abrió una válvula de alivio y se enclavó. Para evitar el choque repentino de refrigerante, que produciría una parada brusca de emergencia, los operadores optaron por una parada gradual. Se necesitaron treinta minutos, durante los cuales se derramaron unas 200 toneladas de vapor desde el circuito primario hasta la cámara exterior de supresión de presión (el “pozo seco” de los BWRs norteamericanos). El vapor se condensó en la cámara, pero la temperatura del agua subió hasta 95°C, y los escapes de presión rompieron las estructuras sueltas que se habían añadido para fortalecer el piso de la cámara. El agua recogida en la cámara salió, entonces, a través de los setenta y pico agujeros de los tornillos que quedaron sueltos en el piso, abriéndose camino hacia el nivel inferior de la contención, dañando el cableado eléctrico de los posicionadores y motores de los actuadores de las barras de control. En ese momento, afortunadamente, la presencia de agua en el sumidero había persuadido a los operadores a parar bruscamente el reactor. Siguió una continuación lenta de investigaciones y reparaciones, afectando no solamente a la empresa eléctrica sino también a la Asociación de Supervisión Técnica, a los responsables de las autorizaciones y a la Comisión de Seguridad del Reactor. La central de Wüergassen volvió a ponerse en servicio el 7 de noviembre de 1972; desde mediados de enero de 1973, el reactor fue aumentando gradualmente

su potencia hasta el 80 por 100. Desde finales de enero se supo que otra vez se estaba acumulando el agua en el sistema de supresión de presión; el 25 de febrero se paró el reactor para reparar una fuga de aceite y echar otra ojeada a las fugas de agua. Resultó haber un sorprendente número de pequeñas grietas en una sección de la tubería primaria, aunque solamente una alcanzaba los veinticinco centímetros de longitud. Los Investigadores sugirieron que las pruebas llevadas a cabo antes de la puesta en funcionamiento del reactor; especialmente el rellenado de las tuberías, habían sometido el sistema a esfuerzos que podían haber debilitado los componentes. La central de Wüergassen arrancó de nuevo en julio de 1973, pero en febrero de 1974 otra vez fue parada, para reparaciones adicionales; en el momento en que esto se describe, todavía está fuera de servicio¹⁶.

Pese a todo, los pedidos de reactores de agua ligera proliferaron desde todos los lados, no solamente en su matriz original norteamericana. Después de un curioso lapso en 1967-8, en que el número de reactores en funcionamiento en los Estados Unidos cayó de 22 a 18 -debido a paradas-, este número, empezó a aumentar, siendo casi todos del tipo PWRs y BWRs. En 1972, de acuerdo con la IAEA, había 33 reactores de potencia funcionando en los Estados Unidos, con una potencia establecida en cerca de 15.000 megavatios. En 1973 esto había aumentado a 56 reactores, con una potencia de unos 33.000 megavatios¹⁷. La expansión nuclear en los Estados Unidos fue la más importante, aunque el fenómeno se repetía por todo el mundo. Hacia 1973, 17 países poseían 167 reactores de potencia, con una capacidad de casi 61.000 megavatios. La gran mayoría era de uno u otro de los modelos de agua ligera, dando sabor internacional al debate sobre la seguridad de estos reactores, que se iba haciendo cada vez más acalorado dentro de los Estados Unidos.

El 4 de agosto de 1972, la AEC encargó un importante estudio sobre la seguridad de los reactores que iba a ser dirigido por el profesor Norman Rasmussen, del MIT. Este estudio de tres millones de dólares, financiado por la AEC, fue desarrollado por el personal de la AEC y sus consultores, en sus oficinas de Germantown, Maryland, y por laboratorios de investigación y contratistas entre los que se encontraban Batelle, Oak Ridge, Brookhaven y Lawrence Livermore. Algunos de sus resultados iniciales se concluyeron en el WASH-1250, *The Safety of Nuclear Power Reactors - Light Water Cooled - and Related Facilities* (La Seguridad de los Reactores Nucleares de Potencia - Refrigerados por Agua Ligera - e Instalaciones Afines), publicado por la AEC en julio de 1973; era un extenso compendio de datos técnicos y consideraciones públicas que fue cuestionado por las numerosas organizaciones comprometidas, en aquel momento, en confrontaciones nucleares, incluyendo los Amigos de la Tierra, el Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, Ralph Nader, el SIPI, el Sierra Club y un conjunto en rápida expansión de grupos locales.

Los contestatarios se iban convirtiendo en asiduos recolectores de historietas nucleares. Ahí estaba Millstone-1, cuyos condensadores se corroyeron y vertieron agua de mar en la refrigeración primaria; Quad Cities-2, que funcionaba con una junta de soldadura olvidada, chapoteando por todo el interior de la vasija de presión; Vermont Yankee, en la que las barras de control se habían

16

Este central sigue en funcionamiento, pese a todo. Sin embargo, ha constituido uno de los traumas nucleares alemanes, que han ocasionado finalmente la casi congelación del programa nuclear federal.

¹⁷ El texto de Patterson no recoge la espectacular caída de las previsiones nucleares norteamericanas. Fue a partir, precisamente, de 1975 cuando entró en picado la industria nuclear de cara al mercado interior. En enero de 1981 hay 74 reactores en funcionamiento, con un total de 56.700 MWe, cifras que no corresponden, ni mucho menos, a las previsiones, para este año, de 1975.]

instalado al revés, y en la que, por una coincidencia de ingeniosos errores, arrancó después con la tapa de la vasija de presión levantada; Indian Point-2, en la que una tubería de vapor se partió por la mitad de su circunferencia, haciendo que el vapor que se escapaba alabea el aro de acero de la contención en más de doce metros; Palisades, en la que la cuba de soporte del núcleo funcionó suelta y trastornó los órganos internos del reactor, motivando una parada indefinida y ocasionando una reclamación de 300 millones de dólares de los operadores - Consumers Power - contra los constructores - Combustion Engineering - y así sucesivamente.

Estas cuestiones resultaban una preocupación, como mucho, muy secundaria para la CEGB británica cuando, en 1973, reveló casualmente que estaba proyectando una nueva serie de reactores, y que habían optado por los PWRs. Esta revelación, después de meses de especulación, fue hecha por el presidente de la CEGB, Arthur Hawkins, ante el Comité Electo Parlamentario de Ciencia y Tecnología, el 18 de diciembre de 1973; y desencadenó una polémica sin precedentes en la larga historia nuclear británica.

El plan de la CEGB preveía treinta y dos PWRs de 1.300 MWe, a ser encargados en la década de 1974 a 1983; era un programa cuya magnitud abrumaba a la mayoría de los observadores, especialmente debido a que la industria nuclear británica se encontraba en plena crisis después de la debacle de los reactores avanzados refrigerados por gas. El gobierno había acordado, recientemente, la entrega de toda la industria de construcción de reactores a un consorcio, la Corporación Nuclear Nacional, y la entrega de la dirección de este consorcio a la empresa británica privada General Electric, que también resultaría la mayor accionista.

La General Electric Company compartía el entusiasmo de la CEGB por el cambio a los reactores de agua ligera, pero, al mismo tiempo, se lanzó decididamente a abrir el juego. Hacía mucho tiempo que, entre los oponentes al plan se incluía - además de la rama británica de Amigos de la Tierra - el Comité Electo Parlamentario, que publicó un conciso y hostil informe en febrero de 1974; la Institución de Funcionarios Profesionales; otros sindicatos; mucha gente de la industria nuclear británica, incluyendo, eventualmente, al arquitecto y fundador de la industria británica, Lord Hinton; Sir Alan Cottrell, un metalurgista de categoría internacional y, hasta abril de 1974, científico jefe del gobierno; y muchos influyentes y bien informados comentaristas de los medios de comunicación.

Los argumentos eran múltiples. Entre los interrogantes figuraba la seguridad de los reactores de agua ligera; la aprobación popular de la energía nuclear; la credibilidad de la pretensión de que el modelo de 1.300 MWe estaba “probado”, ya que todavía no funcionaba ninguno en ningún lugar; los efectos de los componentes importados en la balanza de pagos; la precisión de las previsiones de la demanda de electricidad que exigía un programa tan vasto; y las consecuencias sobre la moral británica si se abandonaban esos veinte años de logros en favor de una tecnología del otro lado del Atlántico. La situación se complicó aún más con las elecciones de febrero de 1974, en la que el Gobierno Heath -aparentemente, a favor de los reactores de agua ligera - fue desplazado por el de Wilson, cuyas preferencias eran diferentes.

Por las razones que fuesen, y muchas han sido ya avanzadas, la decisión del gobierno, prefigurada a partir de junio de 1974, fue rechazar las propuestas de la CEGB. Gran Bretaña construiría, en lugar de los PWRs, reactores de agua pesada generadores de vapor (*Steam-Generating Heavy Water Reactor*; SGHWR), ni tantos ni tan potentes. Se dieron autorizaciones para, exactamente, seis reactores de 660 MWe, cuatro para la CEGB y dos para la *South of Scotland Electricity Board* (Consejo de Electricidad del Sur de Escocia), que había favorecido este modelo desde el principio, con la promesa de una revisión futura en 1978. Pese a las cuidadosas palabras del gobierno,

asegurando que la decisión no implicaba de ningún modo una toma de postura desfavorable hacia los reactores de agua ligera, aquello fue un revés notable. Relacionándola con el tardío reconocimiento de la impresionante central canadiense CANDU de 2.000 MWe, en Pickering, la decisión británica sobre el reactor dio un nuevo aliento de vida a los modelos de agua pesada, y convirtió el predominio mundial de los reactores de agua ligera en algo menos inevitable.

Los defensores de los reactores de agua ligera tardaron poco tiempo en volver a la greña. El 21 de agosto de 1974 se publicó, como documento WASH-1400, la versión resumida del estudio de la seguridad del reactor, *Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants* (Evaluación de los Riesgos de Accidentes en las Centrales Nucleares Comerciales Norteamericanas), indicando que tales riesgos eran mínimos. La publicación incluía un breve resumen - en definitiva, una guía casi para niños sobre seguridad del reactor, en forma de catecismo - más el informe principal, más diez volúmenes de material de apoyo, con un peso total de unos diez kilogramos, y formando una pila de unos treinta centímetros de alta.

Sobre la base de la técnica conocida como análisis del árbol de sucesos/árbol de fallos, el informe concluía que la probabilidad de un accidente grave en una central nuclear norteamericana de reactor de agua ligera era realmente muy baja: una posibilidad entre un millón por reactor y por año de un accidente que produjera la muerte de, como mucho, setenta personas, y cifras bajas similares para una amplia gama de otras posibilidades. En la técnica del “árbol” se identifica primero una posible avería, se clasifican todas las consecuencias posibles de la avería, después se canalizan todas las posibles consecuencias de cada una de las alternativas, y así sucesivamente. Cuando se ha desarrollado este “árbol”, con más y más ramas de secuencias posibles, se asignan probabilidades a cada causa y se calcula la probabilidad acumulativa de cada resultado. Esta técnica fue criticada duramente después de la publicación del WASH-1400; las técnicas similares empleadas en el programa espacial y en otros proyectos de tecnología avanzada no habían resultado totalmente positivas.

No hay dudas de que los datos y los análisis comprendidos en el WASH-1400 son una disección impresionante de una cuestión tecnológica de gran importancia. El que esta disección del WASH-1400 dé valores numéricos creíbles para las probabilidades y consecuencias de accidentes en reactores de agua ligera todavía es tema de intenso debate; obviamente, una crítica exhaustiva de un estudio de investigación tan extenso como éste, exige tiempo y esfuerzo, y muy pocos críticos pueden disponer de recursos semejantes a los del estudio de la AEC. En cualquier caso, el Estudio de Seguridad del Reactor establece con detalle los presupuestos que subyacen en la filosofía sobre la seguridad de la industria norteamericana, haciendo posible establecer, con mucha más precisión, aquellas áreas cuyo análisis puede considerarse satisfactorio y aquellas que todavía exigen más atención.

En medio de todo esto, se intensificaron los pedidos alborozados de reactores de agua ligera. Durante un tiempo pareció que sólo los otros dos miembros de la alianza original de la Segunda Guerra Mundial serían capaces de mantener - Canadá con la familia CANDU, de agua pesada, y Gran Bretaña con la familia grafito-gas - la rama de los reactores de grafito. Es verdad que, para la producción de energía, Gran Bretaña había desarrollado los reactores de grafito gas casi por error. Pese a las dimensiones de los programas de grafito-gas, Magnox y AGR, y al desarrollo simultáneo del SGHWR, Gran Bretaña esperaba con placer al reactor rápido regenerador de metal líquido (LMFBR - *Liquid Metal Fast Breeder Reactor*).

Desde los primeros días del esfuerzo nuclear británico, los objetivos a largo plazo se habían situado en el LMFBR como modelo ideal de reactor nuclear de potencia. El pequeño reactor rápido de

Dounreay fue seguido del Prototype Fast Reactor (Reactor Rápido Prototipo, PFR), de 250 MWe, también en Dounreay, que fue encargado en 1966. Pero los problemas, especialmente los del complicado techo del reactor, retrasaron los trabajos en el PFR. Como resultado, fue adelantado por su rival de la otra parte del Canal, el reactor rápido regenerador francés Phénix, en Marcoule. El Phénix alcanzó criticidad en agosto de 1973 y llegó a plena potencia el último día de una importante conferencia internacional sobre centrales de potencia de reactor rápido, que se celebraba en Londres, en marzo de 1974 (un golpe de relaciones públicas que no pasó inadvertido). El propio PFR alcanzó criticidad justamente antes de la apertura de la conferencia.

También los Estados Unidos iban, decididamente, en pos del LMFBR, aunque a alguna distancia de los británicos, franceses y soviéticos. El Reactor Regenerador Experimental-2, de 16,5 MWe, sucesor del Reactor Regenerador Experimental-1, alcanzó criticidad en el verano de 1963, y fue aumentando muy gradualmente su potencia hasta alcanzar el máximo, lo que sucedió a mediados de 1969.

En agosto de 1968, la AEC publicó su programa LMFBR en diez volúmenes numerados desde el WASH-1101 at WASH-1110, convenientemente revisado pero manteniendo sin ambigüedad su ingenuo entusiasmo. El 7 de agosto de 1972, la AEC, la Breeder Reactor Corporation y la Project Management Corporation firmaron un memorándum de acuerdo para la construcción de lo que la AEC gustaba en llamar el primer prototipo de central de potencia rápida regeneradora. La ocasión recordó cómo se rehace continuamente la historia, ya que ahora resultaba que la central Enrico Fermi-1 solamente había existido como instalación experimental. La documentación revelaba, desde luego, que la central Fermi-1 se había considerado que cumplía precisamente el papel ahora asignado al “primer” prototipo de central LMFBR: una central de potencia en funcionamiento para demostrar la idoneidad del modelo LMFBR para el suministro de electricidad. Pese a que la central Enrico Fermi-1 había demostrado claramente todo lo contrario, es incomprensible - aunque deplorable - que hubiera ahora que quitarla de en medio y esconderla bajo la alfombra.

En todo caso, la AEC, atenta a la NEPA, había publicado obedientemente, en julio de 1971, un breve informe sobre el impacto medioambiental de su central experimental LMFBR (bastante antes de que se hubiera realizado cualquier tarea de diseño e, incluso, antes de que se hubiera escogido emplazamiento). Puede imaginarse la utilidad de un estudio de impacto medioambiental tan abstracto. La AEC publicó, más o menos al mismo tiempo, un estudio de impacto medioambiental para la *Fast Flux Test Facility* (Instalación de Prueba de Flujo Rápido), un reactor experimental refrigerado por sodio entonces - e igualmente en 1975 - bajo construcción en Hanford; iba a convertirse en uno de los más flagrantes ejemplos de aumento de costes que hasta entonces había sufrido el programa de 'desarrollo nuclear, un preocupante presagio para el programa LMFBR de la AEC. Este programa era grandioso, incluso para la costumbre de la AEC, contemplando unas 400 centrales de potencia LMFBR en los Estados Unidos para el año 2000. La AEC destinaba al LMFBR, a este fin, un cuarto de los fondos federales totales destinados a investigación y desarrollo energéticos unos 500 millones de dólares por año desde mediados de los 70. Las otras ramas de investigación y desarrollo energéticos - incluyendo entre ellas los estudios sobre la seguridad de los reactores de agua ligera, la investigación de la fisión y fusión nucleares, las diversas tecnologías del carbón y, no hace falta decirlo, los exiguos capítulos para las fuentes alternativas de energía (sol, viento, geotérmica y otros) habían de compartir el resto. Ninguno de los apartados se acercaba, ni remotamente, al asignado al LMFBR.

A principios de 1973, el SIPI se unió al Consejo de Defensa de los Recursos Naturales y juntos se plantaron ante la AEC, por el programa LMFBR. Afirmaron que la NEPA no solamente exigía de la AEC un estudio de impacto para su central LMFBR de demostración, sino para todo el programa

LMFBR hacia el que la central de demostración no suponía más que un paso de tanteo. El 12 de junio de 1973, el Tribunal de Apelación del Distrito de Columbia se mostró de acuerdo con este punto de vista y declaró que la AEC debía preparar un estudio de impacto del programa completo. Por primera vez iba a analizarse el efecto global de una nueva tecnología antes de su introducción; se trataba, teóricamente, de un punto de inflexión histórico.

En marzo de 1974, la AEC publicó su resumen del estudio de impacto del programa LMFBR: era el WASH-1535, de cinco volúmenes conteniendo más de 2.000 páginas. Muy pocos reconocieron ese estudio como un punto de inflexión; como respuesta a la NEPA no era -según el Consejo de Defensa de los Recursos Naturales y el SIPI- ni serio ni de buena fe. La EPA no lo aceptó, considerando el resumen “inadecuado”, y devolviéndolo para su total reelaboración. La AEC, que había esperado conseguir una aprobación final al estudio de impacto, a mediados de 1974 anunció un retraso que, cuando escribimos esto, parece indefinido. No obstante, los planes de la central regeneradora de demostración de Clinch River, cerca de Oak Ridge, Tennessee, avanzaban aprisa, incluso aunque las estimaciones de costos subieran desde 700 millones de dólares hasta 1.700 millones. Las 340 empresas acordaron aportar 250 millones de dólares -es decir, un promedio de unos 700.000 por cada una, apenas un voto de confianza en la nueva tecnología energética- no aumentaron su contribución¹⁸. Los costos de escalación provendrían de fondos públicos, exclusivamente.

A principios de 1974, exactamente antes de la conferencia de Londres sobre reactores rápidos, noticias del diario francés *Le Monde* y de otros medios, sugirieron que el reactor rápido regenerador soviético BN-350, en Shevchenko, en el Mar Caspio, también tenía sus problemas. El BN-350 era el primero de la nueva generación de centrales de potencia de reactor rápido en alcanzar criticidad, en noviembre de 1972, ganando el Phénix francés por quince meses. Pero el informe de *Le Monde*, basándose en la evidencia proporcionada por un satélite norteamericano de reconocimiento, señaló que el BN-350 había sufrido un accidente de algún tipo (aparentemente, uno cuyos efectos fueron visibles desde el exterior de la instalación).

En la conferencia, el doctor N V Kraznoyarov, subdirector del Instituto Soviético de Investigación de Energía Atómica, en Dimitrovgrad, declaró en respuesta a las preguntas planteadas que - como todos sus parientes - el BN-350 había tenido problemas con los generadores de vapor, tratando de evitar la mezcla del sodio y el agua. Había habido fugas -dijo- en tres de los seis generadores de vapor, dos de poca importancia y una de unos 100 kilogramos de agua. Negó que hubiera habido una “explosión” en el BN-350, pero no hizo mención de incendio, dejando a muchos delegados con la impresión de que, efectivamente, había ocurrido un incendio. Desde luego, una reacción sodio-agua, implicando 100 kilogramos de agua, podría haber desprendido una cantidad sustancial de energía. El doctor Kraznoyarov indicó que no se había intentado penetrar en el generador de vapor para evaluar el daño, dando pie a la conclusión de que se había liberado radiactividad. En el momento de la conferencia, el BN-350 estaba - de acuerdo con el portavoz soviético - otra vez en funcionamiento, con sus tres generadores de vapor restantes y trabajando al 30 por 100 de su potencia. Como en otras cuestiones tecnológicas, los soviéticos no tienen el hábito de discutir sus propios problemas abiertamente, y la conferencia de Londres no proporcionó muchos más detalles.

Mientras tanto, continuaban los trabajos en el BN-600, otro avance en potencia, en Beloyarsk. Los franceses, convencidos de que podrían ahorrarse este paso intermedio, se prepararon, de acuerdo con otros socios europeos, para construir un Super-Phénix de 1.200 MWe. Los británicos continuaron sus reflexiones sobre un reactor rápido comercial de tamaño similar. Aunque la llegada del primer reactor rápido comercial parecía alejarse según avanzaba el tiempo, una nota oficial

¹⁸ En marzo de 1977, la Administración Carter decidió suspender indefinidamente la construcción del reactor regenerador de Clinch River.

presentada por la UKAEA a la conferencia de marzo de 1974 señalaba que Gran Bretaña dispondría de veinticinco centrales de potencia de reactor rápido, de 1.000 MWe, en funcionamiento hacia el año 2.000 (unas previsiones que resultaron para algunos observadores como - por decir lo mínimo - improbables). Improbable o no, la UKAEA gastó unos 32 millones de libras en el año 1973-74 en el desarrollo del reactor rápido (más de dos tercios del presupuesto del programa energético).

Una parte de la industria nuclear británica tenía un tema más inmediato en su mente: la sospecha de que los problemas podían surgir no solamente de los reactores sino también de cualquier punto del ciclo nuclear. La British Nuclear Fuel (empresa estatal Combustible Nuclear Británico, BNF), operadora desde 1971 de Windscale y de otras instalaciones dependientes de la UKAEA, había adaptado el edificio B204 para servir como planta final para el reprocesado del combustible óxido. Pero el 26 de septiembre de 1973, a las 10.55 de la mañana, mientras los empleados estaban empezando a reprocesar un paquete reciente de combustible irradiado, las alarmas de radiación empezaron a sonar. Un instructor sanitario advertido por una alerta de radiación beta en el piso décimo, pasó la información al encargado de la planta, en el piso noveno. El instructor continuó bajando las escaleras, ordenando al resto de los empleados que abandonaran el edificio. Mientras que los empleados se dirigían al Centro de Control Sanitario, en el edificio B217, dos veteranos con máscaras respiratorias buscaron en el edificio B204, encontrando cuatro personas más que no habían oído el aviso. El encargado de la planta y el director, llevando también máscaras respiratorias volvieron al edificio B204 a las 11. 15 y a la media hora habían parado la planta. Los treinta y cinco empleados que habían estado en el edificio B204 resultaron con contaminación, en piel y pulmón, del radioisótopo emisor beta rutenio-106. La exposición de la piel no se consideró significativa, pero las cantidades inhaladas en los pulmones de treinta y cuatro de los empleados llegaban a los 5 microcurios, y uno resultó tener 40 microcurios en sus pulmones. La National Radiological Protection Board (Oficina Nacional de Protección Radiológica) estimó que esto incrementaría en un 1 por 100 la probabilidad de contraer cáncer de pulmón durante su vida.

Una concienzuda investigación de la Inspección de Instalaciones Nucleares identificó finalmente la confluencia, ciertamente imprevisible, de circunstancias que había dado lugar al escape de radiactividad. Se encontró que una cuba de la cadena de proceso había acumulado una capa de residuos sólidos radiactivos que, inesperadamente, reaccionó con una aportación de disolvente Butex acidificado, procedente del arranque de la cadena. La reacción generó suficiente presión del gas como para expulsar parte de la radiactividad contenida a través de un precinto de un eje accionador que atravesaba la cámara de la cuba. El informe de la Inspección sobre el episodio determinó una serie de recomendaciones que exigieron, de hecho, que se precintara herméticamente esta parte de la planta de reprocesado antes de volver a ser puesta en servicio. Se consideró que esa sección - la planta final de combustible óxido quedaría fuera de servicio indefinidamente. La Inspección también observó, con disgusto, la despreocupación del personal de la planta, que había prestado tan poca atención a las alarmas de radiación. Los propios sistemas de alarma se consideraron inadecuados, tanto en tipo como en número, y los dispositivos de emergencia dejaron mucho que desear. Sin embargo, el informe admitió que “la falta de adecuados dispositivos de emergencia era debido, evidentemente, al hecho de que no había habido ningún accidente similar en la planta ni, por lo menos según se conocía, en ningún otro lugar. Parece que no había ninguna razón para esperar un accidente así”.

El reprocesado también causaba problemas en los Estados Unidos. Diez años antes, General Electric había encontrado una nueva teoría, para reprocesar el combustible irradiado del reactor, que no generaba excesivas y problemáticas cantidades de residuos líquidos de alta actividad. El proceso se basaba en la química de los fluoruros volátiles de uranio y plutonio. General Electric estaba segura de que el nuevo proceso, llamado Aquafluor, marcaría un hito en el reprocesado, resultando

suficientemente compacto y eficiente como para utilizarse en los mismos emplazamientos del reactor. En 1968, General Electric empezó la construcción de una planta basada en el proceso Aquafluor, la *Midwest Fuel Recovery Plant* (Planta de Recuperación de Combustible de Midwest), cerca de Morris, Illinois, al sur de Chicago. Seis años más tarde, en julio de 1974, después de más de dos años de esfuerzos, General Electric elaboró para la AEC un informe en el que admitía que la planta Midwest no funcionaba ni, probablemente, funcionaría jamás. Su coste casi había duplicado la estimación original de 36 millones de dólares, pero el informe de General Electric daba pocas esperanzas de que pudiera recuperarse algo. La planta está hecha de paredes de hormigón pesado, muy difícil de dismantelar, pero las pruebas revelaron problemas de mantenimiento virtualmente insuperables en áreas que pudieran resultar contaminadas irreversiblemente por la radiactividad de alto nivel, una vez que la planta funcionase.

El fracaso de la planta puede haber dejado a General Electric fuera del mercado del reprocesado, y dejó, indudablemente, a la industria nuclear en la incertidumbre, sin instalaciones comerciales de reprocesado utilizables hasta 1977 como muy pronto. Como consecuencia, los haces de combustible irradiado llenaron por completo muchas piscinas de refrigeración y la AEC hubo de intervenir construyendo cámaras de almacenamiento en sus propias instalaciones. Mientras tanto, se fue acumulando en el combustible irradiado una cantidad constantemente creciente de material fisible utilizable, uranio-235 y plutonio-239, sumándose a los costes acumulados del ciclo del combustible nuclear. La planta de reprocesamiento de Allied Gulf, en Barnwell, Carolina del Sur, con una capacidad de 1.500 toneladas fuera de uso hasta 1979, por modificación y ampliación. Para ese entonces, estarán esperando el reprocesamiento hasta 2.300 toneladas de combustible irradiado. Mientras tanto, General Electric propuso hacer utilizable las piscinas de refrigeración de la planta de Midwest para almacenamiento de combustible irradiado; ya que el diseño de la Midwest nunca había pretendido tratar los materiales irradiados de esa forma, el conocido crítico nuclear, David Comey, del *Businessmen for the Public Interest* (hombres de Negocios por el Interés Público) denunció la propuesta por estar absolutamente fuera de lo imaginable.

La planta de Midwest no fue el único fracaso nuclear de 1974. En el verano de 1974, el Kernkraftwerk Niederaibach, un prototipo de reactor de agua pesada y tubos de presión, de 100 MWe, en Alemania Occidental, se unió a la lista de prototipos difuntos, apenas después de su criticidad y con un coste de 230 millones de marcos. En Japón, el PWR de Mihama-1, de 320 MWe, se enfrentaba a una prolongada parada. Se comprobó que hubieran bastado unas pocas fugas en el generador de vapor para causar estragos en la refrigeración de emergencia, en el caso, de un accidente de pérdida de refrigerante: el vapor podía dirigirse, a través de las grietas hasta el circuito primario, a una presión que podía impedir que el agua de refrigeración de emergencia alcanzara los puntos críticos en el momento debido. Mihama-1 había sufrido tantas fugas que parecía no existir más opción que sustituir los generadores de vapor, una operación costosa y larga. Pese a todo, en ese difícil año para la energía nuclear, nada pudo igualar a la historia del *Mutsu*.

El NS Mutsu era el prototipo de barco mercante nuclear de la Agencia de Desarrollo del Buque Nuclear, de Japón. Su viaje de septiembre de 1974 probablemente hizo retroceder más la causa de la propulsión marina nuclear que cualquiera de las peores pesadillas del almirante Rickover. La propulsión marina nuclear tiene, desde luego, una larga historia, arrancando con el USS Nautilus, de mediados de las 50, incluyendo muchos otros submarinos nucleares, americanos o no, portaviones y otros navíos nucleares, más un puñado de iniciativas no militares. Ninguna de estas últimas puede considerarse exactamente un triunfo. El NS Savannah, primer buque mercante nuclear americano, se encontró como un paria navegante, mal recibido en casi todos los puertos del mundo. La Unión Soviética, quizá teniendo esto en cuenta, construyó el Lenin, un rompehielos nuclear que no tenía por qué preocuparse con los puertos de escala y tenía la ventaja del largo

alcance, igual que los submarinos nucleares. Alemania Occidental construyó el Otto Hahn, cuya carrera, aunque no sobresaliente, ha estado al menos libre de escándalo. Pero la aventura del Mutsu redujo el tono de su defensa a] nivel de la farsa más grosera.

El Mutsu, movido por un PWR, fue botado en 1969. Recibió el nombre de su puerto de origen que estaba muy lejos de sentirse encariñado con él. Los pescadores locales temían que las descargas radiactivas del Mutsu pudieran dañar las pesquerías o, en cualquier caso, aumentar las dificultades para vender sus capturas. El Mutsu estuvo fisto para las pruebas en el mar en 1972, pero la oposición popular le impidió navegar. La gente estaba preocupada por si algo iba mal en el arranque del reactor del barco, con consecuencias imprevisibles para las ricas pesquerías de concha de la bahía de Mutsu. Laboriosas discusiones entre los representantes locales y el gobierno condujeron al establecimiento de un fondo estatal de 100 millones de yens para cubrir las compensaciones en caso de que sufrieran las pesquerías; hacia agosto de 1974 la mayoría de los representantes locales accedieron a dejar al Mutsu salir a la mar. Pero el alcalde y algunos de los pescadores seguían irreductibles, y bloquearon al buque con unos 250 pequeños pesqueros. El 25 de agosto un tifón forzó a los pesqueros a refugiarse en el puerto, y el Mutsu escapó fuera de la bahía a medianoche, utilizando energía auxiliar y con escolta naval.

En alta mar, a 800 kilómetros de la costa, el reactor alcanzó criticidad el 28 de agosto; pero según aumentaba lentamente la potencia en pruebas, se descubrió un escape radiactivo. La fuga era pequeña, aparentemente, pero ya que la puesta en servicio del reactor se estaba realizando en el mar, los operadores tuvieron que improvisar. Sus improvisaciones deleitaron a los periodistas de todo el mundo, y el Mutsu se convirtió de la noche a la mañana, en una palabra familiar, en el más embarazoso sentido de la palabra. Primero, intentaron la cocción de arroz borado hervido como un cemento de blindaje improvisado; esto fue relativamente eficaz pero no del todo, por lo tanto, recurrieron a calcetines viejos, con lo que los periodistas de servicio se regocijaron de nuevo. Hubiera sido preferible volver a puerto y llevar a cabo las comprobaciones necesarias en las instalaciones de tierra. Pero el clamor en la bahía de Mutsu estaba a un nivel tan preocupante que los ochenta y nueve miembros de la tripulación del Mutsu temieron por su seguridad si intentaban llevar el barco averiado al puerto. Como consecuencia, el Mutsu flotó sin ayuda, lejos de la costa japonesa, mientras tenían lugar furiosas conversaciones entre los obstinados pescadores y los promotores del barco nuclear. El barco anduvo a la deriva durante cuarenta y cinco días antes de que se le permitiera, por fin, el retorno, e incluso entonces bajo las más duras condiciones. Las autoridades tuvieron que acordar buscar un nuevo puerto para el Mutsu, en el plazo de seis meses, dejar el combustible en el reactor, desmantelar todas las instalaciones nucleares de tierra en el plazo de treinta meses y traspasar al alcalde las llaves de la grúa de manejo del combustible; además, el gobierno tenía que aportar cuatro millones de dólares, para establecer un fondo de compensación para el caso en que los rumores de radiactividad perjudicaran las ventas de marisco y para financiar nuevas obras públicas en Mutsu. Como ejercicio de relaciones públicas nucleares japonesas, el episodio del Mutsu - por razones físicas mucho menos evidentes, desde luego - tuvo lugar, casualmente, donde el Fukuryu Maru se había hecho a la mar veinte años antes.

Las relaciones públicas nucleares en Suecia también tuvieron su caída en picado en la última parte de 1974. El debate sobre la política nuclear sueca había sido durante un tiempo de mayor alcance que, prácticamente, en cualquier otro lugar, con vigorosa participación pública (últimamente en otoño de 1974, pidiendo la ampliación de la financiación gubernamental de unos 6.000 grupos de estudios energéticos por todo el país). En el Parlamento, algunas enérgicas intervenciones habían pedido el reexamen cuidadoso del programa nuclear sueco, teniendo en cuenta las revelaciones norteamericanas en cuanto a los sistemas de refrigeración de emergencia y otras medidas de seguridad. Se invitó a líderes antinucleares norteamericanos a hablar en Suecia, a menudo con

apoyo oficial de distinta clase. En otoño de 1974, los grupos medioambientales suecos, incluyendo Jordens Vaenner (la rama sueca de Amigos de la Tierra) y Miljoecentrum comenzaron una campaña de firmas oponiéndose a nuevas centrales nucleares en Suecia¹⁹. Estaban en esta campaña, recogiendo firmas por miles, cuando la industria nuclear sueca reveló un embarazoso paso en falso, algo que difícilmente podía llegar en un momento peor. La central nuclear de Ringhals-2, con un reactor Westinghouse, de agua a presión, estaba en su fase de puesta en servicio cuando la Inspección Estatal de Energía Nuclear descubrió que tres bombas de inyección de alta presión, no solamente estaban mal montadas e instaladas sino que eran, de hecho, las más inadecuadas, y ni siquiera cumplían los propios criterios de Westinghouse. Se ordenó que se quitaran las bombas y se reemplazaran y, mientras tanto, no se permitió que el reactor funcionara a plena potencia. Este descubrimiento proporcionó un nuevo estallido de críticas, que alcanzó los niveles ministeriales. Otras investigaciones señalaron dos bombas deficientes más en otros lugares de la planta.

Según se alargaba el catálogo de quebraderos de cabeza nucleares durante los 70, sólo los canadienses parecían mantener sus asuntos bajo control. Mientras que los Países Bajos, e incluso España²⁰, empezaban a enfrentarse a movimientos de disconformidad; y la lista de problemas en todos los lugares continuaba creciendo, la enorme central canadiense de Pickering, cerca de Toronto, sobresalía como la pieza maestra triunfante de los negocios nucleares. A mediados de 1974, el reactor CANDU, nada más que una curiosidad del mercado internacional tan sólo un año antes, resultó de pronto un vencedor. Los reactores de agua ligera se estaban encontrando con todo tipo de dificultades: rechazados por los británicos, desafiados por los defensores del medio ambiente en, por lo menos, diez países, acusados de insuficiencia en seguridad y -quizá lo más dañoso de todo- habiendo revelado serias deficiencias de sus características. Las empresas eléctricas de los Estados Unidos, con apuros financieros crecientes desde las alzas en los precios de los crudos, cortaron drásticamente la contratación de nuevas centrales generadoras, con lo que fueron las centrales nucleares -intensivas de capital- las que sufrieron más este bloqueo. A finales de 1974 se habían cancelado definitivamente ocho pedidos de reactores nucleares, y otros ochenta y seis se habían atrasado, en algunos casos por varios años. Sin embargo, en Canadá apenas había indicios de esta aversión.

Los cuatro reactores CANDU de 500 MWe de la central de Pickering-A tenían una disponibilidad bastante más alta que la mayoría de las otras centrales nucleares. El factor de capacidad -producción total real de electricidad en relación con la máxima posible- fue del 83 por 100 durante 1973, con Pickering 1 y 4, alcanzando ambos el 90 por 100. Se estaban desarrollando planes para duplicar Pickering, añadiendo una central B con otros cuatro CANDU de 500 MWe más; estaba prevista otra central todavía mayor en Bruce, en el lago Ontario; se iban preparando otros pedidos. Incluso los problemas iniciales sobre el agua pesada parecían haberse olvidado. El primer intento de Canadá de construir una planta de producción de agua pesada en Glace Bay, Nueva Escocia, a principios de los 60, se había convertido en una ruina económica; la planta no funcionó y hubo de reconstruirse completamente a un coste de muchos millones de dólares. Canadá se había visto obligada a comprar el agua pesada a la planta de la AEC de Savannah River. Pero en 1974 ya estaban en funcionamiento la planta de Port Hawkesbury, en Nueva Escocia, y la de Bruce, cerca de la central del mismo nombre, e incluso la planta de Glace Bay parecía que iba a entrar en servicio en 1975.

Entonces fue cuando, el 10 de agosto, se encontró que había fugas en tres tubos de presión del Pickering-3. En ese momento, ya se habían escapado dos toneladas de refrigerante de agua pesada

¹⁹ Esta campaña de los antinucleares suecos abocó en el referéndum de 23 de marzo de 1980, con los resultados que ya señalamos en el Prólogo.

²⁰ Las referencias de Patterson a España son así de breves. En el momento en que este libro se escribía la oposición a las centrales nucleares en España se mostraba a la altura de las más contundentes de Europa. Efectivamente, a principios de 1965 había ya una docena de proyectos nucleares congelados por la oposición popular.

en el espacio alrededor del circuito de refrigeración. El refrigerante no era solamente radiactivo - cargado con tritio formado por la absorción neutrónica del deuterio - sino que también era, al precio de unos 66 dólares por kilogramo, demasiado caro como para dejarlo perder. Se paró el reactor y se inició una prolongada inspección. Se reemplazaron los tres primeros tubos con fugas, pero pronto se hizo evidente que se estaban desarrollando fugas similares en muchos puntos de una de las caras del reactor. Las fugas procedían de delgadas fisuras, resultado de la colocación incorrecta de juntas finales, que habían ejercido un esfuerzo excesivo sobre la nueva aleación de circonio-niobio, destinada a los tubos de presión. La misma aleación se utilizaba en los reactores de Pickering-4 y de Bruce, así como en otros lugares. Mientras escribimos esto, avanzan los trabajos en la identificación, desmontaje y sustitución de los tubos con fugas en el Pickering-3, y se mantiene la vigilancia sobre el mismo tema en el Pickering-4.

No obstante, y a pesar de los pesares, seguía siendo difícil igualar a los reactores de agua ligera. Después de tres paradas, en septiembre y diciembre de 1974 y en enero de 1975, debido a grietas en tuberías de reactores de agua en ebullición en diversos lugares del país, sucedió un episodio que dio en un momento la inmortalidad a una humilde vela. La vela estaba en las manos de un electricista en la cámara de distribución de cables, bajo la sala de control de la central de Browns Ferry, en Alabama, que se acababa de convertir en la mayor central nuclear en operación del mundo, con dos BWRs de casi 1.100 MWe de potencia. A las 12,30 de la noche del 22 de marzo de 1975, un electricista y su compañero estaban comprobando corrientes de aire a través de las penetraciones de los cables en la pared, sosteniendo la vela junto a la penetración, cuando la corriente impulsó la llama y quemó la cubierta de espuma plástica de alrededor de la bandeja de los cables. Los electricistas no pudieron apagar el fuego. El aumento de temperatura fue observado por el operador del reactor, que inundó la cámara con dióxido de carbono y extinguió el fuego bajo la sala de control, pero el fuego ya se había extendido por los cables hasta el interior del edificio del reactor. Cuando empezaron a aparecer lecturas locas en los instrumentos de la Unidad Uno, el operador pulsó el botón de parada de emergencia manual. Pronto se dio cuenta de que también se estaba dando una semi-parada de emergencia en la Unidad Dos, que él no había tocado, y la velocidad de las bombas principales de recirculación iba reduciéndose. Rápidamente, pulsó la parada de emergencia de la Unidad Dos. Hasta la parada brusca de las dos unidades, éstos habían estado suministrando alrededor del 15 por 100 de la demanda total de la red de toda la Tennessee Valley Authority, puede imaginarse fácilmente las consecuencias de una desconexión repentina. El fuego continuó durante siete horas, afectando a centenares de cables. De acuerdo con una apreciación inicial de la US Nuclear Regulatory Commission (NRC - Comisión Reguladora Nuclear) el fuego inutilizó los cinco sistemas de emergencia de refrigeración del núcleo en la Unidad Uno. Se esperaba que las reparaciones de la central la mantuvieran fuera de servicio durante meses, suponiendo una factura de unos 40 millones de dólares como costes solamente de la sustitución de la electricidad no suministrada. Tanto los críticos nucleares como los defensores se mostraron de acuerdo en que había sido el máximo accidente de la historia de la industria²¹.

A principios de 1975, después de un año de dramáticos altibajos, la industria nuclear se enfrentó en todo el mundo a la evaluación de su situación (quizá por primera vez, como tal industria). En este momento era uno de los sectores industriales de mayor envergadura y de más rápido crecimiento del mundo. La lista de firmas que, en 1974, estaban relacionadas con el mercado nuclear comprendía unos 1.800 nombres sólo en la categoría de la ingeniería. Habla gigantes: Westinghouse, General Electric, Shell, Gulf, Exxon, du Pont, Atlantic Richfield, Union Carbide y muchas otras multinacionales; y había firmas más pequeñas, hasta llegar a aquellas con solamente un puñado de empleados altamente especializados y relacionados con algún esotérico aspecto de

²¹ Cuatro años después se produciría el verdadero “máximo accidente de la historia de la industria nuclear” en la central de Three Mile Island.]

esta tecnología. Había suministradores de hormigón, acero de distintas clases, plomo, cobre, grafito, boro, circonio, agua pesada, sodio, dióxido de carbono, argón, helio, resinas intercambiadoras de iones, filtros, plásticos, aisladores... y la lista se haría interminable. Había suministradores de centrales nucleares completas, de sistemas NSSS completos, de conjuntos; turbogeneradores y maquinaria eléctrica pesada, de vasijas de presión, intercambiadores de calor, generadores de vapor, tuberías, bombas, válvulas, instrumentos, elementos electrónicos, computadoras, barras de control, grúas, sistemas de emergencia, grupos electrógenos, y así indefinidamente. Junto a los suministradores de ingeniería, había suministradores de servicios, empezando por la investigación básica física y química, los análisis económicos, la financiación, el diseño de arquitectura y de ingeniería, el transporte, la comprobación y la inspección, la protección radiológica y la seguridad, el seguro y, por supuesto, el marketing y las relaciones públicas.

A comienzos de 1975, las ventas de la industria nuclear estaban descendiendo, después de una rápida expansión, debido a las circunstancias adversas de los mercados internos, especialmente en los Estados Unidos. Pero la situación competitiva de la energía nuclear como una tecnología de producción energética parecía mejorarse con cada nueva subida en el precio del petróleo, con cada incremento salarial de los mineros del carbón y con cada interrupción de los suministros de gas natural. La tecnología básica se conocía bien, con un cuerpo en crecimiento rápido de experiencias cada vez más ampliamente diseminadas. Pero no todo iba bien en esta industria. Las empresas eléctricas, clientes principales de la industria nuclear, también se enfrentaban a agudas dificultades financieras que repercutían en la industria nuclear en la forma de cancelaciones y retrasos en los pedidos de centrales de potencia. Pero probablemente es cierto que las preocupaciones de la industria estaban asentadas más profundamente, surgiendo de la constatación tardía de que la inquietud del público frente a la energía nuclear no se reducía a grupos de chiflados acérrimos, sino que se había hecho más extensa y mejor informada, entre sectores sociales cada vez más influyentes. La industria nuclear había seguido su camino llevada por el momento favorable de su tecnología, y prestando sólo una atención menor a las críticas. Ahora estas influían, indudablemente, en las decisiones económicas, para detrimento de la industria nuclear.

El Fórum Atómico Industrial, la asociación comercial nuclear mayor del mundo, se preparó para montar una gran campaña, en 1975, a favor de la energía nuclear. Un grupo de veintiocho científicos norteamericanos de renombre, encabezados por el físico nuclear ganador del Premio Nobel, Hans Bethe y por el durante mucho tiempo comentarista y crítico Ralph Lapp, más otros laureados con el Nobel, publicaron el 16 de diciembre de 1974 una carta sobria y breve en la que concluían: "A cualquier escala, los beneficios de un combustible limpio, barato e inextinguible sobrepasan con mucho a los posibles riesgos. No podemos ver una alternativa razonable al uso progresivo de la energía nuclear para satisfacer nuestras necesidades energéticas." Pero la oposición nuclear estaba en condiciones de señalar a los Premios Nobel que disentían totalmente de esta afirmación. Estaba claro que, en los meses y años por venir, el debate sobre los reactores continuaría desarrollándose. También estaba claro, que las consideraciones fundamentales no eran las de los costes marginales, comparando entre sí las fuentes de energía. Había incertidumbres y peligros relacionados con el carbón, con el petróleo, con el gas natural, con otras fuentes de energía, en lo referente a la interrupción de los suministros energéticos. La opción nuclear tenía que evaluarse en estos contextos y en otros, aún más difíciles de cuantificar. No se trataría de una cuestión de balances económicos, sino de valores humanos: es decir, de ética.

8. Evaluando los costes y valorando las cuentas

La eficiencia de los costes no se consideró un criterio importante en el proyecto Manhattan. Lo que importaba, en primer lugar, era si la tecnología podía producir realmente una bomba y, luego, si la podía producir en el momento oportuno; ambos criterios se vieron, evidentemente, satisfechos. Desde entonces, el objetivo era, como señaló un general americano, “un cañonazo para un gamo”. Pero los primeros años de desarrollo nuclear en los Estados Unidos, la Unión Soviética, Gran Bretaña y Francia, casi exclusivamente preocupadas con las aplicaciones militares, fueron ajenas, en gran medida, a la fría realidad de la economía elemental. Aún así, los que se preocupaban de las aplicaciones civiles vieron desde el primer momento que debían tenerse en cuenta criterios económicos básicos.

Uno de los primeros intentos coherentes de hacer números con los proyectos nucleares fue el de R V Moore, de Harwell, en Gran Bretaña, que elaboró en 1950 un folleto titulado “Reactores de Uranio Natural: Factores Económicos de la Producción de Energía”. Moore identificó correctamente la mayoría de los factores cuantificables que todavía serían importantes un cuarto de siglo después. El procedimiento de evaluación que Moore empleó fue el sistema rutinario de valoración de un proyecto del tipo de una central energética; más o menos, el que se usa actualmente. Es especialmente adecuado para la comparación de diferentes opciones de inversión, como por ejemplo una central nuclear y una central de carbón de la misma potencia. Indicaremos, brevemente, cómo utilizaron Moore y otros analistas posteriores la técnica de valoración y los resultados que obtuvieron. Primero, describiremos el procedimiento.

El producto comercializable de una central energética es la electricidad. El coste de producción es, por una parte, el coste de construcción de la central y, por otra, el coste de funcionamiento. El coste de construcción de la central el coste de “capital” es una inversión y conlleva intereses año a año, mientras que el valor del capital va bajando gradualmente hasta el fin de la vida útil de la central. Estos costes acumulados del capital pueden distribuirse entre las unidades de electricidad producida, como parte del coste por unidad. Igual sucede con los costes de funcionamiento: combustible, mano de obra, mantenimiento, seguro, impuestos, etc.

En principio, como consecuencia, es fácil establecer el coste de cada unidad de electricidad (kilovatio-hora) producida por una central y, sobre esta base, decidir si la central es una inversión conveniente por sí misma o en comparación con otras alternativas. En la práctica esto no tiene nada de sencillo. Por diversas razones, una central no funciona siempre a su potencia máxima de diseño. Deben aplicarse valoraciones precisas a sus características reales y comprobar en cuanto se aproximan estas características al modelo ideal del diseño.

Una magnitud usual de las características es el “factor de carga” de una central, que es la fracción del funcionamiento máximo posible que alcanza realmente durante un cierto período de tiempo. A veces, esto se expresa como “factor de disponibilidad” o como “factor de capacidad”. “Disponibilidad” es la fracción de tiempo que una central está disponible, es decir, es capaz de funcionar. Sin embargo, no identifica los períodos en que la central está funcionando pero, por cualquier razón, suministra menos potencia de la máxima nominal. La “disponibilidad” no es medida consistentemente. Si una central está parada por recarga, la disponibilidad puede venir dada por una fracción de año completo. O puede venir dada por una fracción de solamente una parte del año no ocupada por la recarga; esto da una medida más alta de su disponibilidad.

Una medida más indicativa del funcionamiento es el “factor de capacidad”, cantidad total de unidades producidas, como una fracción de la cantidad que se produciría si la central funcionara a la

máxima potencia durante todo el año. El factor de capacidad tiene en cuenta el funcionamiento a baja potencia, así como el período total de parada.

El funcionamiento a baja potencia de una central puede ser consecuencia de problemas de funcionamiento o de restricciones impuestas por las autoridades que conceden los permisos. Puede ser consecuencia también de las características de funcionamiento del sistema eléctrico completo al que pertenece la central. Una compañía eléctrica como la CEGB de Gran Bretaña utiliza centrales en las que esto se llama “orden de mérito”. Estas centrales con los más bajos costes de generación funcionan todo el tiempo a la máxima potencia, suministrando la electricidad que se necesita a lo largo de todo el día y de todo el año. Estas centrales se llaman “centrales de carga de base”. Cuando la demanda de electricidad excede la carga de base por ejemplo, en días fríos y a las horas de comer se suman centrales adicionales al sistema para hacer frente a las puntas: estas centrales se llaman “centrales de punta”. El orden en que se añaden las centrales, que corresponde aproximadamente al orden en que van aumentando sus costes de funcionamiento, se llama “orden de mérito”.

En general, las centrales con altos costes de capital pero un bajo coste de funcionamiento se usan como centrales de carga de base, ya que las cargas de capital tienen que pagarse tanto si se usan como si no. Las centrales nucleares, con su enorme coste de capital, se usan hoy invariablemente como centrales de carga de base. Como consecuencia, se confía en que las centrales nucleares funcionen continuamente a la máxima potencia. No obstante, como las redes de suministro eléctrico van aumentando en capacidad nuclear y como las centrales envejecen, llega un momento en que las centrales nucleares más antiguas descienden en su orden de mérito. La caída resultante del factor de capacidad puede hacer cada vez más gravosos los costes acumulados del capital de las centrales nucleares en sus últimos años; pero es difícil anticipar cual será su efecto preciso.

El coste de capital de una central nuclear ha sido siempre considerablemente mayor que el de una central de combustible fósil de potencia equivalente. Pero los analistas, desde Moore en adelante, han mostrado que los costes de funcionamiento de la central nuclear pueden ser menores que los de la central de combustible fósil (suficientemente menores, en condiciones adecuadas como para hacer más barata la electricidad nuclear).

Los costes de combustible de una central de materia prima fósil han sido generalmente un poco ambiguos, tanto para el carbón como para el petróleo o el gas. Los costes de combustible fósil deben tener en cuenta también el transporte del combustible a la central y en el caso del carbón la eliminación de las cenizas. Los costes del combustible nuclear deben estimarse de forma diferente. No se trata solamente de la extracción del uranio del suelo, transportándolo a la central y colocándolo en el reactor. El uranio ha de convertirse en combustible, cuyo diseño tiene una influencia fundamental en la cantidad de energía que puede generarse para una cantidad dada de uranio. Ya hemos mencionado la conveniencia de las altas temperaturas que den una buena calidad de vapor de agua y, como consecuencia, una eficiencia térmica alta, y unos elementos combustibles de alto grado de quemado y vida más larga. Estos factores afectan a la cantidad de electricidad vendible que se produce con una cantidad dada de uranio. El coste de combustible no solamente incluye el coste del mineral de uranio, sino también, el coste adicional, muy importante, de su transformación en elemento combustible. Si el diseño del reactor exige uranio enriquecido, debe incluirse el coste del enriquecimiento, que es el componente más abultado del coste total del combustible. Otro coste adicional aparece cuando el combustible usado se reprocesa para la recuperación de material fisible utilizable y la separación del residuo radiactivo.

No obstante, la energía extraordinariamente concentrada del uranio compensa el proceso adicional. Utilizando los datos disponibles en 1950, Moore encontró que la electricidad generada con la

tecnología nuclear disponible podía ser comparable en coste a la del carbón (alrededor de 0,5 peniques antiguos por unidad). Moore no asignó ningún valor al plutonio que podía extraerse del combustible usado en el reactor pero propuso que, a largo plazo, solamente un sistema que utilizara este plutonio resultaría interesante económicamente, debido a la disponibilidad limitada de uranio. Estas consideraciones, también influyeron desde luego, en la originaria creencia británica de que solamente el sistema regenerador rápido utilizando el uranio-238 así como el uranio-235, fisible y más escaso sería satisfactorio.

A lo largo de los años 50 y buena parte de los 60, el status económico de la energía nuclear dependió completamente de los precios corrientes de los combustibles alternativos carbón, petróleo y gas natural en las economías nacionales. En los Estados Unidos, como indicábamos en el Capítulo 4, la abundancia de petróleo y gas propios, así como de carbón, mantuvo los precios bajos; como consecuencia, el precio de “equilibrio” para el que la electricidad nuclear y la de combustible fósil cuentan lo mismo era lo suficientemente bajo como para hacer que la opción nuclear fuese económicamente dudosa. En Europa especialmente en Gran Bretaña y Francia el caso fue distinto. El carbón estaba disponible pero no, según parecía, en cantidad suficiente como para satisfacer el rápido incremento de la demanda de electricidad. Pese a todo, resultaba claro que cualquier iniciativa hacia la energía nuclear tendría que ser gradual, y su coste no podría resultar inferior al del carbón durante algunos años. Además, también era evidente que habrían de construirse por lo menos algunas centrales no rentables para dar un fundamento adecuado a la rentabilidad futura de la energía nuclear. Tanto Gran Bretaña como Francia encontraron un compromiso aceptable construyendo Calder Hall, Chapelcross y Marcoule G1, G2 y G3 con el objetivo militar de la producción de plutonio y con el objetivo civil de la producción de electricidad. En los Estados Unidos, donde los reactores no rentables parecían más inevitables aún a los precios corrientes de combustible fósil, la AEC acometió la construcción de la primera generación completa de reactores civiles, ocho de los cuales demostraron en su momento ser tan poco rentables (o inmanejables) que hubieron de cerrarse definitivamente hacia 1970.

Sin embargo, en Gran Bretaña, la primera generación de reactores civiles demostró, a su debido tiempo, haber sido una inversión excelente. Pese al alto coste de capital, las centrales Magnox resultaron tan fiables en operación que sus costes de funcionamiento durante los años 70 fueron comparables con los de las mejores centrales de combustible fósil. Incluso después del descubrimiento de efectos de corrosión inesperados, que exigieron la disminución de la potencia de los reactores reduciendo la máxima temperatura de operación, las centrales Magnox permanecieron entre las mejores de toda la red eléctrica británica. Después de 1970, cuando los precios internacionales del petróleo iniciaron su estratosférica subida, las centrales Magnox resultaron mejores que nunca, exceptuando la última y más potente, Wylfa, que estuvo agobiada de problemas desde su puesta en marcha.

El coste de una central eléctrica depende, por supuesto, de su tamaño: cuanto mayor sea, más cara resulta. No obstante, el coste no aumenta proporcionalmente; doblar la potencia no implica duplicar el coste. La magnitud principal es el coste por kilovatio de potencia; las centrales mayores cuestan menos por kilovatio, bajo ciertas condiciones. En 1950, se dijo que la central de 90 MWe de Moore había costado nueve millones de libras sin incluir la carga inicial de combustible, esto es, 100 libras por kilovatio. De la primera generación de centrales Magnox, las primeras y más pequeñas, como Berkeley y Bradwell, arrojaron costes de alrededor de 1.80 libras por kilovatio Wylfa cayó notablemente más abajo aunque no como se había esperado- a menos de 100 libras por kilovatio.

En abril de 1964 se anunció el segundo programa nuclear británico en un “Libro Blanco” que, efectivamente, admitió que el modelo Magnox había funcionado bien y que tenían que acometerse

modelos más compactos de uranio enriquecido. Entre éstos figuraban el reactor británico avanzado refrigerado por gas (AGR) y los reactores norteamericanos del agua ligera (PWR y BWR).

Solamente unos meses antes, en diciembre de 1963, la compañía Jersey Central Power Light había encargado a General Electric el reactor de agua en ebullición de Oyster Creek, de 640 MWe, sin subvención de la AEC; por fin pareció que había llegado la hora de la energía nuclear rentable en los Estados Unidos. No obstante, las cifras de costes disponibles en ese momento demostraron adecuadamente que encubrían una subvención, no de la AEC, sino de General Electric, que consideró claramente la venta como un reclamo para provocar nuevos encargos y, presumiblemente, para hacer caer sus propios costes a un nivel en el que las ventas futuras le supusieran un beneficio que mereciese la pena. La oferta ganadora de General Electric para Oyster Creek fue para una central de 515 MWe de potencia, a un coste de 134 dólares por kilovatio, con la pretensión adicional de que podría proporcionar 640 MWe, reduciendo de esta manera el coste unitario a la impresionante cifra de 108 dólares. En los tres años siguientes, como indicábamos en el Capítulo 6, las hasta entonces indecisas empresas empezaron a hacer cola para comprar reactores de agua ligera (más de treinta de ellos, con dimensiones que alcanzaban el nivel de los 1.000 MWe, incluyendo dos reactores de 1.065 MWe para la compañía Tennessee Valley Authority, en el corazón del territorio carbonífero). Parecía como si los costes globales de las centrales nucleares hubieran caído, por fin, por debajo de los de su competencia.

En Gran Bretaña, el gobierno anunció el 25 de mayo de 1965 que el segundo programa nuclear se basaría en el reactor avanzado refrigerado por gas, y la CEGB encargó, en agosto, la central de Dungeness B, que resultó ser un desastre. La CEGB publicó un informe analizando el caso financiero de la central AGR de Dungeness, comparándola con el pedido inmediato siguiente (un reactor General Electric de agua en ebullición), la central Magnox de Wylfa y la central de carbón de Cottam, situada en la región de costes de carbón más bajos. En vista de la suerte que sobrevino a Dungeness B, resulta conmovedor considerar los cálculos de costes de la CEGS a través de tres variables significativas. Teniendo en cuenta el factor de carga, la vida de la central y las tasas de interés, la CEGB estuvo en condiciones de demostrar que la central de Dungeness B suministraría electricidad a los costes de generación más coste de capital más coste de funcionamiento - es decir, a 0,457 peniques antiguos por unidad, contra 0,489 peniques para un BWR de la misma potencia. No dio cifras globales para las centrales Magnox y de carbón, pero su coste anual global real para la red, funcionando en orden de mérito durante su período de vida, se calculó en 12,5 libras por kilovatio y por año, para Wylfa; en 9 libras por kilovatio y por año, para Cottam; y en 7,8 libras por kilovatio y por año para Dungeness B. Estas tres centrales, posteriormente, fracasaron en el intento de alcanzar sus características programadas, con Wylfa consiguiendo un desalentador 26 por 100 de factor de carga en 1973 y un 24 por 100 en 1974, Cottam afectada por problemas de turbogenerador y Dungeness considerada seriamente por algunos como potencialmente clausurable; resulta tentador, en estas circunstancias, evocar aquello de que “el hombre propone y Dios dispone”.

Hacia diciembre de 1973, la CEGB, en apoyo de su propuesta para un gran programa de reactores norteamericanos de agua ligera, aducía costes de un orden algo diferente. El Comité Parlamentario Selecto de Ciencia y Tecnología, fue informado de que, en condiciones apropiadas, la electricidad producida por los reactores Magnox costaría 0,72 peniques por unidad, para una central que costase 116 libras por kilovatio; la electricidad de un reactor avanzado refrigerado por gas, costaría 0,57 peniques por unidad, para una central que costase 89 libras por kilovatio; la electricidad de un reactor de agua pesada generador de vapor costaría 0,51 peniques por unidad, para una central que costase 67 libras por kilovatio; y la electricidad de un reactor de agua a presión costaría 0,46 peniques por unidad, para una central que costase 50 libras por kilovatio. Estos costes de capital se refieren solamente al sistema nuclear de suministro de vapor, no a la central completa; la CEGB,

además, complicó las comparaciones cotizando el coste de oportunidad de las alternativas, que es un procedimiento de contabilización que tiene en cuenta todos los gastos; y los ingresos, adelante y atrás al mismo tiempo que los intereses propios a descuentos, para situarlos todos en una misma fecha. Los cálculos de oportunidad son, sin embargo, susceptibles de sufrir un fiasco, como ya quedó demostrado tan implacablemente por el segundo programa de energía nuclear, cuando la programación se sale de madre, al igual que cuando cambian los tipos de interés. El ejercicio de la CEGB se convirtió, en cualquier caso, en algo académico debido a la decisión siguiente del gobierno sobre un programa posterior mucho menor, cuyo status financiero está todavía por verse.

En los Estados Unidos, la industria nuclear observaba detenidamente el progreso de los costes de generación, que ascendían en todos los frentes, tanto para el combustible nuclear como para el fósil. La industria aludió a una “curva de aprendizaje”; se consideró que los factores de disponibilidad y de capacidad de una central nueva o de un conjunto de centrales podrían ser bajos, pero mientras el proceso de aprendizaje identificaba y resolvía los fallos, las variables características se mejorarían hasta una disponibilidad mayor del 80 por 100 y un factor de capacidad casi igual de alto. En realidad, permanecieron obstinadamente mucho más bajos. En mayo de 1974 la AEC publicó un informe con las estadísticas de 1973, sobre la disponibilidad y la capacidad de las centrales nucleares. El factor de disponibilidad, para los treinta y siete reactores de agua ligera que habían estado en funcionamiento comercial al menos los tres últimos meses de 1973, fue del 70 por 100, y el de capacidad, de un simple 58 por 100.

En noviembre de 1974, David Comey, del *Businessmen for the Public Interest* (Hombres de Negocios para el Interés Público) se preguntaba en el *Bulletin*: ¿Puede la baja capacidad acabar con la energía nuclear? Su reflexión se basaba en el análisis de las razones por las que la disponibilidad y la capacidad se mantenían obstinadamente bajas. Comey concluía en que la “curva de aprendizaje” elevaría la disponibilidad y la capacidad, hasta un 70 por 100 aproximadamente, hacia el tercer o cuarto año de operación de la central. Pero señaló que, a continuación, las variables mostraban una caída acusada, debido, no a problemas propios de juventud, sino a problemas de envejecimiento prematuro: corrosión, fatiga, acumulación de impurezas radiactivas que complicaban al mantenimiento, y cosas así. El análisis mostraba que las centrales que llegaban al séptimo año de funcionamiento alcanzaban factores de capacidad global anual bastante por debajo del 40 por 100, lo que mostraba con claridad una alarmante tendencia para la industria, si estaba dispuesta a continuar.

A principios de 1975, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (sucesora de la AEC) anunció que cuarenta y dos centrales nucleares comerciales en funcionamiento en 1974 tenían una disponibilidad media del 68,5 por 100 y un factor de capacidad media del 57,2 por 100, desde cualquier punto de vista, no había motivos para sentirse orgullosos. En términos económicos básicos, la energía nuclear parecía estar en dificultades.

Al final de los años 60, sin embargo, se hizo evidente que los costes de producción de electricidad no destacaban en los cálculos. La extracción del carbón mataba y mutilaba a los mineros y destruía el paisaje; su combustión arrojaba dióxido de azufre al aire por miles de toneladas, acarreando daños para la salud en cada bocanada. La extracción y el transporte del petróleo producía desastres como el del *Torrey Canyon* y el de la plataforma *Santa Bárbara*, cubriendo el litoral de suciedad y causando estragos duraderos en la ecología marina. El gas natural estaba menos cargado de desagradables repercusiones, pero era probable, desgraciadamente, que se agotara en una generación y como el carbón y el petróleo podía usarse mejor como materia prima para la industria química, para la que los hidrocarburos fósiles eran (y son) irremplazables. Durante un corto espacio de tiempo estos argumentos reforzaron la tendencia hacia la energía nuclear que resultaba, por

comparación, limpia, segura y disponible en un futuro indefinido. Pero la luna de miel nuclear se desvanecía.

Ciertos aspectos de la energía nuclear, de profunda significación económica, habían quedado también sin consideración. Estaba, para empezar, el importante capítulo de la investigación y el desarrollo, cuyo coste se había cargado casi exclusivamente a los presupuestos militares en todos los países. Estaban las importantísimas instalaciones del ciclo del combustible: minas y fábricas de concentrado de uranio, plantas de conversión en hexafluoruro, plantas de enriquecimiento, plantas de fabricación de combustible, plantas de reprocesado del combustible, instalaciones de almacenamiento de residuos y sistemas de transporte (todos ellos desarrollados y construidos con fondos militares para la producción de armamento). En la medida en que las aplicaciones civiles de la energía nuclear se hacían cada vez más importantes, se fueron perfilando esfuerzos para establecer una distinción clara entre los aspectos civiles y militares del tema; pero los resultados no convencieron. Sólo durante los años 70, cuando las instalaciones construidas con fines militares iban alcanzando el final de su vida útil, se hizo posible anticipar el capítulo que habría de añadirse al coste de las instalaciones principales en cualquier punto del ciclo nuclear.

Desgraciadamente para la industria, al final de 1974 la situación del ciclo civil del combustible resultaba precaria, especialmente en los Estados Unidos. Como ya hemos indicado, las tres plantas civiles de reprocesado no estarían disponibles hasta 1977, como muy pronto, y parecía que la planta de recuperación de combustible de Midwest, de General Electric, iba a suponer una pérdida de 65 millones de dólares. Las instalaciones no gubernamentales de enriquecimiento estaban teniendo serias dificultades, que trascendían a las etapas previas. Pese a haberseles dado acceso a las informaciones confidenciales de la tecnología del enriquecimiento, la industria privada no estaba dispuesta a acometer una construcción de ocho años, periodo necesario para una planta de enriquecimiento, sin recuperación de la inversión y con intereses en un doble concepto. Los influyentes representantes de la industria nuclear norteamericana, dirigidos por Craig Hosmer, miembro durante largo tiempo del JCAE, urgieron la creación de una Corporación Norteamericana de Enriquecimiento (una empresa de enriquecimiento nacionalizada). En cualquier otro contexto, una instalación energética nacionalizada dentro, del sector civil en los Estados Unidos hubiera sido una herejía incalificable; pero ahora podía materializarse.

En cualquier otro lugar, la idea de compañías energéticas nacionalizadas es, desde luego, menos impensable. La British Nuclear Fuels Ltd, la empresa del ciclo del combustible propiedad por entero de la UKAEA, anunció planes, a fines de 1974, para invertir unos 500 millones de libras en capacidad adicional de enriquecimiento y reprocesado del combustible (El gobierno británico, a fines de 1974, rechazó una petición de asistencia financiera para ayudar a la British Nuclear Fuels a construir una planta piloto de solidificación de residuos de alta actividad; los recursos debían obtenerse en los propios presupuestos de la compañía, si había de introducirse esta tecnología). Durante varios años, la British Nuclear Fuels, en asociación con firmas germanooccidentales y holandesas, ha ido desarrollando la tecnología de enriquecimiento por centrifugación gaseosa. La firma conjunta CENTEC ha ido fabricando centrifugadoras, y URENCO ha empezado a construir plantas de enriquecimiento por centrifugación en Capenhurst, Gran Bretaña y en Almelo, en Holanda. Francia, mientras tanto, ha emprendido la construcción de una planta civil de difusión gaseosa de Tricastin, con otros tres socios europeos. La Unión Soviética ha empezado también a ofrecer servicios de enriquecimiento a clientes extranjeros. No es una idea a descartar que los Estados Unidos puedan, en los años 80, ser importadores de uranio enriquecido, después de haber sido exportadores durante largo tiempo. Pero se puede asumir con seguridad que al contrario que en los primeros tiempos, cuando la AEC suministraba uranio enriquecido para fines civiles a precios muy bajos los suministradores futuros podrían cargar lo que el mercado pueda permitir sea quien

sea el comprador. Un anticipo de esto se produjo en 1973-74, cuando la AEC pidió que los clientes extranjeros firmaran los contratos con ocho años de antelación, con severas cláusulas de penalización (un gesto que fue interpretado como un intento de frenar el trasvase de clientes hacia los suministradores europeos de uranio enriquecido). Los precios de trabajo de separación han evolucionado desde menos de 30 dólares por trabajo de separación de un kilogramo a 100 dólares por kilogramo, precio establecido por British Nuclear Fuels a principios de 1975 para suministros a principios de 1980.

La British Nuclear Fuels y otros suministradores están ahora empezando a exigir que los compradores futuros se comprometan con la mayor antelación a suscribir las inversiones de capital que requieren sus pedidos. Si este proceder se convierte en usual, los costes nucleares de funcionamiento están obligados a subir; conseguirán también que toda la industria quede inextricablemente unida, de tal forma que un fiasco en cualquier punto puede trascender a todo el sistema internacional.

Los propios suministros de uranio han empezado a causar preocupación en algunos lugares. El precio, durante largo tiempo de base, de seis dólares por libra de “torta amarilla” (U3O8) es decir, unos 13 dólares por kilogramo ha aumentado superando el nivel de los 10 dólares y va camino de los 20 dólares para contratos anunciados recientemente, especialmente los que conciernen a suministros a lo largo de varios años²². Las previsiones de potencia nuclear en los Estados Unidos, en Europa, y en todo el mundo, establecidos en relación a reservas conocidas de uranio de diversos grados, y costes, han sido contestadas por algunos analistas, que anuncian una posible reducción de la oferta antes de la próxima centuria, salvo en el caso de que se realice un giro importante hacia los reactores alimentados por plutonio. Una adecuada mezcla de reactores regeneradores y térmicos sería capaz de utilizar casi todo el uranio, en lugar de solamente el uno o el dos por ciento, pero esto entrañaría costes adicionales; de extracción y refabricación repetida de material fisible.

Pero otros comentaristas señalan que el coste del mineral de uranio es solamente una parte muy pequeña del coste de la electricidad producida por una central nuclear, y que, como consecuencia, incluso una subida del orden a 50 dólares la libra de “torta amarilla” solamente produciría un pequeño incremento en el coste de la generación de electricidad. En 1972 se evaluaban en unas 866.000 toneladas de uranio las reservas mundiales razonablemente aseguradas a un precio de menos de 10 dólares por libra de “torta amarilla”. Un importante informe de la OCDE sobre “Uranio: Recursos, Producción y Demanda”, publicado en agosto de 1973, citando las cifras anteriores, describía el incremento de las actividades de exploración en muchas partes del mundo, y analizaba las posibles tasas de producción y consumo, teniendo en cuenta los incrementos previstos de potencia instalada nuclear. El informe apuntaba que la producción anual de uranio sería del orden de 50.000 toneladas anuales hacia 1978, con una demanda que alcanzase 60.000 toneladas anuales en 1980, y 120.000 en 1985.

22

Los precios actuales, después de una clara estabilización debido al descenso de la demanda, rondan los 41-42 dólares la libra de U3O8.

Tales extrapolaciones son, desde luego, muy sensibles a la programación, así como al volumen del incremento de capacidad nuclear y a la posible introducción del reciclaje del plutonio en los reactores térmicos. Los recientes retrasos de las centrales, especialmente en los Estados Unidos, y la caída del incremento de la demanda de electricidad, requieren, sin ninguna duda, la reconsideración de esa postura. Porque el suministro futuro de uranio tiene que ser claramente analizado, especialmente debido a que los reactores encargados en 1975 requerirán presumiblemente uranio hasta, por lo menos, el año 2005 después de Cristo.

Quizá que el aspecto financiero más controvertido de la energía nuclear civil sea el seguro de responsabilidad frente a terceros en caso de accidentes. A mediados de los 50, como ya hemos señalado, los explotadores con perspectiva de centrales nucleares en los Estados Unidos se echaron atrás, preocupados ante la monumental suma que tendrían que pagar como consecuencia de un accidente grave de reactor. Las cifras adelantadas por WASH-740 estaban muy alejadas de los datos actualizados. Por una parte, la probabilidad de un accidente se consideraba como ciertamente muy baja. Pero por otra, las impresionantes consecuencias posibles, en el caso en que ocurriese esta circunstancia improbable, supondrían sumas de dinero de diez a cien veces las hasta entonces contempladas para garantía a terceros. Incluso sin referirse a las dimensiones humanas de un desastre tal, estaba claro que la mayor empresa del país quedaría hundida financieramente mucho antes de cubrir sus responsabilidades; y lo mismo, la mayoría de sus aseguradores.

El punto muerto quedó superado por la promulgación de la “Ley Price Anderson”, de 1957, que establecía el principio de un límite máximo en la responsabilidad del explotador frente a la responsabilidad de daños a terceros, y aportaba un “paraguas” federal de cobertura extra de, inicialmente, 60 millones de dólares por aseguradores privados más 500 millones por el gobierno. La Ley PriceAnderson también introdujo algunas cláusulas bastante específicas en las políticas de seguro que se establecieron como consecuencia entre los explotadores de un reactor y el conjunto de aseguradores que asumían unidos los riesgos nucleares. Mencionaremos sólo una: después de un periodo establecido, normalmente diez años, si se comprobaba que un explotador no había protestado esta póliza eran reintegrados sus pagos con intereses; era una disposición que hubiera deleitado a cualquier padre de familia, pero que era solamente disfrutable si se de un reactor como premisa.

En Gran Bretaña, la Ley de Instalaciones Nucleares (Autorización y Seguro, de 1959, establecía una limitación semejante en la responsabilidad del operador (en la cifra aún más baja de 5 millones de libras para los aseguradores privados, más de 43 millones convertidos en 45 por una ley posterior para el gobierno). En todos los países se aplican disposiciones similares²³. Puesto que no podía esperarse que las consecuencias de un accidente nuclear respeten las fronteras nacionales, a finales de los años 1950 se iniciaron intentos para elaborar una convención internacional sobre responsabilidad frente a terceros. Los intentos continúan en 1975. Ya que otras industrias, incluyendo las de otras ramas energéticas, deben aportar su propia cobertura frente a terceros aparte de los fondos de maniobra, no quedan muchas dudas de que la industria nuclear consigue así una clara ventaja competitiva con las medidas actuales.

Hay, sin embargo, una intrigante situación que surge en los Estados Unidos. La Ley PriceAnderson

23

En España la responsabilidad de los explotadores de centrales nucleares se limita a 350 millones de pesetas.

se renovó en 1965, con dos años de adelanto, para evitar obstaculizaciones de última hora; y una jugada similar se consiguió en 1974, antes de que los más entusiastas valedores nucleares, principalmente los congresistas Craig Hosmer y Chet Holifield, se retiraran de la Cámara y, por lo tanto, del JCAE. La jugada de 1974 estalló inesperadamente: el recientemente instalado presidente Gerald Ford, prescindió del requisito que exigía la aprobación por el Congreso del hasta entonces inédito Estudio de Seguridad de los Reactores, WASH-1400, y vetó la renovación de la Ley Price-Anderson. El Congreso se renovó sin adoptar ninguna otra acción, y el Congreso entrante demostró ser mucho más escéptico sobre la opción nuclear que sus predecesores. Mientras esto se escribe se están preparando nuevas audiencias del Congreso sobre las disposiciones de la Ley Price Anderson y sobre otros aspectos del respaldo gubernamental de la energía nuclear. Es posible que el Congreso tome el WASH-1400 como base para sugerir que, ya que los accidentes de reactores parecen ser tan remotos, y ya que sus consecuencias no parecen ser tan terribles como se pensaba anteriormente, quizás ahora los explotadores de reactores norteamericanos pueden estar preparados para financiar su propia cobertura de seguridad *in toto*. Será una discusión muy interesante.

El apoyo y la subvención para investigación y desarrollo, los servicios del ciclo del combustible y el seguro son, por supuesto, temas financieros, cuantificables, aunque no fáciles de evaluar. Hay otros factores también que consiguen no figurar en un balance nuclear, factores que resultan netamente imposibles de cuantificar. Hay, desde luego un margen de argumentación numérica en relación a la gestión de los residuos radiactivos de alta actividad. Pero los costes verdaderos de producción de estos residuos y de dejarlos en herencia a incontables generaciones futuras no son monetarios, sino éticos. De forma similar, aunque más inmediata, los costes de diseño de una economía que crea y transporta materiales nucleares potencialmente bélicos, como el plutonio, por toneladas, con los riesgos que conllevan de seguridad, no son monetarios sino sociales. Los costes de protección radiológica para los trabajadores nucleares son netamente visibles, y son costes de capital y de funcionamiento que figuran en las cuentas de las empresas. Pero mucha gente considera actualmente que los costes invisibles asociados con la energía nuclear pueden ser los más pesados de soportar.

Muy curiosamente, esta intranquilidad generalizada puede tener después de todo, una expresión financiera identificable. A finales de 1974, Irvin Bupp, de la Escuela Comercial de Harvard y Jean-Claude Derian, del Centro de Alternativas Políticas, en el MIT, elaboraron un análisis sobre “Tendencias de los Costes de Capital de los Reactores de Agua Ligera en los Estados Unidos: Causas y Consecuencias”. Su análisis les llevó a una conclusión sorprendente. El coste por kilowatio de las centrales nucleares resultó que aumentaba y no disminuía, pese a esperarse un descenso si las grandes centrales más recientes experimentaran las economías de escala anunciadas. Con los datos disponibles, Bupp y Derian señalaron que, por ejemplo, los reactores encargados de 1968 esperaban costar solamente 180 dólares por kilowatio, cuando de hecho costaban 430 dólares (bastante por encima del doble). Además, la diferencia entre los costes anticipados y los costes realmente materializados continuaba ensanchándose. Las estimaciones de 1973 daban a entender que las plantas que entrasen en servicio en 1982-83 podían costar unos 700 dólares por kilowatio; pero Bupp y Derian insistían en que esas estimaciones, y eran, de hecho, poco más que una prudente conjetura. Lo que estaba incuestionablemente claro era que los costes de capital de los grandes reactores de agua ligera no mostraban síntomas de estabilizarse, y estaban de hecho, incrementándose a velocidades alarmantes; tanto que el coste de combustible, más bajo, de las centrales nucleares, estaba en peligro de quedar minimizado por los altos costes de capital.

Más inesperadas aún eran las razones que Bupp y Derian adelantaron en relación con la escalada de costes. No encontraron relación entre el coste creciente y otros factores, como los retrasos de la construcción o la duración del período necesario para autorizar un reactor y el coste consiguiente de

capital por kilowatio. Para reactores que necesitaran el mismo período total desde la concesión de la autorización hasta la criticidad, cuanto más extenso resultara el periodo de tiempo ocupado por los trámites de la autorización más alto era el coste de capital resultante por kilowatio. Bupp y Derian pudieron deducir que la oposición pública, mientras se ejerciera durante el proceso de autorización, estaba añadiendo un factor de “coste social”. Este coste adicional fue interpretado por Bupp y Derian como “obligado a una reevaluación retrospectiva del valor social de la tecnología de reactores”.

Si de alguna manera los costes “disimulados” de la tecnología nuclear formaran parte de las cuentas visibles, los programas energéticos serian mucho más capaces de evaluar las diversas opciones posibles, en términos numéricos. Pero para muchos, las cuestiones éticas seguirán siendo temas incuestionablemente éticos, cuyos costes, como tales, son simplemente irrelevantes.

9. El plutonio anda suelto

El plutonio es un elemento artificial que no existía en la naturaleza hasta 1940. Utilizando un acelerador de partículas, Glenn Seaborg y sus colegas de la Universidad de California crearon por primera vez el plutonio produciendo un átomo de una vez. Seaborg recordaba, después, haber guardado todas las existencias mundiales de plutonio en una caja de cerillas en su despacho. Las propiedades físicas y químicas del plutonio se analizaron utilizando cantidades invisibles a simple vista. Si se deja, por sí solo, una pequeña cantidad de plutonio experimenta una desintegración gradual alfa, con un período de semidesintegración de 24.400 años para el isótopo más corriente, el plutonio-239. De forma curiosísima, cuando el plutonio-239 emite una partícula alfa se convierte en uranio-235, cuya propiedad más espectacular la exhibe también el plutonio-239: la facilidad para mantener una reacción en cadena.

Unos meses después del trabajo original de Seaborg, se hizo evidente para los iniciados que el plutonio-239, como el uranio-235, podría ser materia prima para una bomba nuclear, y podría ser, en algunos aspectos, incluso mejor que el uranio-235. Como ya hemos descrito, la producción a gran escala de plutonio era un objetivo fundamental del proyecto Manhattan y de los esfuerzos de postguerra en los Estados Unidos, la Unión Soviética, Inglaterra y, después, Francia. Sin embargo, al mismo tiempo que la propiedad de ser fisible le hacía militarmente deseable y la más concentrada fuente de energía utilizable, el plutonio mostró muy pronto otros atributos de singular incomodidad. Demostró ser, como el radio, un veneno ferozmente radiactivo, peligroso en cantidades del orden de microgramos o inferiores. El plutonio producido en un reactor estaba constituido a diferencia del uranio principalmente por núcleos fisibles, y podía alcanzar criticidad si no se vigilaba, bien en forma sólida, bien en solución. Los trabajadores del plutonio notaron el temible fenómeno de la “respiración” del óxido de plutonio. Si se llena una bandeja de polvo fino fisible hasta la criticidad, su superficie vibra suavemente, dilatándose con la energía producida, haciéndose en consecuencia subcrítica, decayendo hacia la criticidad y repitiendo el ciclo indefinidamente (y emitiendo, por supuesto, una ráfaga de neutrones en cada intervalo de criticidad).

Lo que convirtió y convierte el plutonio en un tema de urgente preocupación no es simplemente su radiactividad, o su naturaleza fisible; otros “actínicos” son, al mismo tiempo, más radiactivos y más fácilmente fisibles. Pero el plutonio existe en la actualidad en cantidades que se miden por toneladas, se está produciendo diariamente en cantidades cada vez mayores y se espera que constituya un componente fundamental del ciclo del combustible nuclear del futuro, no solamente como un producto sino como materia prima. Los dos peligros, el radiactivo y el fisible, están resultando cada vez más serios. Hasta ahora, la historia del control del plutonio no puede decirse que haya sido tranquilizadora.

El riesgo de la toxicidad

En un primer momento de la pequeña historia del plutonio su naturaleza antisocial fue comprendida completamente: los científicos nucleares siempre lo trataron con profundo respeto. Pero es difícil, en el reprocesado o a escala industrial, seguir la pista a cada microgramo, incluso sabiendo que un microgramo puede resultar letal. Los técnicos que trabajan con plutonio llegaron, inevitablemente, a dar esto por supuesto (no es que se desentendieran, pero no tomaron las debidas precauciones). En Gran Bretaña, a finales de los 40, a más de un científico se le oyó decir que si se encontraba con plutonio en la herida de un dedo, se cortaría el dedo sin dudarle. Por los años 60, sin embargo, Edward Gleason todavía no sabía que había entrado en contacto con el plutonio, aún cuando le hubiese dado lo mismo tomar las mismas drásticas medidas.

No había excesiva evidencia “convinciente” de la toxicidad del plutonio en los seres humanos; debido al largo periodo de tiempo que ha de transcurrir antes de que resulten patentes sus efectos, solamente las más grandes sobredosis que en el caso del plutonio puede ser de microgramos se muestran suficientemente pronto como para ser claramente atribuibles al plutonio. Pero en el caso de Gleason resultó para muchos implacablemente convincente.

El plutonio en cuestión era un contaminante en una solución de cloruro de oro, propiedad de la AEC, que estaba siendo transportado en una bombona de vidrio de cuarenta litros rotulada como Lote 61, debe la Corporación de Materiales Nucleares y Equipo al Laboratorio Nacional Brookhaven, entre los días 4 y 14 de enero de 1963. El informe oficial de la AEC, de fecha 11 de abril de 1963, y realizado por Awon Bartlett, de la División de Inspección, incluía extensas entrevistas con toda una serie de personas que habían cruzado sus pasos con los del Lote 61. En un relato de 37 páginas de descuidos fortuitos, Edward Gleason resultó ser el único desdichado,

Mal etiquetado, mal embalado y transportado en contra de las normas, llamó la atención de Gleason en la terminal de transportes de la Eazor Express Corporation, en Jersey City, el 8 de enero de 1963. Gleason comunicó que la canasta que contenía el Lote 61 había perdido líquido; mientras la sacaba con sus manos del tráiler, el líquido se vertió desde la canasta hasta el piso del vehículo. Cuando se formó un charco, giró la canasta hacia el otro lado y el vertido cesó. Gleason no sabía, como después declaró, que la caja contenía material radiactivo y, mucho menos, que contenía una disolución de plutonio en una bombona de cristal con un tapón flojo.

La limpieza del largo rastro dejado por el Lote 61 exigió para la AEC algún tiempo y muchos miles de dólares. Desgraciadamente, no podían limpiar la gotita que rezumaba, aparentemente, de un diminuto corte en la mano de Gleason. En 1966 ya era evidente que Gleason sufría de cáncer: un sarcoma superficial que en 1968 exigió la amputación de su mano izquierda, del brazo y de parte del hombro. Los tratamientos posteriores con radiaciones no pudieron detener la extensión del sarcoma. Gleason demandó a la AEC y a las empresas implicadas en el transporte del Lote 61 y exigió dos millones de dólares por daños. La AEC y las empresas elaboraron su alegación sobre la base de que no existía evidencia concluyente de que el sarcoma de Gleason fuese el resultado de su encuentro con el Lote 61. Las estadísticas oficiales indicaban que la muerte debido a un cáncer así podía ocurrir con una frecuencia inferior a uno entre un millón de personas por año. Después de una decisión adversa de los Tribunales, Gleason murió. Su viuda ha mantenido el desafío legal contra la irreductible insistencia de los defensores en que el cáncer de Gleason había sido una millonésima parte de mala suerte.

Afortunadamente, hasta este momento, parece ser muy pequeña la evidencia del peligro profesional de los trabajadores del plutonio de la industria nuclear, militar o civil. Esto puede deberse a que la industria ha tomado siempre fuertes precauciones; en parte, al menos, puede ser debido a que se han hecho pocos esfuerzos para mantener el seguimiento de la gente que ha trabajado con plutonio. Ya que los efectos de la exposición al plutonio pueden no ser tan dramáticos como los que sufrió Gleason, y pueden necesitar muchos años para resultar manifiestos, sus causas pueden no ser reconocidas. En 1968, la AEC inició, en Hanford, un Registro de Transuránidos, con la intención de seguir los historiales médicos de los empleados que han trabajado con plutonio y otras sustancias emisoras alfa. No deben minimizarse los problemas que esto plantea, incluyendo los debidos a la intromisión en la vida privada; pero sin tales esfuerzos, no solamente en los Estados Unidos sino en otros países con empresas nucleares importantes, no podrá reunirse información adecuada sobre la patología humana del plutonio²⁴.

24

En agosto de 1964, un ingenio espacial movido por un generador de radioisótopos SNAP 9A, que utilizaba el calor generado por la radiactividad para alimentar un sistema termoeléctrico, se precipitó hacia la atmósfera y ardió. La desintegración del generador añadió 17 kilocurios de plutonio-238 a la carga atmosférica de radiactividad procedente de las pruebas nucleares (el plutonio-238, con un período de semidesintegración de 87 años, es un isótopo más intensamente radiactivo que el plutonio-239, con una actividad específica mucho más alta).

En enero de 1966, para disgusto de los Estados Unidos y consternación de España, un bombardero B52, norteamericano, que transportaba cuatro bombas de hidrógeno colisionó con un avión nodriza y se precipitó cerca del pueblo almeriense de Palomares. No hubo explosión termonuclear pero el alto explosivo del mecanismo de disparo de una de las bombas estalló y esparció plutonio en todas direcciones. Los Estados Unidos destacaron inmediatamente un batallón de limpieza de expertos en descontaminación, investigadores en seguridad radiológica y miles de personas más, completados con todo tipo de material. Se trillaron y removieron unos 2,4 kilómetros cuadrados hasta una profundidad de 25 centímetros para extraer cualquier partícula de plutonio esparcido. En unas 2,2 hectáreas correspondientes al trozo de mayor contaminación se recogió toda la vegetación y suelo, y se introdujeron en bidones para trasladarlos a las instalaciones de la AEC en Savannah River donde se enterrarían. Una de las bombas de hidrógeno hubo de ser dragada por un mini submarino en el fondo del Mediterráneo, frente a la costa española.

En enero de 1968 ocurrió una repetición del incidente en Palomares de 1966, cuando un segundo B52 se estrelló esta vez cerca de la base aérea de Thule, en Groenlandia, presentando para las autoridades de los Estados Unidos otro “problema de contaminación por plutonio de una extensa área”, según palabras de un prestigioso experto norteamericano en estas cuestiones.

Volviendo al interior de los Estados Unidos, el plutonio continuaba ocasionando problemas, especialmente en la planta de la AEC y dedicada a la Rocky Flats, a unos trece kilómetros de Denver, Colorado. La planta de Rocky Flats, entonces administrada por Dow Chemical al servicio de la AEC, de fabricación de componentes fisibles de armas atómicas, tenía un historial lleno de fugas, vertidos, incendios y explosiones. En mayo de 1979 estableció su récord. con el incendio más costoso de la historia de los Estados Unidos (y posiblemente del mundo). El incendio en cuestión fue precisamente esto, un incendio. Y no una conflagración (del tipo de la cual ya había habido ejemplos, como el que asoló Chicago, cuyo coste total pudo haber sido mayor). De hecho, desde el

Patterson no menciona el escandaloso caso de Karen Silkwood, muerta en circunstancias sospechosas cuando conducía su coche para entregar a un periodista determinada información que comprometía seriamente a la empresa en la que trabajaba, Kerr McGee, por la insuficiencia de las medidas de seguridad en el manejo habitual del plutonio, que era el objeto fundamental de su actividad. En mayo de 1975, la empresa fue condenada a pagar dos millones de dólares a los familiares de Karen por estimarse que había resultado contaminada, ella y su apartamento, precisamente por irresponsabilidad de la empresa. No fue posible, sin embargo, demostrar que el accidente que le produjo la muerte no fuese tal, sino un atentado.

exterior fue imposible decir que había ocurrido un incendio. Pero así fue.

Ya que, como hemos descrito, el plutonio es tóxico en cantidades de microgramos, pirógeno y susceptible de criticidad, debe esperarse que sea manejado con un cuidado sin igual. No parece que este fuese el caso en Rocky Flats.

El trabajo con plutonio se lleva a cabo en “cajasguante”: cajas herméticas con ventanas que tienen unas portillas por las que se introducen unos sólidos guantes de goma. El plutonio permanece dentro de la línea de “cajasguante” mientras que los operarios de fuera introducen sus brazos dentro de los guantes para desarrollar operaciones como modelado, presionado, molienda, mecanización, limpieza o calibrado de los perfiles metálicos de plutonio necesarios para las bombas. Después de un cierto número de incendios menores, un incendio de una “cajasguante”, el 11 de septiembre de 1957, ocasionó daños por 818.000 dólares. Otros dos incendios, en 1965, costaron otros 40.000 dólares. Además, expusieron a los trabajadores a partículas en el aire de óxido de plutonio: el incendio del 15 de octubre de 1965 ocasionó que veinticinco trabajadores quedasen expuestos a diecisiete veces la exposición máxima permisible. Realmente, los incidentes de exposición y contaminación parecían ocurrir casi de forma rutinaria, llevando a una dura confrontación con el sindicato afectado. Los incidentes de Rocky Flats los describe con detalle Roger Rapoport; después de una serie de incendios e incidentes con contaminación, se alcanzó el clímax el día 11 de mayo de 1969.

Se habían almacenado inadecuadamente unas sobras de plutonio en unas vasijas sin tapadera, bajo una cajasguante, en el edificio 776-777 de Rocky Flats. Aquella mañana, un domingo, sucedió lo que el plutonio tenía por fea costumbre hacer: entró espontáneamente en ignición y extendió el fuego a la propia cajasguante. La palabra “cajasguante” da una errónea impresión sobre su tamaño, porque no era una simple caja, sino una gran cámara, construida para casi setecientas toneladas de material combustible, incluyendo el blindaje para las radiaciones. Los detectores de calor, colocados para dar la alarma en esa eventualidad se habían instalado con ridícula falta de previsión fuera y debajo de la cajasguante, de tal manera que quedaban aislados del calor hasta que el incendio se desarrollaba fuera de control. Cuando los detectores dieron finalmente la alarma, a las 2,27 de la tarde, el humo era tan denso que, a su llegada, los bomberos apenas pudieron encontrar el camino hacia el fuego. El humo, por supuesto, incluía una concentración impresionante de óxido de plutonio; entre los materiales consumidos en el incendio había plutonio por valor de unos 20 millones de dólares. Es el resultado de multiplicar 10.000 dólares por kilogramo, por unos 2.000 kilogramos, es decir dos toneladas de un material del que ya un microgramo puede resultar tóxico. Ni que decir tiene que los bomberos llevaban aparatos para la respiración. Afortunadamente, el incendio no se extendió a través del techo de los edificios. Si así hubiera sucedido, las consecuencias para el área circundante, incluyendo la ciudad de Denver, habrían constituido un “problema de contaminación por plutonio de una extensa área”, al lado del cual los episodios de Palomares y Thule hubieran resultado una broma. El inmediato problema que se presentó a los bomberos fue la posibilidad de criticidad, si usaban agua para el fuego. Debido a su eficacia como moderador el agua está terminantemente contraindicada para estas ocasiones. Pero, los bomberos utilizaron dióxido de carbono antes de que pasaran diez minutos, y no tuvieron que recurrir al agua. Fueron necesarias cuatro horas para controlar el fuego y algunos incendios espontáneos a lo largo de la noche. Cuando, algunos días más tarde, los investigadores pudieron estudiar los escombros, dotados de aparatos para respirar, valoraron los daños en 45 millones de dólares, de los que más de 20 millones correspondían al plutonio. El 20 de mayo, una delegación de la AEC pidió y obtuvo del gobierno los fondos para reparar los daños e incrementar notablemente el programa.

-

Las consecuencias del incendio de Rocky Flats movieron a los científicos del Comité de Colorado para la Información Medioambiental, dirigido por el doctor Edward Martell, a investigar exactamente cuanto plutonio se había escapado de Rocky Flats. Lo que encontraron resultó preocupante sobremanera. Estaba claro que el plutonio había alcanzado efectivamente algunos barrios de Denver, también estaba claro que parte del plutonio de los suelos próximos a la planta habían estado allí desde antes de mayo de 1969.

En febrero de 1970, los científicos, bajo la iniciativa del Comité de Colorado para la Información Medioambiental, publicaron su informe; la AEC, mientras apoyaba sus propios estudios para contrarrestar la evidencia de fuera, se reunió con los científicos del Comité y de acuerdo con Peter Metzger, que estuvo presente amenazó con crear problemas para los científicos que fuesen empleados federales. No obstante, después de una reunión en abril muy vivamente narrada por Roger Rapoport entre los miembros titulares del JCAE, la dirección de la AEC y los representantes sindicales, resultó el 21 de julio que los desechos contaminados con plutonio habían sido enterrados; tanto dentro como fuera de la planta de Rocky Flats (unos 1.405 barriles de desechos que habían sido desenterrados y trasladados desde el 14 de abril). Sólo quedaba una pequeña dificultad: cómo recoger la tierra contaminada sin dejar que sus componentes radiactivos fueran levantados por el viento y llevados hacia Denver.

A principios de 1972, la AEC reveló otro descubrimiento algo desconcertante. En la reserva de Hanford, en el estado de Washington, había sido durante mucho tiempo práctica usual el manejar los desechos líquidos ligeramente contaminados de radiactividad descargándolos en zanjas. Las zanjas tenían paredes de hormigón, pero no tenían suelo. Los desechos líquidos decantados en la zanja se filtraban al suelo, transportando consigo el barniz con radioisótopos, hacia lo que se había considerado como una superficie de enterramiento permanente. Las partículas del suelo absorberían los núcleos radiactivos y los retendrían indefinidamente, hasta que su actividad decayera hasta la insignificancia. Entre los radioisótopos filtrados al suelo había, después de un período de varios años, 300 kilogramos de plutonio, de éste, unos 100 kilogramos se habían filtrado en la zanja Z9. Se esperaba que el plutonio, como todos los otros contaminantes, se dispersaría a través del suelo, de forma insoluble. Permanecería muy por encima del manto de agua, en una forma lo suficientemente diluida como para no causar problemas, pese a sus 24.400 años de período de semidesintegración.

Desgraciadamente, el procedimiento no tenía en cuenta un factor. El suelo bajo la zanja Z9 absorbió el plutonio, efectivamente, como estaba previsto; pero lo hizo sólo relativamente. Como la técnica habitual de separación química de la cromatografía de columna, separó los radioisótopos en estratos de diferentes especies a diferentes profundidades. Un estrato no muy lejos de la superficie resultó espantosamente rico en plutonio: tan rico que, después de una intensa lluvia que se filtrase hacia la tierra, con su efecto moderador, podía desencadenar una reacción nuclear en cadena. La energía liberada resultante podía arrojar un “volcán de barro”, dispersando el plutonio en la atmósfera de Hanford. Algunos investigadores de la Academia Nacional de Ciencias señalaron que esos cambios en la química de las aguas subterráneas podían movilizar parte del plutonio enterrado, creando incluso concentraciones más intensas y una amenaza más seria todavía de reacción en cadena. Como consecuencia, en la primavera de 1972, la AEC pidió al Congreso y lo consiguió 1,9 millones de dólares para cavar la zanja Z9: la primera mina del plutonio del mundo completamente auto servida. Mientras tanto, ya que todavía no estaban disponibles almacenamientos más sofisticados, la AEC continuó derramando disoluciones de desechos de plutonio en la cercana zanja Z18.

El riesgo de la fisibilidad

Las instalaciones militares, desde luego, producen plutonio para las bombas; las instalaciones nucleares civiles también producen plutonio en gran cantidad sin, hasta el momento, ninguna aplicación. Algunos gobiernos han creado un sistema por el que “recompran” todo el plutonio creado en los reactores comerciales, financiando al propietario del reactor con su valor contra los costes por otros servicios del ciclo del combustible, como el enriquecimiento. El gobierno norteamericano empleó el servicio de “recompra” hasta 1970. Desde aquellas fechas, las empresas eléctricas que tienen en funcionamiento reactores nucleares en los Estados Unidos han ido acumulando el plutonio en instalaciones de almacenamiento o “depositarias”, esperando la autorización para incorporar este plutonio como combustible nuevo, en lugar del uranio-235. Hasta entonces, ellos no pueden legítimamente financiar sus cuentas con el valor del plutonio, que es del orden de 10.000 dólares por kilogramo. Ya que un reactor de 1.000 MWe produce bastante más de 100 kilogramos de plutonio al año, el valor del plutonio es algo superior al millón de dólares por reactor y por año. En agosto de 1974, la AEC publicó, por fin, su *Generic Environmental Statement on Mixed Oxide Fuel* (Normativa Genérica Ambiental sobre Combustible de Oxido Mixto), que concluía en que el plutonio podía usarse en el combustible de los reactores de agua ligera sin ninguna preocupación particular. Pero el tráfico comercial del plutonio asociado con el “reciclado del plutonio” parece capaz de exacerbar el ya difícil de tratar problema de restringir el acceso al material fisible.

Tales restricciones, que trataban de vigilar las posibilidades mundiales de regeneración para armamento nuclear, fueron consideradas como la responsabilidad principal de la IAEA, desde su concepción en 1956. Pero su éxito fue, y continúa siendo, limitado. En marzo de 1962 se estableció el sistema de salvaguardias de la Agencia. Una dificultad incidental fue que sólo podían ejercerse cuando lo permitiera un gobierno nacional (y muy pocos gobiernos se mostraban inclinados a aceptarlo). Es muy difícil sentir la más mínima confianza sobre la eficacia esencial de las reglamentaciones actuales de salvaguardia; y hay que decir, honradamente, que esta desconfianza es compartida por muchos miembros del personal de seguridad de la Agencia.

Durante el primer acuerdo de moratoria sobre pruebas de armas atómicas se creó la *Eighteen Nation Disarmament Conference* (Conferencia de Desarme de las 18 Naciones) por una resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas, el 20 de diciembre de 1961. Se hizo muy poco progreso en la Conferencia sobre el desarme de aquellos países ya en posesión de armamento atómico y sistemas de producción. Pero hubiera sido preferible si, como mínimo, los países sin armamento nuclear se hubieran comprometido a no adquirirlo. Hacia 1965 los poseedores de armamento elaboraron propuestas para evitar la “proliferación” de armas atómicas. Se presentaron borradores de tratados norteamericanos y soviéticos sobre la “no proliferación” a la Conferencia sobre Desarme por aquel momento precisamente llamada “Conferencia de Ginebra” y que ya mostraba todos los signos de resultar una institución permanente y a la Asamblea General de las Naciones Unidas. Las reacciones de entre los no poseedores cubrieron todo el espectro, desde el apoyo de todo corazón al rechazo despectivo.

En la década precedente, cierto número de países se habían encontrado frente a la decisión: tener o no tener. El debate interno fue apasionado en casi todos los casos. Suecia, cuyo primer reactor de potencia en Agesta había alcanzado criticidad en julio de 1963, pensó seriamente, en construir armas nucleares tácticas con el plutonio acumulado. Los jefes militares y los políticos conservadores eran partidarios vigorosos en esta política; pero el gobierno socialdemócrata, después de varios años de discusión, se decidió finalmente en contra. Israel decidió en 1957, después de la

debacle de Suez junto a Gran Bretaña y Francia, asegurarse el acceso al armamento nuclear. Con la ayuda francesa y ayudado por el flujo continuo de inmigrantes altamente cualificados Israel construyó un reactor de investigación de 26 MWt en Dimona en el desierto del Negev. La instalación siempre fue considerada como de investigación, pero sus operaciones fueron mantenidas bajo un velo del secreto militar; y su producción anual de plutonio, de cinco o siete kilogramos podía ser suficiente para una bomba al año. En Israel, el debate interno sobre el armamento, nuclear fue particularmente áspero; el aparentemente perpetuo peligro del país entre sus vecinos árabes hacía que el tema resultara muy poco técnico. La pregunta fue completamente sincera: ¿garantizaría más o menos fácilmente el futuro, de Israel la adquisición de armas nucleares? No se dio a esto ningún tipo de respuesta convincente. Pero Israel no estaba en condiciones de olvidar la opción nuclear a cambio de promesas. Las promesas podrían romperse.

Desde los años 1950 en adelante, India desarrolló una tecnología nuclear avanzada, muy notable si la comparamos con cualquier otra. El primer reactor indio de investigación, en Trombay, alcanzó criticidad en 1956; dejando aparte las naciones con armamento nuclear, sólo Canadá, Noruega y Bélgica se le habían adelantado. En 1960, el reactor "Cirus" de 40 MWt, proyecto conjunto de Canadá e India, alcanzó criticidad. Canadá colaboró estrechamente con India en materia nuclear, a lo largo de los años 50 y 60, pese al requisito, del agua pesada que necesitaba el reactor "Cirus", y también la primera central nuclear india en Tarapur fue suministrada por los Estados Unidos. La India adquirió también una planta de recuperación de plutonio. Durante un cierto tiempo, India realzó su interés por utilizar las bombas atómicas en objetivos de ingeniería civil. Como país "no alineado", India se esforzó en mantener su distanciamiento diplomático con respecto a los dos campos dotados de armamento nuclear. Cuando China, uno de los más persistentes enemigos de India hizo acto de presencia con su bomba, India estableció claramente su reserva ante la opción nuclear, pese a las piadosas denuncias indias de las pruebas nucleares y las intimidaciones por parte de las naciones con armamento nuclear original.

El 17 de junio de 1967 China detonó su primera bomba termonuclear, de una potencia de 3 megatonnes, en su polígono de pruebas de Lop Nor, en el Sinkiang. China había necesitado solamente dos años y medio para pasar de su primera explosión de fisión a su primera bomba de hidrógeno; el 17 de junio de 1967, la prueba consistió en una verdadera bomba, lanzada desde un avión.

El 2 de junio de 1968, la Asamblea General de las Naciones Unidas alabó el borrador de Tratado de No Proliferación, hecho conjuntamente por norteamericanos y soviéticos. La "alabanza" era, por supuesto, solamente un reconocimiento de que existía tal documento, éste necesitaba la firma y la ratificación de los gobiernos nacionales interesados, antes de que cualquiera de sus previsiones pudiera considerarse con algo más que una importancia filosófica. El Artículo I del Tratado prohibía la transferencia de armas nucleares (o cualquier otro dispositivo nuclear que pudiera comportarse como un arma) a cualquier estado y bajo cualquier circunstancia. El Artículo II prohibía a los países firmantes la fabricación o adquisición de armas nucleares, pero no los preparativos, hasta el punto en que solamente se necesite añadir un explosivo. El Artículo III obliga a los no poseedores de armas a aceptar las salvaguardias de la IAEA en todas sus actividades nucleares para asegurar que no "desvían" encubiertamente material fisible para fabricar explosivos nucleares; ningún miembro firmante podía suministrar material fisible a un país no miembro, salvo si éste aceptaba las salvaguardias de la IAEA. El Artículo IV señala que todos los miembros del Tratado pueden, sin embargo, hacer cualquier cosa que deseen con la energía nuclear para fines pacíficos, y pueden ayudar a cualquier país con esta finalidad. El Artículo V dice que los poseedores de armas deben acordar el suministro de explosivos nucleares para objetivos civiles, bajo control internacional y el pago adecuado, a los no poseedores que lo deseen. El Artículo VI exhorta a los miembros a que

mantengan la intención de prescindir de las armas nucleares, para conseguir “medios eficaces de desarme nuclear”. El Artículo VII dice que los miembros pueden acordar zonas “desnuclearizadas”. El Artículo VIII prevé la celebración de una conferencia, para revisar el Tratado, cinco años después de su entrada en vigor, la primera Conferencia de revisión se celebró en Ginebra, en mayo de 1975. El Artículo IX permite a otras naciones ser parte del Tratado una vez que entre en vigor. El Artículo X permite a un miembro retirarse de las obligaciones del Tratado, tres meses después de anunciarlo, si estima que acontecimientos extraordinarios referidos a temas contemplados en el Tratado, han comprometido sus intereses supremos; es decir, que en un lenguaje menos remilgado, cualquier país puede retirarse, si así lo desea, en el plazo de tres meses.

Tomando juntos los Artículos X y II, y haciendo observar que la consecución final de una bomba atómica necesita mucho menos tiempo de tres meses, si se tiene el material listo y se lleva prisa, las estructuras del Tratado no pueden considerarse onerosas. Hasta este momento, solamente la mitad de las naciones de la tierra lo han ratificado. Entre los no firmantes se incluyen, además de Francia y China, Argentina, Brasil, Chile, Cuba, India, Israel, Corea del Norte, Pakistán, Portugal, Arabia Saudí, Sudáfrica, España, Tanzania, Vietnam y Zambia. Otros países lo han firmado, pero no lo han ratificado: entre ellos están Australia, Egipto, Indonesia, Japón, Corea del Sur, Suiza, Austria y Venezuela. Entre las naciones que han firmado y ratificado el Tratado negándose a sí mismas la posesión de armas nucleares se incluyen Chad, Haití, Lesotho, Madagascar, Malta, Nepal, San Marino, Suazilandia y Togo²⁵.

El 18 de mayo de 1974, en el desierto de Rajasthan, al oeste del país, India hizo detonar una explosión nuclear subterránea de 15 kilotones. India, de esta forma, se convirtió en el sexto país en poseer tecnología nuclear militar, pese a que los portavoces indios insistieron obstinadamente en que su explosión tenía lugar solamente para “fines pacíficos”. Fuese como fuese, la explosión india subrayó con dramática brusquedad la cuestión que había empezado a preocupar a muchos observadores nucleares. En el naciente entusiasmo universal por la energía nuclear, pareció posible, por algunos años, establecer un cierto grado de distinción entre los sistemas nucleares civiles y sus implicaciones militares. Después del 18 de mayo de 1974 tal distinción resultó muy difícil de discernir.

Durante los años 40 y 50 se había mantenido un halo de imponente misterio sobre las armas nucleares, sobre la tecnología, sobre su impacto en la política y sobre las impensables consecuencias de que tales armas se usasen. Pero, de alguna manera, al final de los 60 se dieron por supuestos los rampantes arsenales atómicos, dejando de ser tema de interés para la opinión pública. Millones de personas habían estado o estaban empleadas en la construcción y vigilancia de las bombas nucleares y termonucleares y muchos miles compartían los conocimientos detallados que sólo una década antes habían constituido los secretos más celosamente guardados. Lo que había sido un empleo especial, se había convertido en un trabajo como cualquier otro. En la medida en que el inventario global de los materiales fisibles se incrementó, la calidad de su supervisión descendió.

La *Nuclear Materials and Equipment Corporation* (Corporación de Materiales y Equipos Nucleares), informó a la AEC, en 1965, que a lo largo de los seis años de actividad en su planta de fabricación de combustible en Apollo, Pennsylvania, había perdido de algún modo más de 60 kilogramos de uranio altamente enriquecido, que era material suficiente para construir varias

25

La situación actual de estos países en el Tratado de No Proliferación Nuclear es diferente.

bombas de fisión. Este material no contabilizado *Material Unaccounted For*, MUF en la jerga industrial podía haber sido simplemente la cantidad acumulada de porciones no recuperadas de los recortes. No podía haber sido de otra manera. Inmediatamente, la AEC creó una nueva *Office of Safeguards and Materials Management*, (Oficina de Salvaguardia y Gestión de Materiales) encargada de endurecer los controles sobre los materiales fisibles.

Cuando tuvo lugar la primera bomba china de fisión, en 1964, y se demostró que no estaba construida con plutonio sino con uranio enriquecido, los atónitos observadores occidentales pensaron, inicialmente, que podía haber sido sustraído “quizás de la planta de Apollo”. Las fotografías desde satélite sobre la planta china de difusión gaseosa hicieron innecesaria, como consecuencia, la tesis del robo chino de uranio-235. Pero el uranio se seguía perdiendo, pese a que una parte se encontró después en los recortes; otra parte no ha sido nunca recuperada. Si no podía pensarse en que un gobierno nacional pudiera robar material fisible, ¿qué otra siniestra posibilidad podía existir? El 27 de octubre de 1970, la policía de Orlando, Florida, recibió un mensaje anónimo informándole que el remitente disponía de una bomba de hidrógeno y advirtiéndole que estallaría si no se pagaba un millón de dólares. Al día siguiente otro mensaje incluía un diagrama a mano alzada de la bomba, y los funcionarios espantados informaron que parecía totalmente genuino. No parecía que se hubiera producido ningún robo del material nuclear necesario, pero era muy difícil, también, tener la seguridad de que no hubiera ocurrido. Pero entonces, para alivio de las entidades locales, una operación policial localizó al autor de la carta: resultó ser un chico de catorce años, cuya “bomba” era una broma. Pero pudo no haberlo sido.

En el verano de 1971, la Universidad del Estado de Kansas, se convirtió en sede de una conferencia extremadamente seria, cuyo tema era “Prevención de Robos Nucleares”; era evidente que no iba a ser fácil conseguirlo. En septiembre de 1972, la conferencia internacional anual Pugwash, de científicos destacados de muchos países, reunida en Oxford, Gran Bretaña, elaboró un comunicado que incluía esta sabia advertencia:

“La enorme difusión, por todo el mundo, de material nuclear fisible (principalmente plutonio) y de las informaciones nucleares, que va a tener lugar en los próximos diez o veinte años para satisfacer las necesidades energéticas del mundo, constituye un problema de proporciones desconcertantes. Está claro que su control necesitará de un alto grado de colaboración internacional, si se quiere evitar desastres de enormes proporciones. Es difícil de imaginar que esta colaboración sea posible salvo si la detente y el desarme hacen progresos sustanciales en un futuro inmediato. Hay un peligro, ya presente en algún grado, que los materiales fisibles almacenados o en movimiento puedan caer en manos de grupos irresponsables, criminales o fanáticos. La necesidad de asegurar la protección física de los materiales fisibles, tanto por medidas propias como por la colaboración internacional. debe de resaltarse decididamente.”

Aquello de los “grupos irresponsables, criminales o fanáticos”, en general, resultó sobradamente evidente; rápidamente, resultó también evidente que no habían pasado por alto la posibilidad de la malevolencia nuclear. En Argentina, una banda de guerrilleros urbanos se apoderó de la recién construida central nuclear de Atucha, con un reactor de agua a presión de 340 MWe, no lejos de Buenos Aires. El reactor no había alcanzado criticidad todavía; los guerrilleros ocuparon la central durante veinticuatro horas, y la abandonaron después, no habiendo producido más daños que los de unas pintadas de spray por todo el interior de la central. El 12 de noviembre de 1972, tres delincuentes secuestraron un DC9 en un vuelo interior sobre la costa este de los Estados Unidos. Durante la tensa prueba de dos días a que estuvo sometida la tripulación y los pasajeros, que llegaron a desplazarse a Toronto y La Habana, el avión planeó durante dos horas sobre las instalaciones de la AEC en Oak Ridge, en Tennessee, mientras que los secuestradores pedían 10

millones de dólares y amenazaban con estrellarlo contra la instalación del reactor. Los responsables de Oak Ridge no consideraron que la amenaza fuese vana; pararon todos los reactores de la planta y evacuaron la mayor parte de los empleados. El avión tuvo que aterrizar en Lexington, en Kentucky, para repostar: cuando despegó, las amenazas renovadas de los secuestradores le obligaron a volver a las proximidades de Oak Ridge. Consiguieron los 10 millones de dólares, además de chalecos antibalas y píldoras estimulantes, después de una negociación en el aeropuerto de Chattanooga, en Tennessee; entonces el DC9 voló una segunda vez a La Habana y le fue permitido aterrizar por las autoridades cubanas, a las que se entregaron los secuestradores. Los responsables de Oak Ridge dijeron que la caída de un avión sobre los reactores habría producido, como mucho, el escape de una pequeña cantidad de radiactividad sobre la zona inmediata. Pero el episodio estuvo muy lejos de inspirar tranquilidad.

Sólo un mes después, el 14 de diciembre de 1972, 1.500 trabajadores del centro de investigación de Dounreay, en la costa del norte de Escocia, hubieron de ser enviados a casa tras una llamada de teléfono anónima advirtiéndoles que se habían colocado bombas en su interior. El personal de seguridad encontró dos paquetes sospechosos, uno en el taller principal y otro en la entrada del reactor rápido. Los paquetes fueron destruidos por un piquete que utilizó una bomba del ejército, y demostraron ser inofensivos. Pero, una vez más, podían no haberlo sido. La reciente historia de colocación de bombas en Gran Bretaña no necesita ser recordada.

En definitiva, está sobradamente presente el impulso hacia la delincuencia nuclear a cualquier escala. ¿qué decir sobre sus oportunidades? El material como el plutonio y el uranio altamente enriquecido, de los que están hechas las bombas, se llama “material nuclear especial”, “material fisible especial”, “material estratégico”, o simplemente “SNM” (*Special Nuclear Material*). En la reunión de abril de 1969, del Instituto de Gestión de Materiales Nucleares se pudo escuchar a Sam Edlow, un consultor en temas de transporte de materiales nucleares, relatando una serie de experiencias recientes, algunas de ellas personales. Se estaba perdiendo material estratégico en cantidades suficientes para docenas de bombas, de acuerdo con Edlow, diariamente, perdido y descuidado por las compañías aéreas, empresas de transporte y terminales de carga. Un envío de este tipo, consistente en treinta y tres kilogramos de uranio enriquecido al 90 por 100, que viajaba de Nueva York a Frankfurt, fue erróneamente desembarcado en el aeropuerto de Londres y abandonado hasta que sus fletadores preguntaron a la compañía aérea por él. Un vuelo interior norteamericano desde Ohio llegó a San Luis con uno de los tres contenedores de material estratégico con un peso de 385 kilogramos perdido. Hasta nueve días después, el contenedor extraviado no pudo finalmente volver; se encontró en Boston, entre una carga de zapatos.

Hacia 1972, un número sustancial de personas pertenecientes a la comunidad nuclear empezó a preocuparse abiertamente de la actitud descuidada para con el material estratégico. Uno de los más sinceros era un físico nuclear llamado Ted Taylor, que durante los años 50 fue la estrella de los proyectiles de bombas de fisión de la AEC en los Álamos. Taylor había sido ponente en el simposio de la Universidad de Kansas, como lo era Mason Willrich, un abogado que había sido en una ocasión miembro de la *US Arms Control and Disarmament Agency* (Agencia de Control de Armas y Desarme). En 1972, Taylor y Willrich fueron encargados por el Proyecto de Política Energética, de la Fundación Ford, para preparar un estudio sobre el robo nuclear. Su estudio les ocupó más de un año durante el cual Taylor visitó muchas de las instalaciones de los Estados Unidos, tanto oficiales como privadas, que tenían responsabilidades en el manejo, transporte y almacenamiento de material nuclear especial. Con él estuvo buena parte del tiempo un escritor llamado John McPhee, que relató sus coloquios en un libro notable, llamado *The Curve of Binding Energy*, publicado en primera instancia como una serie de tres capítulos en el semanario *New Yorker* en diciembre de 1973. El libro pudo haberse calificado de “alarmista” si no hubiera habido, en el mismo momento, dos informes

oficiales mostrando conclusiones que estaban, de hecho, ampliamente de acuerdo con la obra de McPhee. El 7 de noviembre de 1973, la Oficina de Contabilidad General, publicó un Informe al Congreso sobre “Medidas Necesarias en el Programa para la Protección de Material Nuclear Especial”, que fue un título en clave para un documento espeluznante. La investigación se centró en tres de noventa y cinco organizaciones autorizadas para poseer material estratégico en cantidades suficientes como para necesitar ajustarse a los requisitos de la AEC sobre protección. Dos de los tres ejemplos se revelaron incapaces de cumplir con estos requisitos. Las instalaciones tenían barreras de seguridad físicamente débiles, patrullas inefectivas de vigilantes, sistemas ineficaces de alarma, aparatos inadecuados de detección automática y ningún plan de acción para responder a un robo de material nuclear. Los investigadores encontraron que podían introducirse en las instalaciones sin ser detectados, saltar las verjas, separar las vallas, cortar las cubiertas de almacenamiento, protegidas con acero, con pequeñas tijeras en pocos minutos, alcanzar las ventanas de acceso sin ser observados; y sin obstáculos, y, en general, apoderarse de cuanto desearan.

¿Qué podían hacer con el material estratégico una vez en su poder? Hasta muy recientemente, se consideraba como dogma que ni los conocimientos necesarios ni la tecnología estaban disponibles más que para un intento altamente organizado (como mínimo, un gobierno y, únicamente, a cambio de un gran esfuerzo nacional).

Se admitía, además, que el plutonio habría tenido que obtenerse expresamente para uso militar, ya que solamente el “plutonio de grado militar” podría producir una explosión. La razón que se daba era que los diferentes isótopos del plutonio se comportan de forma diferente en una bomba. El plutonio-239 tiene una sección eficaz muy reducida para la fisión espontánea, y otra alta para la fisión inducida por neutrones. Pero si se coloca el plutonio-239 en un reactor, algunos núcleos pueden absorber neutrones sin dar lugar a fisión, convirtiéndose en plutonio-240 y, después, en plutonio-241 y 242. El plutonio-240 tiene una sección eficaz suficiente para la fisión espontánea. Como consecuencia, una muestra de plutonio que contenga una fracción manejable de plutonio-240 siempre soporta un significativo fuego cruzado de neutrones de la fisión espontánea del 240. El saber convencional sostiene que estos neutrones podrían dar lugar a una bomba hecha de ese material perdido prematuramente, reventando él mismo antes de que pudiera tener lugar una amplia reacción en cadena, ya que los isótopos más pesados del plutonio resultan imposibles de separar del plutonio-239, sea cual sea la intención y los objetivos, se pensó que el plutonio procedente de los reactores comerciales de potencia, resultaría de escasas posibilidades para los posibles fabricantes de bombas.

Esta tesis reconfortante comenzó a desmoronarse al principio de los 70. Los expertos nucleares norteamericanos y europeos, llegaron a la conclusión de que podía ser difícil de predecir las características y la envergadura de la explosión de una bomba hecha con plutonio procedente de un reactor de potencia, pero que muy probablemente estallaría, con un resultado totalmente convincente.

Willrich y Taylor apenas dejaron dudas sobre la magnitud del problema consiguiente. Su libro, *Nuclear Theft: Risks and Safeguards*, se publicó en abril de 1974; era un estudio capital, un trabajo modélico urgente sobre un tema de sangrante actualidad. Resumía con detalles espontáneamente explícitos, toda la información disponible desde hacía tiempo en la literatura en uso, analizaba los tipos de materiales para bombas potenciales que el programa nuclear civil generaría, estimaba las cantidades, identificaba las categorías posibles de ladrones nucleares, sus motivos y sus formas de actuación naciones, grupos políticos, grupos criminales, terroristas, fanáticos: un “quien es quien” de malhechores nucleares e intentaba definir un programa coherente y realizable para repeler cualquier intento de “distracción” (el elegante eufemismo industrial que el poco disimulado título

de WillrichTaylor desdeñaba). Sólo la parte que trataba de la prevención no convencía totalmente.

Durante el fin de semana del 26 al 30 de abril de 1974, el senador Abraham Ribicoff reveló a la prensa y al Congreso que la AEC había elaborado su propio estudio de la dispersión potencial de materiales nucleares. La AEC estaba, al parecer, deliberando sobre el informe cuando cayó en las manos de Ribicoff, momento en el que la dirección de la AEC distribuyó apresuradamente copias a la prensa, como si se empeñara en minimizar el impacto de la advertencia de Ribicoff. Pero el estudio, conocido como el “Informe Rosenbaum” (del doctor David Rosenbaum, uno de sus cinco autores), apoyaba con un lenguaje igualmente sin ambigüedades los datos y las interpretaciones presentadas por Willrich y Taylor. Dejaba claro que la seguridad de los materiales nucleares había caído muy por debajo de las normas exigidas, y, desde luego, había quedado muy desfasada frente a la creciente producción y circulación de estos materiales.

Por entonces, la AEC avanzaba hacia condiciones de gestión de materiales nucleares mucho más intransigentes. En una revisión de los requisitos del Código de Normas Federales, 10 CFR, la AEC pedía guardias armados para el transporte de material estratégico y poco después indicó que las instalaciones debían contratar guardias armados para las centrales nucleares. Ninguna de estas indicaciones resultaban deseables en modo alguno para las empresas que tenían que dedicar bastante tiempo a persuadir al público de que la energía nuclear era una bendición sin tener que aplicar la presencia de hombres armados alrededor de las instalaciones. En cualquier caso, como un portavoz de empresa hizo observar, una central nuclear no es un lugar particularmente adecuado para un tiroteo. Sin embargo, en enero de 1974 el coronel retirado de “boinas verdes”, Aaron Bank expresó en una audiencia en San Diego, que él podía “sabotear fácilmente” la central nuclear de San Onofre, de 430 MWe y con un reactor de agua a presión, en la costa de California, no lejos de Los Angeles. El testimonio del coronel Bank no se ha hecho nunca público. Pero Joseph Schleimer, un reportero que entrevistó al coronel Bank, publicó más tarde en el *Bulletin*, de octubre de 1974, una escueta descripción de sus posibilidades de acción.

En Alemania Federal, el semanario informativo *Der Spiegel* comunicó que su personal había conseguido introducirse en el interior de un depósito de almacenamiento de plutonio en Wolfgang, cerca de Hanau. La compañía que administraba el depósito y el gobierno del estado de Hesse declararon que los periodistas no habían alcanzado la zona en la que estaban guardados 300 kilogramos de plutonio, pero el episodio hizo aumentar la inquietud pública en Alemania Federal. En Gran Bretaña se reveló que el combustible procedente del PWR de Dounreay se reprocesaría fuera y que el plutonio recuperado se devolvería, después, por carretera, a la planta de plutonio de Windscale, a una distancia de casi 600 kilómetros; habría un envío por mes, aproximadamente, conteniendo unos 100 kilogramos de plutonio. Los responsables oficiales declinaron el concretar qué precauciones de seguridad se tomarían, pero se mostraban confiados en que serían adecuadas. Como sucede generalmente en Gran Bretaña, la información sobre el transporte o la seguridad de las plantas no es de dominio público; tampoco lo son los criterios aplicados ni la menor indicación sobre si se ponen en práctica efectivamente²⁶.

Cuando se iba incrementando la preocupación sobre la seguridad interior de los materiales fisibles y las instalaciones nucleares llegó el 18 de mayo de 1974, y con él, la explosión nuclear india. De pronto, la comunidad nuclear recibió un aguijónazo, reparando en que no sólo los terroristas y los

26

Son frecuentes las informaciones acerca de “desapariciones” de cantidades significativas de plutonio en plantas de reprocesamiento o en reactores regeneradores.

criminales podían “distraer” materiales nucleares para bombas: los gobiernos nacionales, motivadores del armamento nuclear, resultaban un factor todavía más importante dentro del problema de los materiales estratégicos. India fue el primer país del Tercer Mundo en demostrar capacidad nuclear militar; pero India no era, ni mucho menos, el único candidato posible, del Tercer Mundo o de fuera. Irónicamente, la bomba india estalló precisamente cuando el prestigioso Instituto Internacional de Estocolmo para la Investigación sobre la Paz estaba a punto de publicar un estudio titulado “Problemas de la Proliferación Nuclear”. El anuario del Instituto “Armamentos y Desarme Mundiales”, en su edición de 1972 había identificado quince países que no habían firmado o habían firmado pero no ratificado el Tratado de No Proliferación, y cuyas capacidades nucleares podían orientarse perfectamente hacia la producción militar. Entre estos países estaban Argentina, Brasil, India, Israel, Pakistán, Sudáfrica y España. Es curioso comprobar como estos siete países, que se niegan a firmar el TNR o poseen ya, o están a punto de poseerlas, armas nucleares (que no habían firmado) y Australia, Bélgica, Egipto, Italia, Japón, Holanda, Suiza y Alemania Federal (que no lo habían ratificado). La actitud india, aunque no inesperada, fue muy perturbadora.

Por su parte, la India no había ocultado nunca su disgusto por el Tratado de No Proliferación. Para India, el Tratado significaba un atentado, de la parte de las potencias nucleares militares, especialmente los Estados Unidos y la Unión Soviética, para consolidar el status quo y preservar su posición internacional de predominio, mientras que no restringían, de ninguna forma, el continuo incremento de sus propios arsenales nucleares ni se obligaban a ningún esfuerzo significativo en pro del desarme. Desde el punto de vista indio, la amenaza de la proliferación nuclear, al nivel de gobiernos nacionales, resultaba mínima en comparación con la planteada por las actividades nucleares de las principales potencias militares. Los portavoces indios señalaron la cantidad y versatilidad de los materiales nucleares militares de los Estados Unidos; el comportamiento preocupante del personal militar norteamericano en Vietnam; la frecuencia y la variedad de los logros criminales o fanáticos en los Estados Unidos; y las concesiones internacionales entre los terroristas que podían llegar hasta la utilización de material estratégico norteamericano robado en cualquier otra parte del mundo. Desgraciadamente, pese a la validez de tales argumentos, estos mismos enfatizaban y no lo contrario el efecto desestabilizador del incremento de la actividad nuclear. El gobierno canadiense estaba especialmente conmovido por la explosión india. El reactor en el que la India había fabricado el plutonio para su bomba, era el “Cirus” de Trombay, un reactor de investigación, de agua pesada de 40 MWt, construido con la ayuda científica y los ingenieros canadienses durante el cargo e importante programa de cooperación desarrollado entre India y Canadá desde el principio de los años 50. El reactor “Cirus” no estaba sujeto a las salvaguardias de la AIEA. Esas salvaguardias no habían sido establecidas cuando alcanzó por primera vez criticidad, en julio de 1960. Pero los acuerdos bilaterales indiocanadienses permitían a Canadá entender que India no destinaría la ayuda recibida para desarrollar armas nucleares. Después de la explosión del 18 de mayo, los indios declararon, simplemente, que el ingenio no era un arma, sino un explosivo pacífico. La distinción semántica no impresionó a los indignados canadienses, que cortaron inmediatamente toda asistencia nuclear a India. Corriendo el tiempo, fueron llegando otras asistencias, de países menos escrupulosos o, en todo caso, con una política más flexible; de Francia, entre otros. India, por su parte, anunció casi inmediatamente un acuerdo bilateral para intercambiar información nuclear con Argentina, otro cliente de Canadá, ya que construía un reactor de potencia CANDU en Rio Tercero, y con opción para otro más.

El efecto de la bomba india en el programa canadiense de exportaciones nucleares fue traumático. Precisamente, cuando el modelo canadiense de reactor de uranio natural había encontrado un lugar en el mercado internacional, hasta entonces monopolizado por los modelos norteamericanos de agua ligera, se producía la evidencia inmejorable de que la venta de reactores canadienses a otros países podían situarlos en el camino de las armas nucleares. El gobierno canadiense permaneció

absorto en sus pensamientos durante meses, luchando con su responsabilidad, mientras los vendedores nucleares canadienses se lamentaban de las oportunidades perdidas. Incluso la exportación del uranio canadiense, hasta ese momento una parte sustancial del negocio nuclear en Canadá, quedó sujeta a una agitada discusión, en torno a sus aspectos potencialmente menos pacíficos.

Los intereses nucleares norteamericanos tomaron un giro santurrón que puso más furiosos todavía a los canadienses. Los portavoces norteamericanos se refirieron repetidamente a las salvaguardias “inadecuadas” del reactor “Cirus”, a diferencia de las salvaguardias escrupulosas impuestas a los reactores *norteamericanos de exportación* (como venían a decir). Dejando aparte los peligros de lanzar piedras en una cristalera, los responsables norteamericanos dejaron de lado un punto importante: las necesidades de agua pesada del reactor “Cirus” había sido suministrado por los Estados Unidos, cuya complicidad resultó, como consecuencia, inmediata, en cualquier nivel de condena que se pudiese aplicar. Mientras tanto, para exacerbar más todavía el tema, el presidente Nixon, huyendo de la ira que se le avecinaba, hizo su gira de despedida por el Oriente Medio y ofreció a diestro y siniestro su generosidad nuclear. El 14 de junio, reactores para Egipto, el 17 de junio, reactores para Israel. Sus ofrecimientos hicieron abrirse desmesuradamente los ojos en todos los sitios y, poco después, en los propios Estados Unidos, cuando los aspectos militares fueron más claramente analizados.

En Gran Bretaña, mientras resonaban aún las condenas de la prueba india y las ofertas de reactores norteamericanos, surgieron inmediatamente los rumores de que el gobierno estaba a punto de realizar una prueba nuclear propia. Después de un silencio displicente, el primer ministro Harold Wilson hizo una breve y según el formalismo nuclear británico poco clara declaración en la Cámara de los Comunes, el 24 de junio, declarando que Gran Bretaña, de hecho, ya la había realizado en la segunda semana de junio, en el Polígono de Pruebas de Nevada, en los Estados Unidos.

El *Bulletin*, órgano crítico independiente y preocupado durante casi tres décadas con las implicaciones globales de la política y la tecnología nucleares, siempre ha reproducido en primera página una reducida imagen reflejando el estado de los asuntos nucleares. Se trata del cuadrante superior izquierdo de un reloj. La aguja del reloj se acerca a la medianoche. Cuando lo dictan las circunstancias, la aguja del reloj del *Bulletin* se mueve. En el momento de la crisis cubana de los misiles, en 1962, el reloj del *Bulletin* avanzó hasta las doce menos tres minutos. Cuando las conversaciones sobre las Limitaciones de Areas Estratégicas (SALT) en 1972, el reloj se había atrasado hasta las doce menos diez minutos. El primer acuerdo SALT retrasó la aguja dos minutos más, hasta las doce menos doce. Después de la bomba india, las ofertas de reactores al Oriente Medio y la creciente preocupación sobre la seguridad nuclear a todos los niveles, el reloj del *Bulletin* detuvo su retraso. En septiembre de 1974 avanzó hasta las doce menos nueve. En diciembre de 1974 Israel anunció inequívocamente que podía fabricar armas nucleares a voluntad²⁷.

27

Muy pocos dudan que tanto Israel como Sudáfrica (y quizás en colaboración) han ensayado ya su primera bomba atómica; muy probablemente este acontecimiento tuvo lugar el 22 de septiembre de 1979.

10. El horizonte nuclear

Tome aliento. Ahora: el 31 de diciembre de 1974 había cincuenta y tres reactores nucleares en los Estados Unidos con licencia para funcionar, con una potencia de casi 39.000 MWe. En el Reino Unido había veintinueve reactores en operación, con una potencia de 5.600 MWe. En la Unión Soviética había dieciséis reactores en operación, con una potencia próxima a los 3.000 MWe. En Francia había diez reactores funcionando, con una potencia de unos 3.000 MWe. Había reactores funcionando también en Canadá, Checoslovaquia, Alemania Oriental, India, Italia, Japón, Holanda, Paquistán, España, Suecia, Suiza y Alemania Occidental. En total, había 149 reactores operativos, con una potencia global de 58.000 MWe, aproximadamente. Había reactores de potencia en construcción o bajo pedido también en Argentina, Austria, Bélgica, Brasil, Bulgaria, Finlandia, Hungría, Corea, México, Filipinas, Taiwán, Tailandia y Yugoslavia. También había proyectados reactores de potencia, aunque no pedidos en firme, en Irán, Israel, Portugal y Sudáfrica. La cantidad total de estos reactores en funcionamiento, en construcción, encargados o proyectados era de 401, con una potencia total de unos 255.000 MWe. Otros nueve países Bangladesh, Chile, Dinamarca, Egipto, Grecia, Jamaica, Rumanía, Singapur y Turquía habían anunciado planes para construir reactores de potencia hacia el año 2000. La mayoría de los países arriba indicados, y algunos otros, poseen ya reactores de investigación; algunos de estos reactores, por ejemplo los de Israel, Noruega, Polonia, Sudáfrica y Yugoslavia, son comparables en producción de calor y en producción de plutonio a pequeños reactores de potencia.

Muchos de los países mencionados tienen también, o piensan adquirir, algunos, si no todos, de los otros componentes del ciclo del combustible nuclear: minas y fábricas de concentrados de uranio, plantas de hexafluoruro, plantas de enriquecimiento, plantas de fabricación del combustible, plantas de reprocesado del combustible e instalaciones de tratamiento de residuos. Se sabe que seis países poseen tecnología nuclear militar, otros no están muy lejos.

El entusiasmo de los gobiernos y de la industria por la energía y el poder nucleares crece rápidamente. El aumento, desde 1970, en el precio de los crudos del petróleo ha sido interpretado como un aviso de que los suministros futuros de energía deben incluir una proporción creciente de energía nuclear. Las previsiones de la OIEA, la OECE, la Comunidad Económica Europea, la AEC norteamericana, la AEA británica, el CEA francés y muchas otras organizaciones y personalidades en el campo nuclear afirman que la energía nuclear suministrará el 50 por 100, o más, de las necesidades mundiales de electricidad hacia el año 2000. Las estimaciones sobre la capacidad de generación nuclear en todo el mundo, en el año 2000, han alcanzado ya el nivel mínimo de los 4.500.000 MWe, esto es, 4.500 reactores de una potencia igual a la de los más importantes que funcionan hoy día.

A partir de 1970 en adelante, la opción nuclear empezó a jugar un importante papel en la política energética general, especialmente entre las naciones industrializadas. El deseo de reducir la dependencia con respecto a los países exportadores de petróleo, especialmente los de Oriente Medio, se manifestó en la decisión por parte de Estados Unidos, Francia, Japón y otros países occidentales vulnerables, de incrementar su capacidad de generación eléctrica nuclear tan rápidamente como fuera posible. La ventaja de costo marginal de la electricidad procedente de las centrales nucleares quedó vigorosamente reforzada por el alza del precio del petróleo, acompañada de la renovada insistencia de los mineros del carbón en Gran Bretaña, Estados Unidos y otros lugares, por obtener fuertes aumentos salariales. Los intentos para estimular la producción de carbón fueron obstruidos por la prolongada debilidad económica de esta industria en Gran Bretaña y Francia, y por la áspera polémica sobre las normas de calidad atmosférica y los efectos de la minería a cielo abierto en los Estados Unidos. Comparado con todo esto, la energía nuclear parecía

una tecnología manejable, lista para ser desarrollada y cumplir los pronósticos de la futura demanda de energía con mínimos efectos, tanto sobre el medio ambiente como sobre la salud de los operarios. El problema de la posibilidad de una escasez inminente de uranio podría soslayarse considerando el próximo protagonismo de los reactores rápidos regeneradores, que multiplicarían por 50 la utilización del uranio y en un país como Gran Bretaña harían incluso innecesaria la importación de uranio en un futuro indefinido.

En ese entonces, como se anticipa, otras tecnologías de la energía nuclear estarían jugando su papel. Barcos de impulsión nuclear, incluyendo submarinos de mercancías, buquestanque y mercantes serían capaces de cruzar los océanos a voluntad, sin miedo a los costes del combustible. Se podrían construir centrales nucleares no precisamente en lugares remotos del litoral sino en emplazamientos semiurbanos, donde el calor sobrante de sus turbinas, normalmente desperdiciado, pudiera suministrar calefacción central a barrios enteros y zonas industriales, haciendo ocasionalmente más bajos todavía los costes de combustible y elevando los rendimientos a cotas nunca oídas. Mientras tanto, nuevos modelos de reactores y el desarrollo del reactor de alta temperatura tomarían el relevo de los suministros decrecientes de combustible fósil y aportarían calor de proceso para la industria; la siderurgia nuclear parecía ser lo más idóneo para la primera innovación en este campo. Como una demostración de las formas en que la energía nuclear podría ayudar a aliviar otros problemas de recursos, se esperaba que la desalinización del agua del mar, utilizando el calor de baja temperatura procedente de los reactores, se convirtiese en una contribución importante a los suministros de agua. Se esperaba que la desalinización fuese especialmente bienvenida en algunos países en desarrollo, cuyas necesidades crecientes de energía serían imposibles de satisfacer con las reservas fósiles residuales, quedando únicamente la vía nuclear para acceder al desarrollo.

Esta visión tiene un indudable atractivo. Pero elude contestar una serie de preguntas delicadas, para las cuales todavía no existen respuestas totalmente satisfactorias. Desde un punto de vista estrictamente económico el problema de ir aportando capacidad nuclear en la proporción deseada y en la magnitud pretendida está resultando formidable. A lo largo del siglo pasado la tendencia en el suministro de energía, desde la madera al carbón y de éste al petróleo y al gas, siempre se ha desarrollado en la dirección de tecnologías y recursos más asequibles. La opción nuclear es un abandono brusco de esa tendencia. Es dudoso que pueda ser introducida con la suficiente rapidez como para sustituir a las fuentes anteriores y, al mismo tiempo, sostener las tasas de crecimiento previstas. Los programas más importantes, como los de Estados Unidos y Francia, se están encontrando con escasez de dinero, de recursos materiales y de mano de obra adecuadamente preparada.

La energía nuclear no es solo fuertemente intensiva de capital, sino también intensiva en energía: as decir, se necesita mucha energía para construir y mantener centrales nucleares. Recientes trabajos en la nueva disciplina de la “contabilidad energética” o “análisis energético dinámico”, han suscitado algunos aspectos inquietantes acerca de las necesidades de energía de los programas de expansión intensa. Durante su vida de funcionamiento, una central nuclear, considerada aisladamente, debería producir sustancialmente más energía de la que consumió en su construcción y en las recargas de combustible. Pero, de acuerdo con los estudios de la *British Open University* (Universidad Británica Abierta) y otros, un programa de centrales nucleares de crecimiento exponencial exigiría una parte importante de la producción de las centrales ya en funcionamiento, simplemente para mantener la actividad en las que se encuentren en construcción. Y si el programa se expandiera con determinada rapidez como, por ejemplo, el de Francia, del que se dice que se duplicará cada dos años las centrales en funcionamiento podrían ser incapaces de suministrar la energía necesitada por las que todavía estuviesen en construcción. Durante este período de crecimiento, que podría suponer diez años o más, la economía del país en cuestión se encontrará

soportando una carga extra a cuenta de su potencial nuclear, en un momento en el que su situación energética es ya precaria; este parece ser el caso de Francia en el momento en que esto escribimos²⁸.

Sin duda que, cuando la fase de crecimiento termine, la potencia nuclear reciente será una adición importante al abastecimiento energético. Pero algunos analistas creen que esta disponibilidad puede coincidir, más a menos, con la caída aguda en la demanda de energía motivada por la reducción de las actividades en construcciones nucleares. La posición energética del país puede, de esta manera, deslizarse rápidamente desde la carestía a la saturación, con consecuencias sociales y económicas fácilmente conflictivas.

Otras tecnologías de producción energética pueden mostrar peculiaridades similares; las investigaciones están todavía en curso. Las informaciones precisas sobre energía nuclear son escasas y algunos de los análisis descritos más arriba se discuten todavía acaloradamente. Pero todo parece indicar que las consideraciones sobre energía neta es decir, cuanta energía útil se produce y a cambio de cuanta energía invertida se convertirán en un factor adicional significativo en la planificación de la política energética, especialmente en lo que afecta a tecnologías de producción intensivas en energía, como la electricidad nuclear.

Hemos aludido antes a los peligros debidos a la radiactividad de los materiales en el ciclo del combustible nuclear. Los efectos de las bajas dosis de radiación y la formación gradual de radiactividad artificial en el medio ambiente son muy difíciles de determinar; si, en su momento, resultasen ser un riesgo serio para la ecología global y para el vigor genético de los seres vivos, podría ser demasiado tarde para remediar la situación. Por supuesto que pueden aplicarse las mismas consideraciones a otros contaminantes creados por el hombre, como los metales pesados y los agentes químicos persistentes; la preocupación nuclear no es la única, aunque en este tema ya conocemos la vulnerabilidad de los organismos a la radiación y no sabemos cómo extrapolarlo al planeta entero o a muchas generaciones humanas expuestas.

Un problema más agudo, de naturaleza similar, surge de la acumulación de residuos radiactivos de alta actividad, procedentes del reprocesado del combustible. Productos de fisión como el estroncio-90 y el cesio-137 permanecen siendo peligrosos durante centenares de años, y algunos actínidos como el plutonio-239 y el americio-241, durante miles de años. Ningún sistema humano puede garantizar el aislamiento de tales sustancias durante un período tal. Los volúmenes de esos residuos son, desde luego, pequeños en comparación con los desechos de otras tecnologías energéticas, como por ejemplo los vertederos y las cenizas de las centrales de carbón o los lodos sulfurosos de los filtros de las chimeneas de gas. Si los residuos de alta actividad pueden solidificarse, en cristales

28

Con respecto al intenso programa nuclear francés, recientemente se ha advertido que puede estar ya, de cara a 1985, sobredimensionado. Para esas fechas, y de continuar la marcha actual, Francia poseerá tanta potencia nuclear instalada que habrá de utilizar algunas de estas centrales como centrales de punta, con lo que se trastocará, con indudables repercusiones económicas, el papel habitual de base de este tipo de centrales.

compactos de boro silicato, su movilidad puede minimizarse. Pero los problemas permanecen; no en tanto técnicos, sino en cuanto éticos. ¿Estamos justificados para valernos de la energía nuclear si, actuando así, imponemos una carga real permanente a nuestros descendientes? Por otra parte, ¿estamos justificados para recluir nuestras exigencias energéticas a los combustibles fósiles y, desde luego, condenarlos a una renta mísera durante generaciones?

También surgen problemas más inmediatos. El ciclo del combustible nuclear abunda en tecnologías complejas, en instalaciones que contienen imponentes cantidades de materiales radiactivos. ¿Qué garantía tenemos de que esas instalaciones pueden garantizar un funcionamiento seguro? Una brecha en la contención, sea por accidente o por sabotaje, podría liberar suficiente radiactividad como para hacer inhabitable indefinidamente una gran área. Algunos analistas, especialmente los que elaboraron el Estudio de Seguridad del reactor WASH-1400, de la AEC, han concluido en que la probabilidad de un accidente grave en un reactor de agua ligera es minúscula. Pero sus conclusiones no han permanecido sin desafíos; y quedan los interrogantes sobre otros modelos de reactores, sobre otras instalaciones del ciclo del combustible como las plantas de reprocesado, y, desgraciadamente, sobre el sabotaje.

El problema más inquietante de todos es, probablemente, el de la seguridad de los materiales fisibles: garantizar que el material nuclear potencialmente militar - plutonio-239, uranio-233 y uranio-235 - no caigan en manos peligrosas, sean gobiernos irresponsables, sean terroristas. Esta posibilidad está muy lejos de resultar hipotética, y no parece conducir a una fácil solución. El sector nuclear norteamericano ha propuesto el establecimiento de un *National Fissile Material Security Service* (Servicio Nacional de Seguridad de los Materiales Fisibles), que sería una agencia federal como el FBI y la CIA, con responsabilidad para supervisar abierta o secretamente el ciclo del combustible nuclear. No es una idea atractiva, confirmando una tendencia hacia el control centralizado y autoritario de la sociedad, precisamente el más adecuado para provocar el inconformismo social que podría llevar más fácilmente al cataclismo nuclear. Esto también recuerda el caso de William T Riley, que fue el máximo jefe de seguridad de la AEC, que fue sentenciado en febrero de 1973 a tres años de cárcel por haber pedido prestado 239.000 dólares a sus compañeros de la AEC, no pudiendo devolver unos 170.000; la mayor parte del dinero la había gastado en las carreras de caballos. ¿Quién, en un Servicio de Seguridad Nacional, vigilaría a los guardianes?

El problema, además, no está reducido a los límites nacionales. Las negligencias en puntos clave de cualquier parte del mundo pueden tener repercusiones, a su vez, en cualquier parte del mundo. Las ramificaciones del terrorismo internacional no necesitan ser recordadas. A la vista de esto, el entusiasmo por exportar la tecnología de reactores desde Estados Unidos, Gran Bretaña, Francia, Canadá y la Unión Soviética a otros países algunos de dudosa estabilidad resulta casi perverso.

Fred Iklé, director de la *Arms Control and Disarmament Agency* (Agencia de Desarme y Control de Armamentos), subrayó, hablando en enero de 1975, un aspecto muy serio de la situación. ¿Qué sucederla si, con la tecnología nuclear y los materiales cada vez más esparcidos, una explosión nuclear barriese, por ejemplo, Washington? Los Estados Unidos podían no tener clara la idea de quién la había provocado, y de esta manera toda la teoría monolítica de la mutua disuasión estratégica se desharía en una ruidosa ineficacia. Muy curiosamente, en una época en que el acceso a los recursos parece provocar muy fácilmente un sobresalto tras otro, la diseminación de la tecnología nuclear por doquier tendrá, indudablemente, un efecto estabilizador inesperado, aunque desconcertante. Sea cual sea el tamaño de una nación o de un grupo de participantes, si tienen acceso a las armas nucleares, o incluso a alguna cantidad de radiactividad de larga duración, su voz deberá oírse con respeto. Desde este punto de vista, un país con muchas instalaciones nucleares vulnerables se convierte en rehén de cualquiera.

Las grandes centrales energéticas sean nucleares o de combustible fósil y sus sistemas de redes eléctricas necesarias son vulnerables de numerosas formas, tanto durante la construcción como durante la operación. Las centrales nucleares no pueden construirse económicamente por debajo de un cierto tamaño, por lo menos 100 MWe, y pueden fácilmente ser más rentables a potencias superiores. Desgraciadamente, las centrales de gran potencia exigen un período de tiempo muy largo para su construcción (por lo menos, cinco años, y en muchos casos se llega a diez). Esto significa que esas centrales se construyen con un vacío de planificación; no pueden hacerse predicciones fiables de demanda eléctrica para períodos superiores a cinco años. Las centrales de esa potencia son propensas a problemas de ingeniería de diversa naturaleza, durante la construcción y durante el funcionamiento; y un pequeño fallo puede hacer inutilizable una central de 1.000 MWe durante meses, con unos costes prohibitivos para el propietario. Precisamente, en Gran Bretaña se dio esta coincidencia de efectos en los años 60. Con base en una previsión de un 8 por 100 de crecimiento de la demanda de electricidad la CEGB encargó un amplio programa de nuevas centrales, incluyendo las centrales malogradas con reactores avanzados refrigerados por gas. Estas centrales y los cuarenta y siete enormes sistemas de nuevos turbogeneradores, cada uno para 500 MWe, que podían ser usados tanto en centrales nucleares como de combustible fósil, produjeron problemas interminables. Afortunadamente para la CEGB, la tasa prevista de crecimiento de la demanda resultó ser exageradamente errónea; la tasa real de crecimiento era menor del 3 por 100, y las centrales inservibles no resultaron necesarias de ninguna manera. Los perjudicados fueron los consumidores de electricidad y los contribuyentes, que tuvieron que financiar la inversión innecesaria en nueva potencia a través de las tarifas eléctricas y los impuestos.

Muchos comentaristas han empezado a cuestionar las pretendidas economías de escala de las grandes centrales. Las economías pueden parecer reales sobre el papel; pero si los retrasos en la construcción, los problemas imprevistos de ingeniería y las consiguientes interrupciones se reflejaran en los cálculos el tamaño económico de las centrales resultaría mucho más pequeño de las que están ahora en construcción. Además, una central energética que produzca 1.000 MW de electricidad produce también unos 2.000 MW de calor, cantidad demasiado grande para ser utilizada, incluso en la mayor instalación industrial. Por eso las instalaciones gigantes han de ser ubicadas en emplazamientos remotos, donde pueda descargarse el calor a los alrededores como un residuo; normalmente es en lugares vírgenes o en espacios de esparcimiento, que han de ser, además, alterados para facilitar las instalaciones de transmisión que, a su vez, conllevan pérdidas adicionales de energía útil.

Como consecuencia, la atención se vuelve ahora hacia las diferentes filosofías y tecnologías del suministro de energía. La mayor parte de la energía necesitada por una economía industrial no es energía de alta calidad o de alta temperatura, como la electricidad, sino calor de baja calidad. En algunos países, como Japón, Australia y regiones del sur de los Estados Unidos, la energía solar se ha usado desde hace tiempo para calentar y refrigerar viviendas y suministrar agua caliente; el interés por las aplicaciones de la energía solar en bajas temperaturas crece actualmente en todo el mundo. Incluso en más altas latitudes, se está comprobando que la energía solar puede proporcionar una parte aprovechable del suministro energético total, incluso si solamente se trata de la primera fase del calentamiento de agua. Los costes de capital son todavía altos, pero se espera que disminuyan mientras la tecnología madura y adquiere más amplias aplicaciones. También el viento está siendo considerado como una posible aportación al suministro energético en algunas regiones. Como la energía solar directa, la energía eólica es una fuente energética descentralizada en sí misma; tanto la energía solar como la eólica pueden suponer una contribución económica significativa al abastecimiento energético, a medida que las ventajas de las fuentes descentralizadas sean reconocidas.

La energía geotérmica energía procedente del ardiente interior de la corteza terrestre está también en investigación como fuente, tanto de calor directo como de vapor para mover turbogeneradores. Su disponibilidad variará de una región a otra, pero puede ser sustancial. Los procesos biológicos para producir combustibles como el metano a partir de los desperdicios orgánicos, se han aprovechado en algunos lugares; en tanto los precios y las disponibilidades de los suministros fósiles resulten menos favorables, la biogeneración puede jugar, nuevamente, un papel económico. Se han propuesto tecnologías más exóticas, incluyendo sistemas marinos para aprovechar la energía de las olas del océano y utilizar los gradientes de temperatura entre el fondo y la superficie.

Los partidarios de estas fuentes de energía alternativa no señalan que alguna de ellas pueda abastecer todas las necesidades. Señalan, más bien, que una mezcla de fuentes diferentes, que atienda la demanda tanto en calidad como en cantidad, es viable y alcanzable teniendo en cuenta los actuales condicionamientos financieros, de recursos y de tiempo. Piden la consolidación de la investigación y el desarrollo energéticos, que en los últimos veinticinco años se han concentrado en la energía nuclear con la exclusión casi de otras tecnologías, incluso aquellas basadas en los combustibles fósiles como la gasificación y la licuefacción de carbón. Estiman que si, al menos, una pequeña parte del esfuerzo aprovechable que se destina a investigación y desarrollo fuera dirigida hacia las energías alternativas, pronto resultaría que la energía nuclear no es la única ni la mejor. Otros están en desacuerdo; a su entender, solamente un rápido desarrollo de la tecnología nuclear abastecerá las necesidades energéticas de la población de la tierra.

Todavía nos encontramos ante la abundancia de potenciales y posibilidades; todavía están abiertas las opciones. Dentro de esta misma generación estas opciones se agotarán, casi con seguridad. Las decisiones que están ahora pendientes afectarán no solamente al suministro de energía y la demanda sino también a la organización total de nuestra sociedad, globalmente considerada. Nosotros, los habitantes del mundo, debemos participar en estas decisiones. Antes de que nos sometamos y sometamos a nuestros descendientes a un futuro nuclear, resulta vital que cooperemos y que entendamos la naturaleza del peligro. Si acometemos esto ahora lo habremos hecho para siempre.

Apendice A

Vocabulario nuclear

ABCC: Atomic Bomb Casualty Commission (Comisión de Damnificados por la Bomba Atómica); organización norteamericana, en Japón, responsable de los cuidados dispensados a las víctimas de las bombas de Hiroshima y Nagasaki.

ACRS: Advisory Committee on Reactor Safeguards (Comité Consultivo para las Salvaguardias de los Reactores); responsable del establecimiento de criterios de seguridad en los reactores autorizados en los Estados Unidos.

Actinide: Actínido; uno de los elementos pesados -actinio, torio, protactinio, uranio, neptunio, plutonio, americio, curio, berkelio y californio-, todos ellos químicamente muy similares; los actínidos de interés son los emisores alfa de largo período de semidesintegración.

Activation: Activación, absorción de neutrones para convertir en radiactiva una sustancia.

AEA, UKAEA: United Kingdom Atomic Energy Authority (Junta de Energía Atómica Británica).

AEC, USAEC: United States Atomic Energy Commission (Comisión de Energía Atómica Norteamericana).

AECL: Atomic Energy of Canada Ltd. (Energía Atómica del Canadá SL).

AGR: Advanced Gas-Cooled Reactor (Reactor Avanzado Refrigerado por Gas).

Alpha Particle: Partícula alfa; núcleo de helio de alta energía (dos protones y dos neutrones) emitido por algunos núcleos radiactivos pesados.

Atom: Átomo

Beta Particle: Partícula beta; electrón de alta energía emitido por un núcleo radiactivo.

Boron: Boro; poderoso absorbente de neutrones utilizado -normalmente en acero aleado- en barras de control del reactor, etc.

Breeder: Regenerador, reactor que produce más núcleos fisibles de los que consume.

Breeding Gain: Relación de regeneración; incremento proporcional en los núcleos fisibles del combustible después de su extracción del regenerador.

Burner: Quemador, reactor que consume más núcleos fisibles de los que produce.

Burn-up: Grado de quemado; producción acumulativa de calor procedente del combustible del reactor directamente relacionado con la producción de productos de fisión; se mide usualmente en megavatios-día por tonelada de uranio.

Butex: "Butex"; disolvente orgánico utilizado en el reprocesado del combustible irradiado del reactor.

BWR: *Boiling Water Reactor* (Reactor de Agua en Ebullición).

Caesium: Cesio; generalmente, cesio-137; producto de fisión emisor beta, biológicamente peligroso.

Calandria: Calandria; tanque que contiene el moderador -normalmente, agua pesada- en los modelos de reactores de tubo de presión, y a través del cual se extienden los tubos de presión.

CANDU: *Canadian Deuterium Uranium Reactor* (Reactor Canadiense de Uranio y Deuterio).

Cave: Depósito blindado; estancia de paredes fuertemente blindadas, dentro de la cual pueden manejarse los materiales altamente radiactivos por control remoto.

CEA: *Commissariat d'Energie Atomique* (Comisariado de Energía Atómica), Francia.

CEGB: *Central Electricity Generating Board* (Agencia Central de Generación de Electricidad), Gran Bretaña.

Cerenkov Radiation: Radiación de Cerenkov; luz azulada que se emite cuando la radiación nuclear se transmite a través de un medio transparente (como agua) a una velocidad mayor que la de la luz en ese mismo momento.

Chain Reaction: Reacción en cadena.

China Syndrome: Síndrome de China; posible consecuencia de la fusión del corazón de un reactor, cuando una masa fundida de material intensamente radiactivo desciende a través de la vasija y la contención hacia el subsuelo en dirección a China (salvo si el reactor está, por ejemplo, en Japón).

Cladding, clad: Vaina, envainado; lámina metálica (Magnez, circonio, acero inoxidable o cerámica) dentro de la cual se encierra herméticamente el combustible del reactor.

CND: *Campaign for Nuclear Disarmament* (Campaña por el Desarme Nuclear), Reino Unido.

CNI: *Committee for Nuclear Information* (Comité para la Información Nuclear), Estados Unidos.

Containment: Contención; estructura dentro del edificio del reactor -consistente a veces en el propio edificio- que actúa como una barrera para contener cualquier radiactividad que pueda escapar del propio reactor.

Control Rod: Barra de control; barra de material absorbente de neutrones insertada en el corazón del reactor para engullir neutrones y detener o reducir el nivel de la reacción de fisión.

Conversion Ratio: Relación de conversión; número de núcleos fértiles convertidos en fisibles, en comparación con el número de núcleos fisibles perdidos por el desarrollo de la fisión.

Coolant: Refrigerante; líquido (agua, metal fundido) o gas (dióxido de carbono, helio, aire) bombeado a través del corazón del reactor para extraer el calor generado en el mismo.

Cooling Pond: Piscina de refrigeración; tanque profundo de agua en el que se descarga el combustible irradiado después de su extracción de un reactor, y donde permanecerá hasta que sea

transportado hacia el reprocesado.

Core: Corazón, núcleo; región de un reactor que contiene el combustible (y el moderador, en su caso), dentro de la cual se desarrolla la reacción de fisión.

Critical: Crítica; se refiere a una reacción en cadena en la que el número total de neutrones en una “generación” de la reacción en cadena es el mismo que el número total de neutrones de la siguiente “generación” de la cadena; es decir, una situación en la que la densidad de neutrones ni aumenta ni disminuye.

Criticality: Criticalidad, criticidad; situación crítica.

Criticality Accident: Accidente de criticidad; acumulación inadvertida de material fisible en un conjunto crítico, acompañada de la explosión de neutrones de radiación gamma.

Cross Section: Sección eficaz; área hipotética que mide la probabilidad de un suceso nuclear.

Crud: Incrustación; depósito de impureza dentro de un reactor.

Curie: Curio; cantidad de material radiactivo que produce 37.000 millones de emisiones radiactivas por segundo; es la radiactividad de 1 gramo de radio.

Daughter, o Daughter Product: Descendiente o producto derivado; sustancia en la que se transforma un núcleo radiactivo por desintegración radiactiva.

Decay: Desintegración; transformación radiactiva.

Decay Heat: Calor de desintegración; calor generado por la radiactividad en el combustible de un reactor en operación; se añade al calor de la reacción en cadena, y no puede detenerse.

Decontamination: Descontaminación; transferencia de radiactividad indeseada hacia una ubicación menos inadecuada.

Densification: Densificación; compactación del combustible dentro del envainado como una consecuencia de la irradiación; puede producir daños en el combustible debido a las presiones desequilibradas entre el exterior y el interior.

Depleted Uranium: Uranio empobrecido; uranio con una proporción de uranio--235 inferior a la natural (0,7 por 100), que se obtiene como residuo en el proceso de enriquecimiento

Deuterium: Deuterio, es el hidrógeno--2, o hidrógeno pesado, su núcleo consiste en un protón más un neutrón, a diferencia del hidrógeno ordinario, con sólo un protón.

Deuterium Oxide, heavy water: Oxido de deuterio, agua pesada; agua en la que los Átomos de hidrógeno son hidrógeno pesado.

Deuteron: Deuterón; núcleo de hidrógeno pesado.

Disassembly: Desajuste; daño estructural en el interior del corazón de un reactor, como resultado de una liberación excesiva de energía; también referido como “expansión en el núcleo”.

Divergence: Divergencia; cuando se alcanza criticidad.

Diversion: Diversión; eufemismo aplicado a “robo”, cuando se refiere a material nuclear “especial” o estratégico.

Dose: Dosis; cantidad de energía suministrada a una unidad de masa de un material, debido a la radiación que lo atraviesa.

Dose- Rate: Tasa de dosis; relación de tiempo en la que la radiación suministra energía a la unidad de masa de un material a través del cual pasa la radiación.

Doubling Time: Tiempo de duplicación; espacio de tiempo que necesita un reactor regenerador para producir suficiente material fisible adicional para duplicar su inventario total.

Drywell: Pozo seco; contención de hormigón que rodea la vasija de presión de un reactor de agua en ebullición.

ECCS: *Emergency Core Cooling System* (Sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo).

Electron: Electrón; partícula cargada negativamente; más ligera que el protón o el neutrón.

Enriched: Enriquecido; referido al uranio en el que la proporción de uranio-235 ha sido aumentada por encima del contenido natural del 0,7 por 100.

Enrichment: Enriquecimiento, proceso de obtención del uranio enriquecido.

ERDA: *Energy Research and Development Administration* (Administración para la Investigación y el Desarrollo Energético); una de las dos agencias federales norteamericanas creadas después de la escisión de la AEC.

Excited: Excitado; que tiene exceso de energía.

Exposure: Exposición; relativo a la radiación; paso de la misma a través de un material.

Fallout: Lluvia radiactiva; productos radiactivos de la fisión, creados por las explosiones nucleares, que descienden de la atmósfera hacia la superficie de la tierra.

Fast: Rápido, relativo a neutrón, de alta energía, que proviene de la fisión.

Fast Breeder: Regenerador rápido, reactor diseñado para una relación de conversión mayor de 1, utilizando neutrones rápidos sin moderador.

FBR: *Fast Breeder Reactor* (Reactor Rápido Regenerador).

Fertile: Fértil; referido a materiales como el uranio-238 o el torio-232, que pueden transformarse, mediante absorción de neutrones, en materiales fisibles.

Fissile: Fisible o fisionable; capaz de experimentar fisión.

Fission: Ruptura de un núcleo en dos fragmentos más ligeros (productos de fisión) más neutrones libres, bien espontáneamente o bien como consecuencia de la absorción de un neutrón.

Flux: Flujo, relativo a neutrones; nube móvil de partículas, especialmente en el corazón del reactor; también referido al número de neutrones que atraviesa el área en la unidad de tiempo.

FOE: *Friends of the Earth* (Amigos de la Tierra).

Fuel: Combustible; material (como el uranio natural o el enriquecido y el uranio y/o el óxido plutonio) que contiene núcleos fisibles, fabricado en una forma adecuada a su empleo en el corazón del reactor.

Fuel Assembly, Fuel Element: Conjunto o elemento combustible; conjunto de combustible más envainado, que puede insertarse o extraerse individualmente en el corazón del reactor.

Fuel Pin: Varilla combustible; tubo singular de envainado relleno de “pellets” de combustible.

Fuel Rating, Specific Power: Potencia específica; potencia instantánea producida por unidad de masa de combustible; se mide en kilovatios por kilogramo de uranio.

Fusion: Fusión; combinación de dos núcleos ligeros para formar un núcleo sencillo más pesado.

Gamma Ray: Rayos gamma; radiación electromagnética de alta energía y de gran poder de penetración, emitida por el núcleo.

Gas Centrifuge: Centrifugadora de gas; sistema de enriquecimiento de uranio por el que los núcleos de uranio--238, más pesados, son suavemente separados de los núcleos de uranio--235, más ligeros, mediante la centrifugación de gas de hexafluoruro de uranio; se trata de una planta gigante que utiliza muchos miles de centrifugadoras en cascada.

Gaseous Diffusion: Difusión gaseosa; proceso de enriquecimiento de uranio que aprovecha la leve diferencia en la velocidad de difusión de las moléculas de hexafluoruro de uranio--235 y 238, a través de una membrana metálica porosa; se trata de una planta gigante que utiliza muchos miles de celdas de difusión en cascada.

Gigawatt: Gigavatio; mil millones de vatios.

Graphite: Grafito; carbono cristalino negro, compacto, utilizado como moderador y reflector de neutrones en los corazones de los reactores.

GS: *Girdler-Sulphide* (Sulfuro-Girdler); proceso utilizado para la producción de agua pesada.

Half- Life: Vida media o período de semidesintegración; tiempo en el que la mitad de los núcleos de una muestra de material radiactivo experimentan desintegración; constante característica de cada especie particular de núcleo.

Heat Exchanger: Intercambiador de calor, caldera en la cual el refrigerante caliente procedente del corazón del reactor lanza el vapor para mover el turbogenerador; ver también *Intermediate Heat Exchanger*.

Heavy Hydrogen, Heavy Water: Hidrógeno pesado, Agua pesada; ver *Deuterium y Deuterium Oxide*.

Helium: Helio; gas ligero, químicamente inerte, utilizado como refrigerante en reactores de alta temperatura.

Hex: “hex”; hexafluoruro de uranio, compuesto, de uranio fácilmente vaporizable, utilizado en procesos de enriquecimiento.

High-Level: Alta actividad; referido a los residuos intensamente radiactivos, de vida media larga y media.

Hot Cell: Ver *Cave*, depósito blindado.

HTGR: *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (Reactor de Alta Temperatura Refrigerado por Gas).

IAEA: *International Atomic Energy Agency* (Organismo Internacional de la Energía Atómica), llamada comúnmente “Agencia de Viena”, perteneciente a las Naciones Unidas.

ICRP: *International Commission on Radiological Protection* (Comisión Internacional para la Protección Radiológica).

Intermediate Heat Exchanger: Intercambiador intermedio de calor; dispositivo en forma de tubo, en un reactor refrigerado por sodio, en el que el refrigerante de sodio primario, altamente radiactivo, transfiere calor al refrigerante de sodio secundario, no radiactivo.

Iodine: Yodo; referido al yodo-131, producto de fisión biológicamente peligroso, de corto período de semidesintegración (8 días), que tiende a acumularse en la glándula tiroides.

Ion: ión; Átomo alterado por uno o más electrones (en más o en menos) y, por consiguiente, eléctricamente cargado.

Ionizing Radiation: Radiación ionizante; radiación que puede suministrar energía en una forma capaz de expulsar los electrones fuera de los Átomos, convirtiéndolos en iones.

Irradiated: Irradiado; referido al combustible de un reactor que se ha visto sometido a una reacción en cadena, acumulando, así, productos de fisión; expuesto a la radiación, en cualquier aplicación.

Isotope: Isótopo; forma de un elemento, con el mismo número de protones en su núcleo que las demás variedades del mismo, pero con diferente número de neutrones que las otras variedades.

JCAE: *Joint Committee on Atomic Energy* (Comité Conjunto para la Energía Atómica), del Congreso de los Estados Unidos.

Kilowatt: Kilovatio, mil vatios.

Krypton: Kriptón; gas químicamente inerte; el isótopo kriptón-85 es un problemático producto de fisión que se emite actualmente a la atmósfera procedente de las plantas de reprocesamiento.

Laser Enrichment: Enriquecimiento por láser, separación del uranio-235 a partir de la excitación selectiva de un isótopo de uranio-238 con un láser, es un atajo potencial para obtener uranio altamente enriquecido, que presentaría un serio problema teniendo en cuenta la posibilidad de extravío de material fisible.

Light Water: Agua ligera; agua ordinaria, a diferencia del agua pesada.

LMFBR: *Liquid Metal Fast Breeder Reactor* (Reactor Rápido Regenerador de Metal Líquido).

Load Following: Seguimiento de carga; variación del nivel de potencia de un reactor para alcanzar los requisitos de una red de distribución de electricidad.

LOCA: *Loss -of- Coolant Accident* (Accidente con Pérdida de Refrigerante).

Low -Level: Baja actividad; referido a los residuos no especialmente radiactivos.

LWR: *Light Water Reactor* (Reactor de Agua Ligera); aplicado bien a los de agua a presión, bien a los de agua en ebullición.

Magnox: “Magnox”; aleación utilizada como envainado de combustible en los reactores británicos refrigerados por gas de la primera generación, que, por esto, se llaman reactores Magnox.

Manhattan Project: “Proyecto Manhattan”; o “Distrito Manhattan” del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, nombre en código dado al proyecto que desarrolló la bomba atómica.

McMahon Act: Ley McMahon; es la Ley de Energía Atómica, de 1946, que descartó toda nueva transferencia de información nuclear de los Estados Unidos a sus antiguos aliados Gran Bretaña y Canadá y dio lugar a la AEC y al JCAE.

Megawatt: Megavatio; un millón de vatios.

Meltdown: Fusión del corazón; referido al corazón del reactor, es una consecuencia del sobrecalentamiento que hace que una parte o todo el combustible sólido alcance la temperatura a la que el envainado y probablemente el combustible y la estructura de soporte se licúan y se colapsan.

Mixed Oxide: Oxido mixto; referido al combustible del reactor, es un combustible en el que los núcleos fisibles son de plutonio--239 mezclado con uranio natural o agotado, en una proporción equivalente al uranio enriquecido.

Moderator: Moderador, materia cuyos núcleos son, predominantemente, de bajo peso atómico (p. e. el agua ligera, el agua pesada, el grafito), y se usa en el corazón del reactor para frenar neutrones e incrementar la probabilidad de su absorción y transformación en uranio--235 o plutonio--239, con el fin de producir fisión.

MUF: *Material Unaccounted For* (Material No Contabilizado); se refiere a la diferencia entre la cantidad de material fisible esperado en un determinado punto del ciclo del combustible y la cantidad realmente medida; puede ser una indicación de que ha habido “diversión”.

MWE: *Megawatts Electric* (Megavattios eléctricos).

MWT: *Megawatts Thermal* (Megavattios térmicos).

NAK: “Nak”; aleación de sodio y potasio, de bajo punto de fusión, que se utilizaba como refrigerante en los primeros reactores rápidos regeneradores y como refrigerante de emergencia en algunos modelos posteriores.

Neutron: Neutrón; partícula sin carga, constitutiva del núcleo, que es expulsada durante la fisión con una alta energía y es capaz de ser absorbida por otro núcleo, produciendo así una fisión adicional o “comportamiento” radiactivo.

NPT: *Non-Proliferation Treaty* (Tratado de No Proliferación Nuclear), firmado con la intención de controlar la proliferación de armas nucleares y de su tecnología.

NRC: *Nuclear Regulatory Commission* (Comisión Reguladora Nuclear); sucesora de la AEC, con responsabilidad en la autorización de instalaciones nucleares norteamericanas.

NRDC: *Natural Resources Defense Council* (Consejo de Defensa de los Recursos Naturales), de los Estados Unidos.

NRPB: *National Radiological Protection Board* (Agencia Nacional de Protección Radiológica), de Gran Bretaña.

NSSS: *Nuclear Steam Supply System* (Sistema Nuclear de Suministro de Vapor); todo lo que, en una central nuclear, no incluye los turboalternadores: el reactor y sus órganos auxiliares (máquina de recarga, instalación de control, ventana de manipulación del combustible, piscina de refrigeración, generadores de vapor, si existen, etc.).

Nuclear Reactor: Reactor nuclear.

Nucleon: Nucleón; protón o neutrón, indistintamente.

Nucleus: Núcleo.

Nuclide: Núclido; núcleo de un isótopo, especie nuclear.

Off Gas: Escape de gas; gas radiactivo procedente del interior de un reactor que se libera a la atmósfera, normalmente después de un retardo para reducir su radiactividad.

Period: Período; relativo a reactor, siendo el tiempo empleado para un cierto incremento (o reducción) en el nivel de potencia; un período breve señala que el reactor es difícil de controlar.

Pile: Pila; nombre antiguo de un reactor nuclear, empleado después del primer reactor, el Chicago Pile nº 1.

Pipeline Inventory: “Inventario de tuberías”. Cantidad total de material asociado a un reactor; cantidad existente en el núcleo en funcionamiento, en la piscina de refrigeración, en la planta de reprocesado, en la planta de fabricación de combustible y en el transporte.

Plowshare: Reja de arado; programa norteamericano para aplicaciones en ingeniería civil de los explosivos nucleares.

Plutonium: Plutonio; metal pesado artificial, producido por el bombardeo de uranio por neutrones; fisible, altamente reactivo químicamente y emisor alfa extremadamente tóxico.

Power Density: Densidad de potencia; producción de calor por unidad de volumen, en un corazón de reactor, se mide en kilovatios por litro.

Pressure Suppression Pool: Piscina de relajación de presión; tonel circular, en la parte inferior del pozo seco, en un reactor de agua en ebullición; está llena de agua hasta su mitad, para condensar el vapor procedente del sistema de refrigeración del reactor, si se hace necesario.

Pressure Vessel: Vasija de presión; gran contenedor de acero soldado u hormigón pretensado dentro del cual está el corazón del reactor y otros órganos interiores del mismo.

Pressurizer: Presurizador, en un reactor de agua en ebullición, se llama así a una caldera calentada eléctricamente, en el sistema de refrigeración, que hierve el agua lo necesario para mantener la presión del refrigerante.

Price--Anderson Act: Ley Price-Anderson; ley norteamericana elaborada por el Congreso, limitando la responsabilidad ante terceros de los propietarios de reactores en caso de accidente, y previendo indemnización federal por encima de ese límite.

Proton: Protón; partícula cargada positivamente, constituyente del núcleo.

PTB: Partial Test Ban (Prohibición Parcial de Pruebas Nucleares); tratado prohibiendo explosiones nucleares en la atmósfera.

Purex: "Purex"; disolvente orgánico utilizado en el reprocesado del combustible irradiado del reactor.

PWR: Pressurized Water Reactor (Reactor de Agua a Presión).

QA: Quality Assurance (Control de Calidad).

Rad: Radiation absorbed dose (Dosis de radiación absorbida); medida de la exposición a la radiación.

Radiation: Radiación; partículas alfa, beta o neutrones, o rayos gamma, que se emiten desde una sustancia radiactiva.

Radioactivity: Radiactividad; comportamiento de una sustancia en la que sus núcleos experimentan una transformación y emiten radiación; obsérvese que la radiactividad produce radiación, siendo dos términos no equivalentes.

Radiogenic: Radiogénico; causado por la radiación, como sucede con determinadas enfermedades.

Radioisotope: Radioisótopo; isótopo radiactivo.

Radionuclide: Radionúcleo; núcleo radiactivo.

Radium: Radio; elemento pesado, emisor alfa, intensamente radiactivo.

Radon: Radón; gas radiactivo, emisor alfa, emitido por el uranio.

Reactivity: Reactividad; medida de la facilidad del conjunto del material fisible para soportar una reacción en cadena mantenida. “Coeficiente de reactividad”, es una medida de la forma con que la reactividad de un conjunto cambia en respuesta a otro cambio, como, por ejemplo, de temperatura.

Reflector: Reflector, de neutrones; material de peso atómico (agua ligera o pesada, grafito) que rodea el corazón de un reactor para reflejar los neutrones y devolverlos a la región de la reacción.

Refuelling: Recarga; reemplazamiento del combustible de un reactor después de que ha soportado el máximo grado de quemado posible; es una operación necesaria debido a la pérdida de reactividad, de la aparición de productos de fisión absorbentes de neutrones y de los daños acumulativos de la radiación, de la temperatura, del refrigerante, etc.

Rem: Roentgen equivalent man: (Roentgen equivalente hombre); unidad de exposición a la radiación, a tener en cuenta en el daño biológico extra producido por las partículas alfa o los neutrones rápidos.

Reprocessing: Reprocesado; tratamiento mecánico y químico del combustible irradiado para extraer los productos de fisión y recuperar el material fisible.

Runaway: “Excursión de potencia”; reacción en cadena accidental e incontrolada, que se “desboca”.

Running Release: Emisión controlada; emisión programada de material radiactivo al aire exterior o al día.

Safeguards: Salvaguardias; término aplicado al seguir la pista del material nuclear especial, para impedir la diversión (o robo).

Scram: “Scram”; parada de emergencia de la reacción de fisión en un reactor.

Separative Work: Trabajo de separación; medida de la energía necesitada para enriquecer el uranio.

SGHWR: Steam Generating Heavy Water Reactor (Reactor Generador de Vapor de Agua Pesada).

Shielding: Blindaje; pared de material (hormigón, plomo, agua) que rodea una fuente de radiación para reducir su intensidad.

SIPI: Scientists' Institute for Public Information, (Instituto de Científicos para la Información Pública), de los Estados Unidos.

SNM: Special Nuclear Material (Material Nuclear Especial); material fisible potencialmente utilizable como armas nucleares.

Specific Activity: Actividad específica; radiactividad por unidad de masa.

Specific Power: Potencia específica; calor producido por unidad de masa de combustible; equivalente a *fuel rating*.

Steam Generator: Generador de vapor, caldera en la que el refrigerante caliente procedente del reactor produce el vapor que moverá el turboalternador.

Strontium: Estroncio; isótopo, especialmente referido al estroncio-90; producto de fisión emisor beta biológicamente peligroso.

Sub--Critical: Subcrítico, situación de suministro insuficiente de neutrones para mantener una reacción en cadena que se propague por sí misma.

Tailings: “Colas” o estériles de la minería del uranio; fina arena gris, sobrante de la extracción del uranio del mineral; contiene radio y emite radón.

Tails Assay: Ensayo de colas; cantidad de uranio--235 fisible que queda en el uranio empobrecido durante el proceso de enriquecimiento.

Thorium: Torio; metal pesado fértil

Tritium: Tritio, núcleo de hidrógeno-3 que contiene un protón más dos neutrones; radiactivo.

Uranium: Uranio; el elemento natural más pesado; es un metal gris oscuro; los isótopos 233 y 235 son fisibles y el 238, fértil; emisor alfa.

USW: *Unit of Separative Work* (Unidad de Trabajo de Separación).

Vitrification: Vitrificación; fusión de un residuo de alta actividad en un sólido tipo vidrio.

WASH--740: Documento de la AEC sobre *Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Nuclear Power Plants* (Posibilidades Teóricas y Consecuencias de Accidentes Importantes en Centrales Nucleares), 1957.

WASH--1250: Documento de la AEC sobre *The Safety of Nuclear Power Plants -Light Water Cooled- and Related Facilities* (La Seguridad de las Centrales Nucleares -Refrigeradas por Agua Ligera- e Instalaciones Anexas), 1973.

WASH--1400: Documento de la AEC sobre *An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants* (Una Evolución de Riesgos de Accidentes en Centrales Nucleares Comerciales), 1974.

Watt: Vatio, unidad de potencia; una persona adulta emite entre 100 y 200 vatios de calor.

Wigner Energy: Energía de Wigner, energía almacenada en el moderador de grafito como resultado de la deformación por radiación.

Xenon Poisoning: Envenenamiento de xenón; acumulación del producto de fisión ávido de neutrones xenón-135, con reducción de la reactividad del reactor.

Yellow Cake: Pastel amarillo; óxidos mixtos de uranio, con fórmula U₃O₈, producidos a partir del

mineral de uranio en un proceso de extracción.

Apéndice B

Las radiaciones ionizantes y la vida

En el Capítulo 1 describíamos cómo las actividades nucleares pueden producir cuatro tipos de “radiación ionizante”: radiaciones alfa, beta y gamma, y neutrones. Allí y en otros lugares indicamos brevemente parte de la evidencia acumulada desde el descubrimiento de la radiactividad, con respecto a los efectos de la radiación ionizante en los organismos vivos, incluyendo los seres humanos. El estudio de estos efectos se llama “radiobiología”. Es un tema de profunda y controvertida complejidad, máxime desde que el hombre empezó a crear radiactividad masivamente. Está muy lejos de las pretensiones de este libro describir con detalle los hallazgos de la radiobiología. No obstante, ya que la mayor parte de los peligros nucleares potenciales inmediatos surgen de los efectos de la radiación ionizante en los seres vivos, es esencial algo de radiobiología para acometer temas conflictivos.

En lo que sigue, “radiación” significa “radiación ionizante”, y no, por ejemplo, luz solar.

Estamos de acuerdo en que, fundamentalmente, la radiación ionizante no es buena para usted. El paso de la radiación alfa, beta o gamma, o los neutrones, a través de los tejidos vivos transfiere energía a los átomos y las moléculas del tejido, de tal manera que resulta obligadamente más o menos perjudicial para la delicada organización de los sistemas vivos. El efecto perjudicial es bastante proporcional a la “transferencia lineal de energía” de la radiación. La radiación alfa y beta es de baja transferencia lineal de energía y la radiación gamma y los neutrones son de alta transferencia lineal de energía, dependiendo, además, de la energía de la radiación. No obstante, a diferencia de una bala en el cerebro, la radiación- excepto cuando se da en dosis masivas es relativamente sutil en sus efectos. La radiación es invisible y también lo es, en casi todos los casos, su daño. Pese a ello, después de que la energía de la radiación ha destruido algunas moléculas en una célula viva, el comportamiento bioquímico de la célula puede verse afectado. Gradualmente, en lugar de jugar su papel acostumbrado en la actividad metabólica, deshaciendo determinadas sustancias y creando otras, el sistema empieza a errar. Algunas sustancias ya no pueden ser asimiladas, sino que se van acumulando, otras pueden crearse erróneamente, alterando adicionalmente la bioquímica del sistema.

Los sistemas vivos ostentan redundancias intrínsecas, esto es, sistemas adicionales para recurrir a ellos cuando algo falla; pueden también llevar a cabo una cierta cantidad de trabajo de recomposición en sistemas descompuestos. Bajo determinadas circunstancias, el daño radiobiológico se produce sin que resulte evidente. En otras, el efecto nocivo inicial precipita las consecuencias, que multiplican la alteración. Desgraciadamente, todavía no sabemos exactamente cómo el daño inicial de la radiación desencadena en los tejidos vivos consecuencias dañinas sucesivas. Está claro que una dosis masiva de radiación puede aplastar, sencillamente, un sistema vivo, con un daño primario tan alto que sea incapaz de recuperarse. Pero puede producirse un daño mucho más insidioso incluso por una simple partícula alfa, una partícula beta, un rayo gamma o un neutrón, aunque necesite un largo plazo para desarrollarse: años o, incluso, décadas. Su manifestación final puede resultar totalmente irreconocible como daño de la radiación, no solamente debido al retraso sino también debido a que el efecto patológico puede ser consecuencia de una larga serie de consecuencias biológicas acumulativas desencadenadas por un impacto casual a un componente diminuto pero sensible. Puede apreciarse que el estudio científico de la radiobiología es desafiante, frustrante y abierto a interpretaciones ampliamente diferentes de los datos.

El órgano de mayor nivel en el campo de la radiobiología, en lo que se refiere a la toma de decisiones, es la *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), fundada en 1928, que está constituida por notables radiobiólogos de muchos países diferentes, y cuyos comités se reúnen regularmente para evaluar los conocimientos del momento sobre los fenómenos radiobiológicos. Sobre la base de estas evaluaciones, el ICRP propone normas en los campos en los que pueden aparecer los efectos de la radiación. Los informes y las recomendaciones de la ICRP constituyen la base de las normas radiobiológicas en prácticamente todos los países implicados en actividades nucleares, aunque se interpretan y aplican distintamente en, por ejemplo, los Estados Unidos y Gran Bretaña.

La Publicación 9 de la ICRP es una presentación concisa de sus recomendaciones sobre normas de radiaciones, y el razonamiento sobre el que se basan dichas normas. Otras publicaciones de la ICRP proporcionan más detalles, informaciones y análisis.

Los efectos de la radiación pueden considerarse como actuales o diferidos dependiendo de si se hacen patentes en el plazo de unas semanas después de la exposición a la radiación o si solamente aparecen después de transcurridos años. Los efectos pueden, además, clasificarse como “somáticos” y “genéticos”. Un efecto “somático” de la radiación aparece en el organismo -que puede ser el cuerpo humano- que ha sido expuesto. Un efecto “genético” se muestra en los hijos o en los descendientes posteriores. Los efectos agudos pueden identificarse muy fácilmente como heridas de la radiación; los efectos somáticos posteriores pueden resultar mucho más difíciles y los genéticos pueden no ser identificables en absoluto.

Los daños agudos de la radiación -centenares de rads en un periodo breve- ocasionan daño a los tejidos que forman los glóbulos rojos; las dosis más altas pueden también dañar el estómago y los intestinos, y las dosis extremadas, el sistema nervioso central. Pero dosis más pequeñas entrañan normalmente una serie más larga de consecuencias biológicas. Puede aparecer leucemia cinco años o más después de la exposición; otros tipos de cánceres pueden no mostrarse hasta quizás veinte años después de la exposición. Pueden formarse cataratas en el ojo; puede producirse daño en la piel. La fertilidad puede reducirse. Al nivel de una práctica indetectabilidad, se trata de un “envejecimiento no específico” o de un “acortamiento de la vida por la radiación”, cuya base resulta muy oscura. Todos ellos son efectos somáticos.

Incluso un simple rayo gamma puede producir daño a una célula reproductora, a un gen o a un cromosoma. Si la célula dañada participa en ese momento en la formación de un descendiente, el efecto del daño aparece en el descendiente o, posiblemente, sólo en las generaciones futuras. Si el daño es suficientemente serio, el descendiente puede no sobrevivir si sobrevive para reproducirse, la llamada “mutación” puede resultar, lentamente, una característica extendida entre la población descendiente.

Estamos continuamente sometidos a la radiación ionizante procedente de fuentes naturales: los rayos cósmicos, el uranio y el torio de la tierra y ciertos isótopos radiactivos de sustancias de nuestro cuerpo, especialmente el potasio-40. Esta radiación “de fondo” varía considerablemente de un lugar a otro de la tierra, y de acuerdo con la altura sobre el nivel del mar. Esta es, normalmente, del orden de 100 milirem (0,1 rem) al año. Ya que esta radiación natural es inevitable, los radiobiólogos consideran que hemos aprendido a vivir, biológicamente, con ella. Esto no significa que sea inofensiva, sino que, simplemente, sea cual sea su daño, nos permite existir sin observar efectos nocivos. Como consecuencia, la radiación natural se tome como punto de partida para el establecimiento de las normas referidas a la radiación artificial. Las recomendaciones fundamentales de la ICRP establecen las “Dosis Máximas Permisibles” para los que están expuestos

profesionalmente a la radiación, y “Dosis Límite” para el público en general. Ya que los trabajadores bajo radiación son conscientes del peligro posible y esperan ser vigilados adecuadamente, la ICRP les permite una mayor exposición; para asignar un margen, los Límites de Dosis se establecen en diez veces menos que las Dosis Máximas Permisibles para la exposición profesional.

La ICRP identifica los órganos genitales y el tuétano rojo de los huesos como las partes más sensibles del cuerpo humano. La Dosis Máxima Permissible para los trabajadores se sitúa en 5 rem por año para cualquiera de ellos, y el Límite de Dosis para el público en 0,5 rem por año. Las Dosis Máximas Permisibles para la piel, los huesos y el tiroides son de 30 rem, y los Límites de Dosis, 3 rem por año; manos y antebrazo, 7,5 y 15, y otros órganos simples, 1,5 y 7,5. La Dosis Máxima Permissible para el cuerpo, globalmente, es 5 rem por año para los trabajadores, y el Límite de Dosis para el público, 0,5 rem por año.

Actualmente, las aplicaciones médicas de la radiación suponen, con mucho, la parte más importante de la exposición del público a la radiación artificial. Los rayos -X médicos y dentales y las diversas formas de radioterapia -especialmente el tratamiento del cáncer con radiaciones- son instancias en las que un beneficio bien definido para el individuo expuesto se contrapone a la posibilidad, estadística y variable, aunque pequeña, de daño por la radiación. Es menos fácil establecer una comparación beneficio-riesgo con respecto a otras formas de radiación artificial. La lluvia radiactiva procedente de las pruebas con bombas nucleares es una contribución mensurable a la exposición a la radiación del público en el momento actual, a cambio de beneficios que pueden ser considerados como discutibles. Esto nos lleva directamente al campo de la controversia. ¿Qué efectos perniciosos -si los hay- produce el bajo nivel de las radiaciones producidas por la lluvia radiactiva? ¿Qué efectos perniciosos -si los hay- produce el todavía bajo nivel de las radiaciones procedentes de las emisiones habituales de las instalaciones nucleares civiles? ¿Son adecuadas las normas sobre la radiación para proteger la salud pública? ¿Son adecuadas para proteger la salud de los trabajadores en las instalaciones nucleares?

No nos vamos a dirigir aquí al tema del reforzamiento de las normas, que es otra cuestión. Examinaremos, más bien, dos aspectos de la polémica sobre las normas de la radiación, ninguno de ellos resuelto, para indicar puntos de contradicción.

El primer aspecto se refiere al control de las emisiones de rutina de la radiactividad procedente de las instalaciones nucleares. Hay dos enfoques básicos para el establecimiento de normas en este tema; uno se emplea en el Reino Unido y el otro en los Estados Unidos.

En el Reino Unido, cuando se hace una propuesta de liberación de radiactividad, un estudio previo determina a dónde va a ir esa radiactividad. Los diferentes radioisótopos siguen diferentes caminos. Cuando la radiactividad se libera en un cauce de agua, parte de ella se deposita en su lecho, parte en tierra, parte es absorbida por las plantas o los animales, y así sucesivamente. Un radioisótopo que se diluye inicialmente en la descarga original puede ser concentrado por organismos, que lo absorben. Todas estas posibilidades deben ser identificadas y evaluadas. Para la descarga programada, hay que distinguir un “grupo crítico” de consumidores humanos finales, que son aquellos cuya exposición consiguiente puede ser la mayor, frente a la radiactividad que sigue el “camino crítico”. Si la exposición del grupo crítico ha de mantenerse por debajo del Límite de Dosis de la ICRP, esto implica una restricción en la descarga original, llamada “Límite derivado de trabajo”. El valor máximo permitido de descarga radiactiva se determina consecuentemente, y el control regular asegura que el límite permanece dentro de los criterios ICRP. En el momento en que éste se escribe no ha habido ninguna recusación científica a este procedimiento, que ha estado rigiendo desde los

primeros días de la actividad nuclear en Gran Bretaña.

En los Estados Unidos se adopta un enfoque diferente. Las normas se establecen sobre una base a nivel de toda la nación. Para cada radioisótopo en particular se determina una Concentración Máxima Permisible en el aire (MPCa) o en el agua (MPCw). Ningún efluente que se descargue desde una instalación nuclear debe exceder esta concentración en los límites del emplazamiento. Es, realmente, más fácil para unas instalaciones que para otras el cumplir con estos criterios; algunas instalaciones nucleares descargan efluentes cuya concentración es una fracción significativa de la máxima permisible, mientras otras descargan efluentes muy por debajo de la concentración permisible. Las normas elaboradas sobre esta base vienen siendo blanco de los análisis críticos detallados del Dr John Gofman y el Dr Arthur Tamplin. El *National Committee on Radiological Protection* (NCRP), una institución privada que posee la autorización del gobierno para establecer normas, asesora a la AEC (ahora, la NRC), que posee la responsabilidad estatutaria de aplicarlas. La NCRP y la AEC se enzarzaron en una fogosa discusión con los Drs Gofman y Tamplin, ambos expertos en el campo de la biología de radiaciones, que propusieron el concepto de “dosis de duplicación”: dosis de radiación que puede esperarse para duplicar la incidencia de cualquier efecto patológico. Los argumentos manejados son sutiles, y los datos estadísticos permiten diferentes interpretaciones; pero el trabajo de los Drs Gofman y Tamplin les llevó a afirmar que las normas en vigor sobre efluentes, de la AEC, podrían proporcionar algo así como 24.000 casos adicionales de cáncer en los Estados Unidos cada año. La AEC contestó la validez de la “dosis de duplicación”; sugerir que toda la población recibiría algo remotamente aproximado a la dosis máxima permisible era, afirmaron, un sinsentido. La respuesta a esto de los críticos fue: entonces, ¿por qué no bajar los límites? En su momento, en el caso de ciertos radioisótopos, los límites fueron reducidos, realmente. Pero el debate continúa.

Más recientemente, los Drs Tamplin y Tom Cochran publicaron un informe sugiriendo que las partículas microscópicas de polvo de plutonio, inhaladas, podían producir efectos mucho más preocupantes de lo que señalaban los límites. Desde su punto de vista, la emisión alfa de corto alcance, muy altamente concentrada, procedente de una “partícula activa” de este tipo, proporciona una dosis de radiación muy alta a un volumen reducido de tejido pulmonar, el efecto de esta radiación local intensa no puede ser anticipado adecuadamente, según ellos, sobre la base de que está distribuida sobre la masa total de los pulmones, como prevén los actuales límites. Los Dres. Gofman y Tamplin insisten en que sus análisis implican una reducción drástica en la concentración permisible del óxido de plutonio en el aire: esta reducción debiera ser del orden de 115.000 veces. De nuevo, sus análisis han sido duramente discutidos, tanto en los Estados Unidos, por la AEC, como en el Reino Unido, por la NRPB. Pero de nuevo, el debate continúa.

En una perspectiva más amplia, los criterios referentes a la radiación artificial deben atender cuidadosamente a las cantidades de radiactividad que suponen los programas nucleares previstos. Los estudios sobre el problema de la dosis debida a la radiactividad ya liberada indican que los márgenes pueden acabar siendo mucho más exigüos antes del final de este siglo. Por el momento, la urgencia más apremiante se refiere a mejores datos, a una más cuidadosa compilación de historiales médicos y de exposición de la población que se sabe haya podido recibir radiación artificial de cualquier tipo. Los expertos en radiaciones señalan repetidamente que no resulta satisfactorio extrapolar, sin ninguna crítica, desde los experimentos con animales a los efectos previsibles en seres humanos. Ya que algunos apoyarían la experimentación programada en seres humanos, debiera considerarse como un principio básico de la medicina de las radiaciones el recoger y compilar información detallada de los efectos donde ocurran o puedan ocurrir. Por citar un ejemplo: los Estados Unidos han establecido, desde 1968, un “Registro de Transuránidos” para seguir la pista de los empleados que han tenido contacto con el plutonio y otros actínidos a lo largo de su trabajo, y

para seguir sus historiales médicos respectivos. En Gran Bretaña, este sistema de mantenimiento de informes ha sido iniciado solamente en 1975. Hasta que pueda disponerse de evidencias, la radiobiología permanecerá siendo un foco de polémicas profundamente ingratas.