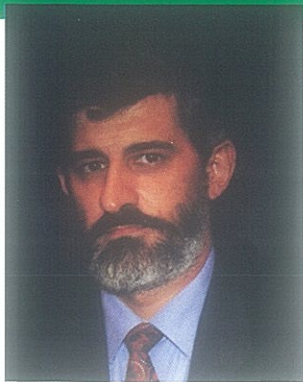




José María MARTÍNEZ-VAL PENÁLOSA es Catedrático de Tecnología Nuclear en la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Fue Presidente de la Sociedad Nuclear Española en el bienio 1987-88, y anteriormente había sido Vicepresidente y Secretario General. Fue Director de la mencionada Escuela entre 1991 y 1995. Ha publicado varios artículos en revistas tales como *Fusión Technology*, *Nuclear Science and Engineering*, *Nuclear Technology*, *Laser and Particle Beams* y *Physics Letters*. Actualmente es Director de la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial.

CHERNOBIL. SU REPERCUSIÓN EN LA FÍSICA Y EN LA TECNOLOGÍA

J.M. MARTÍNEZ-VAL

INTRODUCCIÓN

Aun a riesgo de caer en el tópico, cabría decir que Chernobil es la crónica de una catástrofe anunciada.

Podría situarse el comienzo del anuncio a principios de 1.943, cuando Eugene Wigner, tras el éxito obtenido por Fermi y su equipo con el Chicago Pile-1, se aprestó a analizar la física de los reactores moderados por grafito y refrigerados con diversos materiales. El reactor de Chicago no había necesitado refrigerantes, pues había sido concebido como mera demostración de que era posible alcanzar la masa crítica y mantener la reacción en cadena; lo cual se consiguió y mantuvo. Para fabricar plutonio a partir de las conversiones fértiles en uranio 238, hacía falta que los reactores tuvieran alta densidad de potencia, y ello requería un refrigerante que extrajera el calor generado. Es bien sabido que en la comercialización de los reactores de grafito en Europa Occidental, se eligió el CO₂, un gas considerablemente inerte en todos los sentidos, para producir la refrigeración. Pero este planteamiento, que también fué formulado por Wigner,

adolecía de una bajísima densidad de potencia, del orden de 2 W/cm³.

Ahora bien, en los análisis realizados en aquella época, y que siguen siendo el fundamento de la teoría neutrónica de los reactores nucleares, quedó en evidencia el curioso doble papel neutrónico del hidrógeno en los reactores: por un lado, es un moderador muy eficaz, que requiere menos colisiones elásticas que ningún otro nucleido para llevar a los neutrones rápidos hasta la termalización. Por otro lado, el hidrógeno manifiesta una sección eficaz de captura de neutrones térmicos no despreciable, del orden de 0,25 barnios a temperatura ambiente. En ese sentido, el hidrógeno se comporta como un competidor contra el uranio 235, cuya apetencia por los neutrones térmicos es bien conocida, pues su sección eficaz a esa temperatura es casi de 700 barnios. Si bien la diferencia entre secciones eficaces parece muy grande, hay que tener en cuenta que los márgenes de reactividad tolerados en un reactor son muy pequeños, y no puede despreciarse el papel absorbente del hidrógeno.

Una decena de años antes del momento



Fotografía que ilustra la cubierta del libro "And the name of the star is Chernobyl"

al que nos referimos, Fermi había identificado ya la importancia de los neutrones térmicos para conseguir un alto número de reacciones nucleares. En los reactores térmicos se aprovecha precisamente dicha apetencia del uranio 235, y de ahí la necesidad de moderar los neutrones, inicialmente muy rápidos.

Cuando se explica a los alumnos que el uranio 235 tiene menor masa crítica en un reactor térmico bien moderado que la masa crítica del uranio 235 en solitario, suele surgir en ellos cierta perplejidad, máxime cuando esa diferencia es casi de un orden de magnitud. La importancia del espectro neutrónico del reactor se realza mucho mediante esa aparente paradoja, pues se aprecia que el espectro rápido, que sería el propio de un reactor que solo contuviera uranio 235, es mucho menos eficaz para mantener la reacción en cadena que el espectro térmico.

Estas cuestiones de física básica de la neutrónica de los reactores nucleares pueden parecer innecesarias para un artículo como éste, pero lo cierto es que están en la mismísima raíz del accidente, que no habría tenido lugar si quiénes manipulaban el reactor hubieran entendido algo mejor su física, y en particular el doble papel que juega el hidrógeno en presencia del flujo neutrónico. No cabe afrontar un análisis del accidente de Chernobil sin prestar especial dedicación a este tema. Hay que admitir que en la raíz del accidente concurren circunstancias que podrían calificarse de estúpidas, relativas a la organización de la explotación nuclear en el régimen soviético, así como a la escasísima cultura de seguridad de los operadores de la Central, que no tuvieron reparo en cometer *seis flagrantes violaciones de seguridad* en contra de sus propias especificaciones técnicas [1]. Ahora bien, ni con esas violaciones el accidente hubiera tenido lugar, de no haberse iniciado una maniobra (jun experimento!) cuando las condiciones del reactor eran de *supermoderación*; o dicho de otra manera, cuando el coeficiente de huecos de vapor era positivo, a lo cual tendremos que prestar atención en este artículo.

De no hacerlo, un estudio sobre Chernobil quedaría absolutamente cojo, especialmente para especialistas. Es curioso que en la mayor parte de la bibliografía publicada sobre este accidente no se entra en absoluto sobre la física del mismo (quizá por estar esa bibliografía escrita por personas no especialistas en física de reactores). Con ello no se hace sino aumentar más la confusión y la ininteligibilidad del accidente, como tendremos ocasión de comentar con relación al papel jugado por unas determinadas barras de control, denominadas en la bibliografía original, traducida al inglés, "*Automatic Control Rods*". Cuando expongamos este asunto, veremos también que hay una aparente paradoja, que sin embargo queda perfectamente resuelta cuando

el hidrógeno y su doble papel entran en juego.

La catástrofe de Chernobil estaba, por así decirlo, anunciada desde 1.943, cuando Wigner identifica unos regímenes de funcionamiento de los posibles reactores de grafito refrigerados por agua, en los cuales la realimentación termohidráulica-neutrónica, debida a los cambios de densidad en el refrigerante, harían aparecer un fenómeno de realimentación positiva. Debido a ello, un pequeño aumento espúreo de la potencia del reactor comportaría un aumento cada vez mayor, solo mitigado por el efecto Doppler. Pero el efecto Doppler llega a su saturación cuando las temperaturas del combustible se acercan a las de fusión, y en algunos regímenes neutrónico-termohidráulicos puede llegar a ser dominante el efecto de reactividad por variaciones de densidad del agua.

Este efecto positivo de reactividad no debía parecer alarmante a los reactivistas soviéticos, que en 1981, cinco años por tanto antes del accidente, reportan una serie de experimentos (casi tan alocados como el que daría lugar al accidente de Chernobil) en la Central Nuclear de Beloyarsk. [2] En estos experimentos, los efectos del vapor y los coeficientes de reactividad se estudiaban no llevando al reactor a condiciones tales que en caso de fallo del experimento hubieran supuesto su parada automática, sino en condiciones tales que un fallo del experimento podría haber provocado un importante accidente de reactividad, con el consiguiente vaciado del agua de refrigeración, como ocurriría en Chernobil. Es insólito constatar como los técnicos soviéticos gustaban de jugar con dicho coeficiente de reactividad, para comprobar que en algunos casos podría producir una realimentación positiva. Los problemas de seguridad de este tipo de reactores eran por otra parte conocidos tal como se demuestra por la referencia nº 3 de este artículo, que junto a las dos anteriores son de especial importancia para comprender la física de este triste suceso.

La larga trayectoria que va desde los estudios de Fermi, Wigner y sus colegas en 1.943 hasta el accidente de 1.986, pasando por experimentos como los de Beloyarsk en 1.981, dejan la amarga sensación de que un accidente de este tipo era una catástrofe anunciada, que alcanzó magnitudes realmente extraordinarias por una conjunción de efectos que a alguien puede parecer mera casualidad, pero que están ligados por una misma causa: ignorancia y desprecio por los sistemas de seguridad.

CHERNOBIL COMO CASO DE ESTUDIO

Del estudio del accidente de Chernobil se pueden aprender muchas lecciones

por lo que respecta a organización de equipos (y organización política también) a garantía de calidad (o más bien a falta de ella) a los problemas de preparación de operadores de centrales nucleares, al tratamiento de accidentes nucleares y al daño biológico de la radiación. Acerca de todas estas facetas cabe aprender muchísimo estudiando el accidente de Chernobil. Sin embargo, en el campo concreto de la física de reactores, realmente no se aprende nada nuevo, o por así decirlo, nada que no estuviera ya en los libros y perfectamente explicado en cualquier curso de mediano nivel sobre tecnología nuclear. Eso sí, el accidente es el más dramático ejemplo de que las leyes de la naturaleza sí son realmente invulnerables.

A diferencia de la garantía de calidad o de los sistemas de organización, sobre los cuales se pueden ir introduciendo continuas mejoras, la física de los fenómenos nucleares y termohidráulicos obedece a ecuaciones bien conocidas en las que intervienen coeficientes también conocidos con notoria precisión. Esas ecuaciones no son susceptibles de cambio por la voluntad humana ni por el Boletín Oficial. Su mal conocimiento tuvo mucho que ver en el accidente de Chernobil, y esa quizá sea la única lección importante que cabe aprender del accidente por lo que a Física de Reactores respecta. Pero habida cuenta de que el accidente no viene sino a ratificar lo que los principios físicos establecen, estos principios cobran aun mayor importancia, y como lección subsidiaria sí deberíamos asegurarnos de que dichos principios no son vulnerados por las evaluaciones de seguridad, ni son dejados de lado a la hora de diseñar o de operar los reactores nucleares.

Estos principios están muy ligados al tema de la reactividad, concepto éste que en la seguridad nuclear occidental recibe la atención que merece, pero no mucha más, por entenderse que los accidentes de reactividad están prácticamente cortados de raíz, por el propio diseño de los sistemas. En la seguridad nuclear occidental casi todo el énfasis está puesto sobre como prevenir los escapes de radiactividad, evitando que el núcleo del reactor quede sin refrigeración e interponiendo asimismo barreras múltiples para el confinamiento de los productos radiactivos. En Chernobil se puso también de manifiesto que un **accidente de reactividad** que conlleve una liberación de energía tan espectacular como la que tuvo lugar en dicho accidente, hace inviable cualquier barrera de contención, y hace que partículas de plutonio alcancen los 2 km. de altitud, como se detectó tras dicho accidente. Esta lección no obliga a cambiar ni el diseño ni los criterios de seguridad de nuestros reactores nucleares, pero sí acentúa la importancia de que la reactividad y sus efectos dinámicos estén rigurosamente bajo control.

LA FÍSICA DE LOS REACTORES RBMK

En un reactor térmico existen dos efectos dinámicos fundamentales: el efecto Doppler, ligado a la temperatura del combustible; y los efectos del moderador.

El primero produce siempre una realimentación negativa en la conducta neutrónica-termohidráulica del reactor, dado que al aumentar la temperatura del combustible, disminuye su reactividad, y por tanto decrece la potencia que se está produciendo.

Este efecto se debe a que al aumentar la temperatura del combustible, las resonancias del uranio 238 capturan más neutrones, por lo que el factor de multiplicación neutrónica del reactor disminuye (o lo que es equivalente, se introduce una reactividad negativa). Este efecto de realimentación negativa es sumamente beneficioso para el comportamiento dinámico del reactor, pues la relación entre la potencia y la temperatura siempre es positiva, en el sentido de que un aumento de la potencia producirá un aumento de temperatura en el combustible. Si por este último aumento se produce inherentemente la aparición de una reactividad negativa, que tiende a disminuir exponencialmente la potencia, el reactor dispone de un mecanismo de autoestabilización, muy parecido al principio de Le Châtelier en los reactores químicos, según el cual los reactores en equilibrio tienden a oponerse a las perturbaciones exógenas que se hagan sobre sus componentes (tales como aumento de presión, temperatura, etc.), buscando un nuevo punto de equilibrio.

El efecto Doppler se cuantifica por lo que se denomina coeficiente de reactividad de la temperatura del combustible, valor éste que es negativo como se ha dicho, y que multiplicado por la derivada (siempre positiva) de la temperatura respecto de la potencia, da lugar a una realimentación negativa de extraordinaria utilidad para evitar que los reactores nucleares puedan aumentar rápidamente su potencia.

El efecto del moderador depende fundamentalmente del tipo de moderador usado. En los reactores de agua ligera se puede tipificar simplemente por la densidad del moderador, al igual que en el caso anterior lo tipificábamos por la temperatura del combustible. En este caso hay que tener en cuenta que, ante un aumento de la potencia del reactor, y por tanto de la potencia que ha de extraer el refrigerante, se produce una dilatación de éste, disminuyendo su densidad. Así pues, en este caso partimos de una derivada negativa de la densidad del moderador respecto de la potencia; por lo cual, para que el efecto de realimentación global sea negativo, ha de ser positiva la derivada de la reactividad respecto de la densidad del moderador. Concretamente, esto significa que ante un aumento de la densi-

dad del moderador, el factor de multiplicación neutrónica del reactor debe aumentar, y a esta condición se le denomina submoderación.

Cuando los reactores están submoderados, se comportan dinámicamente de forma autoestabilizante, como puede verse por un razonamiento análogo al realizado para la temperatura del combustible. Ante un aumento de la potencia, sea cual sea su origen, la densidad del moderador líquido disminuirá. Si el coeficiente de reactividad del moderador es positivo (derivada positiva del factor k respecto de la densidad), esta disminución de densidad conllevará una disminución de su factor de multiplicación neutrónica, o lo que es equivalente, conllevará una introducción de reactividad negativa, lo cual significará una disminución de la potencia. Estamos de nuevo ante una situación en la cual el reactor se opone a las perturbaciones que se realizan contra su equilibrio, sea cual sea el origen de dichas perturbaciones.

El análisis dinámico de esta realimentación, incluso en su versión primaria o lineal, está fuera del alcance de este artículo, pero podemos decir que sólo serviría para cuantificar numéricamente lo que cualitativamente se ha mencionado en los párrafos anteriores. Si bien es cierto que la cuantificación numérica es imprescindible en ingeniería, a efectos prácticos de saber en un momento dado como va a reaccionar un reactor, basta con saber como se comportan las derivadas de unas magnitudes respecto de otras variables, según hemos indicado anteriormente. En concreto, resulta fundamental saber que un reactor, para tener condiciones autoestabilizantes plenas, tiene que funcionar en régimen de *submoderación*. Se llama así este régimen porque ante un aumento de la densidad del moderador, aumenta también el factor de multiplicación neutrónica.

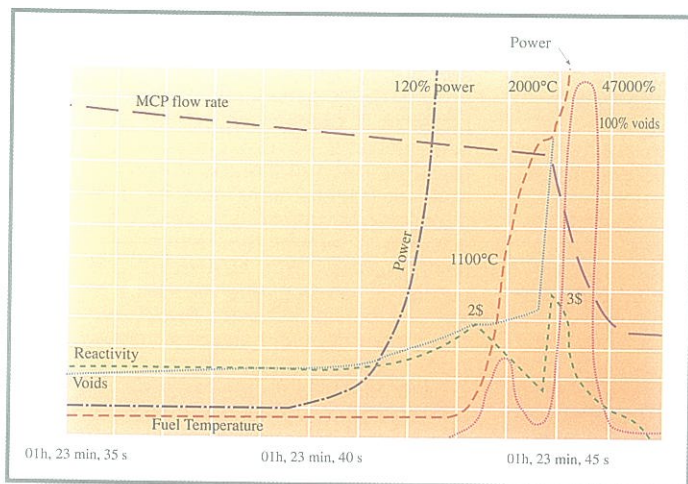
Este comportamiento continúa hasta alcanzar el máximo de dicho factor, que corresponde a lo que podría llamarse condición de moderación óptima para ese reactor. Pasada ésta, es decir, si se sigue añadiendo más moderador al reactor, el reactor entra en zona de supermoderación, y en este caso el factor de multiplicación neutrónica disminuye al aumentar la densidad del agua. Al ser negativa esta derivada, y al serlo también la derivada de la densidad respecto de la potencia, nos encontramos con una realimentación positiva (menos $\times$ menos = más). Este más significa que, ante un aumento de la potencia, la realimentación neutrónica-termohidráulica a través del moderador va a hacer incrementar más aún la potencia, por lo cual puede generarse una subida muy rápida de la potencia, con consecuencias lógicamente catastróficas, pues el refrigerante no está capacitado para extraer tanta energía por unidad de tiempo como sea necesario.

En el caso de los reactores moderados

por grafito, la influencia del moderador sobre la dinámica es ligeramente distinta, y la variable independiente que caracteriza el proceso no es en este caso la densidad del grafito, que prácticamente permanece inalterada durante cualquier accidente (salvo que alcance las dimensiones catastróficas de Chernobyl), sino por la temperatura del grafito. Esta temperatura marca la energía cinética media de los neutrones térmicos, y por tanto define el espectro neutrónico del cual dependen las reacciones nucleares que tienen lugar en el reactor. Lógicamente, la temperatura del grafito aumenta ante un aumento de la potencia, al igual que ocurría con la temperatura del combustible. Ahora bien, la tasa de aumento de la temperatura del grafito es enormemente inferior a la tasa de aumento de la temperatura del combustible por dos razones fundamentales: en primer lugar porque en el grafito solo depositan su energía los neutrones rápidos, pero no los productos de fisión que nacen en el seno del combustible y llevan casi toda la energía de la fisión. En segundo lugar, por la enorme masa de grafito existente en estos reactores, y por su mayor calor específico, lo cual hace que ante un aumento determinado de potencia, el grafito aumente la temperatura una milésima de lo que aumenta la temperatura del combustible, o poco más. Así pues, aunque en los reactores de grafito, especialmente cuando en el combustible hay abundancia de plutonio 239, se pueda dar un coeficiente de reactividad positivo, y por tanto una realimentación positiva, ésta pasa desapercibida, por así decirlo, frente a la realimentación negativa del combustible a través del efecto Doppler. En los reactores tipo RBMK, cuyas peculiaridades es imprescindible considerar en el análisis de este accidente, la mayor parte de la moderación la efectúa el grafito, pero no puede olvidarse que existe una cantidad no despreciable de agua ligera, cuya situación física en el reactor hay que resaltar. El agua se encuentra rodeando las vainas en las que se aloja el combustible, y por tanto entre éste y el grafito, que conforma una gran matriz en la que están practicadas las perforaciones para que se alojen los elementos de combustible que están refrigerados por agua.

El agua ocupa por tanto un lugar de especial significación neutrónica, pues los neutrones térmicos (que nacen como tales neutrones térmicos en el moderador, entiéndase grafito) han de atravesar la película de agua para entrar en el combustible. Aquí cobra importancia fundamental el doble papel del hidrógeno del agua al que hemos aludido en la introducción. El hidrógeno, que se encuentra entre el grafito y el combustible, coadyuva con el primero para terminar de moderar los neutrones, pues además el agua se encuentra a bastante menor temperatura que el grafito (unos 260 °C frente a unos 500).

Por otro lado, el hidrógeno hace las



FI - Evolución de las variables más significativas durante el accidente [1,5]. La abscisa marca el tiempo, en los segundos previos a la explosión. Aunque el disparo de la turbina había tenido lugar a las 1h23min04seg., el primer medio minuto se limita a una evolución termohidráulica relativamente lenta, que comienza a tener efectos notables en la reactividad a partir de lo expuesto en la figura. Las ordenadas están divididas en doce tramos iguales, con diverso valor para cada variable, según se indica a continuación, diciendo cuanto es el valor mínimo y el máximo para cada caso: Reactividad: -1%, +5%. Potencia (línea continua: 0%, 120% del valor nominal que era de 3200 MW. Potencia (línea discontinua): 0 a 480 veces (no %) la Pot. nominal. Temperatura del HO2: 200 OC a 2000 OC. Voids (fracción de burbujas, en volumen): 0 a 120 % (máximo real es 100%). Flujo de recirculación MPC: 4 a 16 m³/s.

veces de sutil *blindaje* de neutrones térmicos, puesto que su sección eficaz de captura no es despreciable, y parte de los neutrones que están difundiendo desde el grafito hasta el combustible, no llegan a éste por quedarse capturados en el hidrógeno.

En un reactor RBMK submoderado, domina el primer papel del hidrógeno sobre el segundo. Es decir, por estar submoderado, el agua contribuye a la moderación significativamente, y si se retira el agua (nos quedamos sin refrigerante) se produce inherentemente una disminución de reactividad.

Por el contrario, si el reactor está supermoderado, domina el segundo de los efectos del hidrógeno, esto es, la captura de neutrones térmicos. En este caso, al eliminar parte del agua de refrigeración, lo que realmente se está quitando es un blindaje neutrónico que existe entre el grafito y el combustible. Al mejorar el acoplamiento neutrónico entre ambos materiales, mejora la reactividad y se dispara la potencia. En definitiva, si está en condiciones de supermoderación, un reactor posee una componente desestabilizante intrínseca, que puede llegar a dominar la evolución temporal del reactor.

En este punto hay que recordar el efecto Doppler, que inicialmente se encargará de evitar que esa realimentación positiva domine, pues su contribución es siempre negativa. Pero hemos dicho antes que el efecto Doppler va perdiendo eficacia al aumentar la temperatura del combustible, y podemos considerarlo prácticamente saturado cuando se alcance su temperatura de fusión. La competencia establecida entre la realimentación negativa del efecto Doppler y la realimentación positiva por super-

con neutrones inmediatos, que acabaría descoyuntando el reactor, pues tal liberación súbita de energía no pudo ser refrigerada por el agua existente en los canales de refrigeración.

La rápida ebullición de la película de agua inmediatamente cercana a las vainas, hizo que se alcanzara de inmediato la ebullición nucleada, a partir de la cual la refrigeración de las vainas resulta imposible. Mas aun, el aumento de la presión del vapor producido en la interfaz vaina-refrigerante hizo que el resto del líquido saliera expelido no por ebullición, sino por trabajo mecánico de expansión (es decir, PdV).

En este momento cabe traer a colación la paradoja antes citada sobre las barras de control automático, o barras AC, cuyo papel ha sido generalmente mal entendido en la bibliografía sobre Chernobil, entre otras cosas porque las explicaciones de los científicos soviéticos sobre dichas barras no son especialmente claras (ver referencias 1 a 3). Por ejemplo, en un libro muy bien documentado periódicamente, pero de nulo rigor en cuanto al análisis físico (ver referencia 4), se menciona que una de las vulneraciones de seguridad del accidente fue el hecho de que solo había, en el mo-

moderación, se decantará en favor de uno u otro según la importancia neutrónica relativa de cada fenómeno.

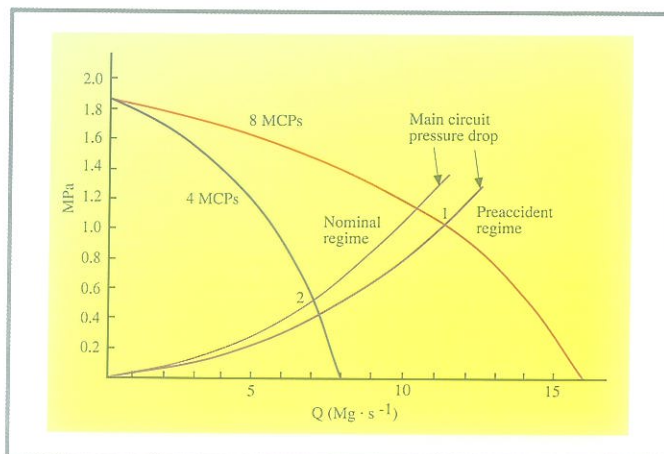
En el reactor nº 4 de Chernobil, en la madrugada del 26 de abril de 1.986, la importancia dinámica de la supermoderación era mucho mayor que toda la contribución negativa que podía aportar el efecto Doppler, debido a unas torpes maniobras previstas para efectuar un experimento que conllevaba pérdida de agua, y por tanto eliminación de ese sutil blindaje neutrónico entre el grafito y el combustible. Debido a ello, se dispararía una reacción en cadena supercrítica

mento de iniciar el experimento, ocho barras de control AC dentro del reactor, cuando las prescripciones técnicas obligaban a tener treinta. (Dicho sea de paso, esa obligación aumentó a ochenta barras tras el accidente, para todos los RBMK soviéticos).

El hecho de que una condición de seguridad se dé como un número mínimo de barras de control dentro del reactor, y no fuera, puede extrañar a primera vista. En nuestra mentalidad occidental, vemos las barras de control como elementos absorbentes que han de estar en número suficiente fuera del reactor, para introducirse en este y detener la reacción en cadena si es necesario. Por supuesto, este tipo de control (SCRAM) también existe en los reactores RBMK, pero conforma un conjunto de bancos de barras de control totalmente distinto de las AC. Esto es, los reactores RBMK han de tener fuera del reactor un número suficiente de barras de control SCRAM para detener la reacción en cadena en caso necesario. En ese caso, ¿cual es la misión de las barras de control AC, que al menos en número de treinta deberían haber estado dentro?

Siendo muy escuetos y contundentes, aunque habría que matizar numéricamente nuestra aseveración, puede decirse que las barras de control AC son una indicación del grado de submoderación que tiene el reactor; es decir, de la lejanía respecto del punto de moderación óptima. Para asegurar que el reactor es suficientemente submoderado, debe haber un mínimo número de barras de control AC, que antes del accidente estaba tasado en 30, y después del accidente se subió a ochenta. Muy posiblemente, con menos de 20 barras, un RBMK es supermoderado. En realidad, estas barras son una medida indirecta, y por así decirlo complementaria,

FII - Curvas características de las bombas de recirculación MCP (ver figura 3). Caso nominal: 8 bombas. Accidente: 4 bombas (siempre en paralelo). Las curvas parabólicas desde el origen de coordenadas marcan las líneas de caída de presión en función del flujo en régimen nominal y en el del accidente. Como consecuencia de la pérdida de bombeo en las 4 bombas alimentadas desde el turboalternador disparado, el punto de funcionamiento pasa de la posición 1 a la 2 (aproximadamente) lo que comporta una importante caída de presión en el primario, con la consiguiente cavitación de las bombas y, sobre todo, la ebullición del agua desde la entrada del reactor, aumentando rápidamente la fracción de burbujas (voids)



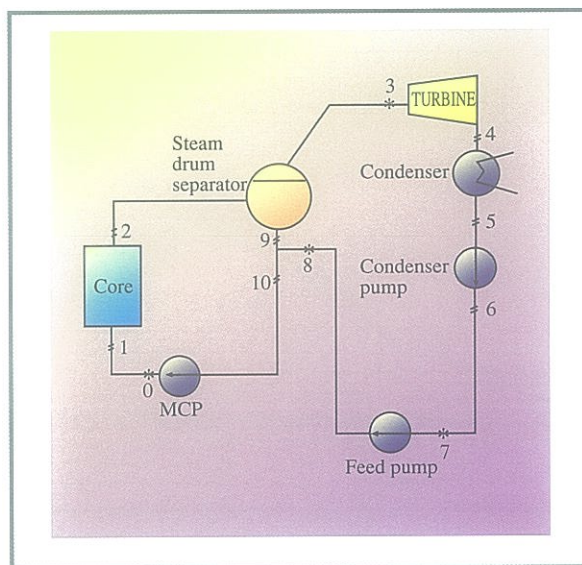
de la importancia neutrónica que tienen las capturas neutrónicas en el hidrógeno. Recordemos que el hidrógeno siempre tiene el papel, dominante o no, de blindaje neutrónico o absorbente entre el grafito y el combustible. Cuando estas absorciones de neutrones térmicos son muy elevadas, en los RBMK hay que extraer barras de control AC, pues ya hay un nucleido interno al reactor, el hidrógeno, que se encarga de absorber el exceso de neutrones que es imprescindible eliminar para mantener la reacción en cadena con un factor de multiplicación igual a 1. Por el contrario, cuando las barras de control AC están insertas en el reactor en un número elevado, quiere decir que las capturas neutrónicas en el hidrógeno tienen poca importancia, y en ese sentido domina su primer papel de coadyuvante de la moderación en el grafito, por estar todavía muy alejado del punto de moderación óptima, en la zona de submoderación.

Habría que precisar que en el número de barras de control AC que es necesario tener dentro del reactor influyen también otros aspectos como son las absorciones en los productos de fisión. No se puede olvidar que hubo un importante transitorio de xenon a lo largo de las horas previas al accidente y, sobre todo, que este reactor había alcanzado un grado de quemado inusualmente alto para este tipo de reactores (del orden 10.000 megavatio día por tonelada) por lo cual las absorciones neutrónicas en los productos de fisión no eran ni mucho menos despreciables.

Conjuntando todo este cuadro ya mencionado, y añadiendo razones termohidráulicas que veremos a continuación, se entiende que el reactor pudiera llegar a una condición no prevista en el diseño, pero sí prevista por Wigner 43 años antes. Concretamente, el hecho de que el hidrógeno adquiriera una importancia neutrónica extraordinaria, hasta tal punto de que el reactor se encontrara trabajando en zona de supermoderación. Al iniciar una perturbación importante, como consecuencia de querer realizar un experimento eléctrico-hidráulico, el reactor reaccionó según la previsión de Wigner, y se desencadenó una reacción en cadena supercrítica pronta, inicialmente apagada por el efecto Doppler; y subsiguientemente realizada por la expulsión de todo el agua del reactor, como consecuencia de la explosión de vapor en la interfaz con las vainas, por lo que sobrevino una segunda y definitiva explosión de altísima potencia, que llevó al experimento fatídico a niveles de catástrofe.

HITOS DEL ACCIDENTE

Desde un punto de vista científico y en cuanto a sus repercusiones en la tecnología nuclear, en la historia del acci-



F III - Esquema fluido-energético de una central RBMK

dente cabe destacar los siguientes hechos

A. Se había previsto realizar un experimento para comprobar la capacidad de un turboalternador disparado para mantener la alimentación eléctrica de cuatro bombas de recirculación, al menos durante unos segundos, mientras el turboalternador se detenía. Se había previsto efectuar el desacoplamiento de la turbina con el reactor funcionando entre 700 y 1000 MW (térmicos) y con la otra turbina ya desconectada. Sin embargo, cuando se bajaba del 50% de la potencia (1600 MW) hasta el nivel deseado, al final del día 25 de abril de 1.986, la potencia (por fisiones) bajó a unos 30 MW (térmicos). Tras un transitorio de más de 2 horas, los operadores lograron estabilizar el reactor a 200 MW y decidieron ejecutar el experimento, consistente en alimentar cuatro de las ocho bombas de recirculación con el turboalternador que se iba a disparar (las otras cuatro estaban conectadas a red). Para ello, y con objeto de repetir el experimento si fallaba, los operadores cometieron seis importantes violaciones de su propia normativa de seguridad (Ver referencias 1 y 5 para mayor detalle de su significación física).

B. El balance termohidráulico de la planta era muy diferente del nominal en RBMK. El flujo de recirculación del refrigerante era enormemente alto (sobre todo respecto de la potencia en dicho momento) y el flujo de agua de alimentación (condensado) era muy pequeño, por ser proporcionalmente muy pequeña la producción de vapor. La presión del primario era también inferior a la nominal. En la entrada del reactor, la temperatura era muy próxima a la de ebullición (muy ligero subenfriamiento de entrada). En la salida, como ya queda dicho, la calidad del vapor era muy pobre, por el alto caudal de recirculación.

C. En la documentación soviética presentada oficialmente al OIEA [1] se enumeran las famosas 6 violaciones de seguridad. La primera dice que se redujo el margen de reactividad operacional sustancialmente por debajo de lo permitido (solo había 8 barras AC dentro del reactor, cuando el mínimo exigido eran 30). La razón de que hubiera tan pocas es el alto valor de las capturas neutrónicas del hidrógeno, que claramente indicaba una situación supermoderada, por el exceso de agua líquida señalada en el párrafo precedente. También influyó en esto el alto quemado del combustible y el transitorio de xenon.

D. Las violaciones 4, 5 y 6 [1] se refieren a bloqueos del sistema de protección del reactor, efectuados por los operadores. El scram automático, por ejemplo, estaba cancelado. Cuando se activó el famoso relé AZ-5, fué manualmente.

También se canceló el scram del reactor causado por apagado o desconexión de ambos turboalternadores. Si bien la violación nº 1 es de naturaleza física, que exige cierta formación neutrónica para su comprensión, éstas se refieren a cuestiones tan básicas de protección del reactor que mueven a escándalo. Ahora bien: ¿Cómo es posible diseñar un reactor donde los operadores pueden desconectar todos y cada uno de los sistemas automáticos de scram?

E. A las 1h 23min 04 seg (hora local) del 26 de abril de 1.986, se inició el experimento mediante el cierre de las válvulas de vapor de la admisión del único turboalternador que estaba funcionando. El experimento falló, en tanto que las bombas de recirculación conectadas a este alternador perdieron potencia de bombeo en seguida. En la figura I [referencias 1 y 5] se muestra la evolución de las principales magnitudes del reactor durante el accidente.

F. Como consecuencia de la pérdida de presión de bombeo (las bombas estaban en paralelo, ver figura II) cae la presión del primario (pudo llegar a caer más de 5 atm) por lo que las bombas comienzan a cavitarse y, lo que es peor, el agua en el reactor comienza a hervir desde su base. Al estar en condiciones de supermoderación, al mismo tiempo que aumenta el porcentaje de burbujas (voids en la figura I) va aumentando la reactividad. Si el reactor hubiese estado submoderado, al comenzar a hervir el agua, la reactividad hubiera disminuido.

G. En la referencia [1] se declara enfáticamente que el accidente adquirió proporciones catastróficas por tener el reactor en ese momento un coeficiente positivo de huecos, lo que con mayor rigor académico habría que llamar reactor supermoderado.

H. A causa del aumento de potencia, y el consiguiente aumento de

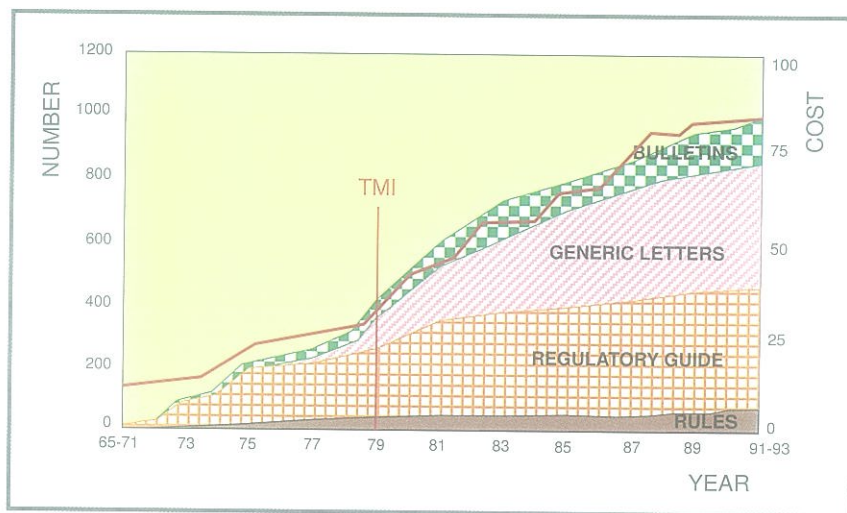
temperatura del combustible, el efecto Doppler apaga la primera subida de reactividad (que llega a 2\$), y la K del reactor es de nuevo menor que 1 a las 1h, 23 min. 44,5 seg. (Incidentalmente diremos que los operadores, asustados por la subida inicial de potencia, que no es nada comparada con lo que viene a continuación, por ser un suceso exponencial, habían pulsado cuatro segundos antes el AZ-5 para proceder al scram. Pero estas barras requieren casi 10 segundos para actuar en esos reactores, y mucho antes de ello habrá llegado la catástrofe).

I. La energía interna almacenada momentáneamente en el combustible (que tiene una difusividad térmica muy baja) es transferida al agua a través de la vaina. Por ser la potencia tan alta (el máximo del primer pico, ya apagado, es de 100 veces la potencia nominal) el agua hierve súbitamente y esa explosión de vapor expulsa del reactor el resto del agua líquida. Ello implica una inserción de reactividad de 3\$, sin más margen de actuación para el efecto Doppler, y tiene lugar el segundo y definitivo pico de potencia. En menos de medio segundo se alcanzan 480 veces la potencia nominal y se liberan en total más de 1 TJ de energía (10^{12} J), que provocan extraordinarias ondas de choque y la destrucción física del reactor y sus elementos circundantes, entre ellos la cubierta. El reactor se hace subcrítico como consecuencia de su descoyuntamiento, la caída del combustible al fondo de la vasija y la pérdida de una configuración geométrica adecuada para mantener la reacción en cadena. El reactor como tal ha dejado de funcionar.

REFLEXIONES Y PERSPECTIVA

Tras el accidente de Harrisburg (TMI-2) en 1979, el proceso normativo nuclear sufrió un verdadero terremoto, que tuvo efectos muy sentidos en toda la ingeniería nuclear occidental (como puede verse en cualquier análisis de la evolución de la sistemática reguladora en energía nuclear, p.e., figura IV, tomada de referencia 6).

A pesar de que TMI-2 no tuvo consecuencias ni lejanamente similares a Chernobyl, su impacto fué mayor en lo estrictamente relativo a las lecciones a aprender. Los fallos organizativos, de cultura de seguridad, de especificaciones técnicas, etc., que se ven por doquier en el origen del accidente de Chernobyl, son tan ajenos a la metodología nuclear occidental, que parecen



F IV- Evolución cuantitativa de la normativa nuclear occidental, fuertemente condicionada por el accidente TMI-2; no así por Chernobyl

no afectarnos. Temas como las consecuencias radiológicas, las reacciones y avisos internacionales urgentes tras los accidentes, etc., se tratan en artículos paralelos a éste, y no afectan estrictamente al reactor y su tecnología.

Lo que sí nos afecta a todos, pues los neutrones no distinguen entre oriente y occidente, es el hecho de que las leyes que gobiernan los procesos físicos tienen un valor incuestionable, y que su estricta observancia es condición sine qua non para una buena seguridad nuclear.

Desde esta perspectiva, Chernobyl no debería haber ocurrido nunca. Inapelablemente, ocurrió.

La comunidad de científicos y técnicos nucleares ni puede ni debe permitir que un desastre así vuelva a suceder. Tenemos bagaje de conocimientos suficiente para no estar a merced de acontecimientos tan injustificables como los que tuvieron lugar en Chernobyl-4 aquella noche de abril de 1986.

En España, el funcionamiento de las instalaciones nucleares ha sido ejemplar, en gran medida por el fuerte compromiso y la dedicación acertada de sus equipos de operación. Nuestro único accidente significativo fue un incendio provocado por un desgaste material difícilmente previsible y que, por afectar a una turbina, ha tenido precedentes muchísimo más graves en navíos de diversa índole, donde un incendio suele comportar numerosas víctimas; cosa que no ocurrió en Vandellós I, ni hubiera sido fácil que ocurriera, por la propia capacidad de la central ante las emergencias. Nuestro *factor humano* arroja una brillante hoja de servicios, y el reto fundamental de nuestra comunidad es acrecentar ese brillo, sin caer jamás en el conformismo.

Chernobyl fué, en esencia, un accidente de reactividad. Los dos componentes peligrosos de nuestra fuente de energía tienen nombres parecidos, si bien conceptualmente cada uno tenga su

significación: reactividad y radiactividad. Capacidad de multiplicación de la población neutrónica mediante reacciones nucleares; y potencialidad de algunos nucleidos de emitir radiaciones ionizantes. Desde la perspectiva de la Física y la Tecnología, Chernobyl no es una lección, sino un recordatorio: que en un reactor ambos conceptos están siempre presentes, y es nuestra obligación darles siempre el trato adecuado.

REFERENCIAS

- (1). "The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and Its Consequences", information compiled for the Experts'Mtg., August 25-29, 1986 Vienna, Austria, INIS-mf-10523, International Atomic Energy Agency (1986)
- (2). V.P.ANDREEV, A.V.BONDARENKO, V.K.VIKULOV, V.D.KOZYREV, F.M.KRASNOGOROV, V.F.LYUBCHENKO, V.V.MAL'TSEV, YU.I.MITYAEV, A.S.OVERSHKOV, E.I.SNITKO, A.G.SHEINKMAN, and S.V.SHIROKOV, "Steam Effects and Reactivity Coefficients of the Beloyark Nuclear Power Station Reactors", At. Energ., 50, 381 (1981)
- (3). I.YA.EMEL'YANOV, B.P.BASILIEVSKII, B.P.VOLKOV, P.A.GABRILOV, A.YA.KRAMEROV, S.P.KLUZNETZOV, E.P.KUNEGIN, and N.Z.RIVAROV, "The Safety Problems of Nuclear Power Plants with Channel-Type, Graphite, Boiling-Water-Reactors", Proc.Int.Conf.Nuclear Power and Its Fuel Cycles, Salzburg, Austria, May 2-13, 1977, Vol.5, paper CH-36/341, International Atomic Energy Agency (1977)
- (4). R.F.Mould, "Chernobyl. The real story". Pergamon Press (1988)
- (5). J.M.Martínez-Val, J.M.Aragónés, E.Minguez, M.Perlado, G.Velarde "An analysis of the physical causes of the Chernobyl accident". Nuclear Technology, Vol.90, 371-388 (1990)
- (6). M.T.Dominguez, J.M.Martínez-Val, "Nuclear regulations-towards requirements harmonization", International Journal of Global Energy Issues, Vol. 8, pp 152-168 (1995)

Nota: En las referencias 4 y 5 se encuentran otras muchas referencias sobre el accidente.