

Programas de desarrollo tecnológico en seguridad sísmica de centrales nucleares

A. Jiménez Juan, J. Sánchez Cabañero, F. Beltrán y A. Moreno

La generación de energía eléctrica con centrales nucleares es la principal tecnología energética europea de baja emisión de carbono. Además esta tecnología debe alcanzar elevados grados de seguridad ante eventos internos y externos, y debe limitar las emisiones peligrosas durante toda la vida de la instalación. Entre los eventos externos el sísmico juega un papel especialmente importante debido a su capacidad de iniciar un fallo de causa común o generar el fallo de algún componente necesario para la seguridad. Los recientes terremotos ocurridos en centrales nucleares por encima de su base de diseño han confirmado el elevado margen de seguridad de estas instalaciones, que ha envuelto las incertidumbres asociadas a la caracterización de los sucesos sísmicos. La comunidad técnica internacional ha venido realizando un gran esfuerzo por reducir estas incertidumbres, tanto en la definición de la acción sísmica como en el diseño de las plantas.

Con este objetivo se han lanzado múltiples programas de investigación aplicables a las nuevas y a las futuras instalaciones. Se trata de mantener y mejorar la seguridad de la operación de las centrales nucleares, aumentando su fiabilidad y mejorando la gestión de un hipotético accidente de origen sísmico, al tiempo que se minimizan sus consecuencias. Este artículo describe algunos de los programas recientemente desarrollados y en vías de desarrollo.

The generation of electricity with nuclear energy is the leading European low-carbon emission technology. Furthermore, this technology must achieve high levels of security against internal and external events, and must limit hazardous emissions throughout the life of the facility. Among the external events the seismic event play a particularly important role because of its ability to initiate a common cause failure or a failure to generate the necessary component for safety.

Recent earthquakes in nuclear power plants over the design bases have confirmed the high degree of safety of these facilities, which has engulfed the uncertainties related to the characterization of seismic events. The international technical community has been working hard to reduce these uncertainties, both in defining the seismic action in the design of plants.

With this objective have been launched multiple research programs applicable to new and future facilities. This is to maintain and improve the operational safety of nuclear power plants, increasing reliability and improving the management of a hypothetical accident of seismic origin, while minimizing its consequences. This article describes some of the recently developed programs and others with are in progress.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha reconocido, cada vez con mayor claridad, que la producción de energía debe ser un proceso sostenible, que evite poner en peligro el bienestar de las futuras generaciones no sólo reduciendo el uso de recursos naturales limitados, sino también minimizando los efectos perjudiciales sobre la salud y el entorno que los procesos de producción conllevan. En particular, la producción de energía eléctrica debe alcanzar elevados grados de seguridad ante sucesos internos y externos, y debe limitar las emisiones peligrosas durante toda la vida de operación de las instalaciones de generación.

Con estos objetivos en mente, se han dedicado ingentes esfuerzos a aumentar continuamente los niveles de seguridad de las plantas nucleares de generación de energía eléctrica. Se ha hecho un gran esfuerzo, tanto desde el punto de vista de los sucesos internos, es decir, generados por fallos de sistemas y componentes internos, como de los externos, tales como sismos, explosiones, inundaciones y huracanes. Este esfuerzo se ha traducido en unos desarrollos tecnológicos que, aplicados en las centrales nucleares, hacen que estas instalaciones se encuentren entre aquellas que permiten un mayor factor de utilización con un mínimo factor de riesgo asociado, tanto para el personal como para el medio ambiente.

ANTONIO M. JIMÉNEZ

es ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (UPM); actualmente responsable de Ciencias de la Tierra en el CSN. Acumula una experiencia profesional de casi 30 años repartida entre la empresa privada y la Administración Pública, en relación con el sector de generación y tecnología nuclear y en los ámbitos de proyecto civil, estudios de seguridad, APS de sucesos externos y proyectos de I&D. Mantiene una activa participación en el desarrollo de normativa nuclear y en proyectos internacionales (Unión Europea, OIEA, NEA-OCDE).

JOSÉ G. SÁNCHEZ CABAÑERO

es licenciado en Ciencias, Sección de Geológicas, UG 1975; y funcionario del cuerpo de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, adscrito al Área de Ciencias de la Tierra del CSN. Ha desarrollado su actividad profesional en INITEC y el CSN en el ámbito de la caracterización, evaluación e inspección de los parámetros geológicos, geotécnicos y sísmicos del emplazamiento de instalaciones nucleares, radiactivas y convencionales. Es delegado del CSN en el grupo de trabajo "Comportamiento Sísmico de Estructuras" de la Agencia de Energía Nuclear (OCDE); contacto español en la OIEA sobre Análisis Probabilista de Sucesos Externos; vocal de la Asociación Española de Ingeniería Sísmica en la Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes; y miembro del grupo de trabajo de la norma NCSE-02 vigente.

FRANCISCO BELTRÁN

es doctor ingeniero de Caminos por la Universidad Politécnica de Madrid y especialista en ingeniería sísmica aplicada a instalaciones nucleares. Ha dirigido las evaluaciones de márgenes sísmicos las CC.NN. de Vandellós II, Cofrentes y Trillo y ha sido consultor de C.N. Santa María de Garoña en el mismo tema. En la actualidad desarrolla su actividad profesional en IDOM, desde donde asesora a la agencia europea de fusión (F4E) en el diseño sísmico de los edificios de clase nuclear del proyecto ITER.

ANTONIO MORENO GONZÁLEZ

es doctor ingeniero de Caminos por la UPM de Madrid, Licenciado en Ciencias Físicas por la U. Complutense de Madrid y Master en Energía Nuclear por el CIEMAT. Ha prestado sus servicios en el CIEMAT, Empresarios Agrupados y actualmente en IDOM. Es profesor asociado en la UPM. Su trayectoria profesional como ingeniero mecánico y estructural en el sector nuclear. Ha participado en diversos proyectos de ingeniería en todas las centrales nucleares españolas y es autor de múltiples publicaciones técnicas.

El planteamiento anterior ha llevado a la comunidad técnica nuclear a desarrollar un enorme trabajo en relación con los eventos naturales, tales como terremotos, huracanes e inundaciones, y con otros sucesos externos no naturales, como los impactos de avión; siempre con el objetivo de mitigar los riesgos asociados para la salud y el entorno. Esta actividad ha sido dinamizada por la ocurrencia de tales fenómenos en las últimas décadas. Hay que mencionar las inundaciones en Francia y Finlandia, los tsunamis en el Índico y los sismos severos en Japón, que han puesto a prueba la seguridad de las instalaciones nucleares y las opciones de reacción de sus operadores. La ocurrencia de estos fenómenos ha demostrado la seguridad de las metodologías de diseño para afrontarlas y, en consecuencia, la seguridad de las plantas actuales ante los mismos. También ha contribuido a identificar con mayor precisión los parámetros críticos a tener en cuenta en el diseño y a disminuir las incertidumbres asociadas.

Entre todos los eventos mencionados, los terremotos juegan un papel especialmente importante, como lo demuestran las evaluaciones probabilistas del riesgo desarrolladas en todo el mundo. Ello es debido a su específica capacidad de iniciar un fallo, o varios simultáneos de causa común, y al mismo tiempo haber producido la rotura de algún componente necesario para mitigar las consecuencias del propio fallo. Por otro lado, hay una cierta incertidumbre asociada a la definición del sismo que podría ocurrir en un emplazamiento y, también, al comportamiento en caso de sismo de estructuras, sistemas y componentes. Dichas incertidumbres han tenido como consecuencia el elevado margen de seguridad en el diseño de las plantas existentes.

La seguridad sísmica de las instalaciones nucleares es un tema que ha recibido especial atención por todos los organismos reguladores. Se han desarrollado numerosas guías, normas y recomendaciones para aplicar en todas las fases de un proyecto, desde la selección del emplazamiento hasta el montaje y puesta en marcha, pasando por el diseño y la construcción.

En este artículo se describen brevemente los programas internacionales sobre aspectos sísmicos y sobre otros sucesos externos en los que IDOM y el CSN han venido participando, sus objetivos y las conclusiones extraídas. Algunos

de estos programas ya han finalizado, como el de relevancia para la seguridad nuclear de los terremotos de campo cercano (IAEA-NFE) y la primera parte del proyecto relacionado con la predicción de la respuesta sísmica de edificios sometidos a torsión (CEA-SMART 2008); otros están actualmente en ejecución, como la segunda fase del programa SMART 2008 y el proyecto de reevaluación de la seguridad sísmica de centrales en operación (IAEA-Seismic EBP KARISMA); y otros están en fase de definición, como el proyecto de mitigación del riesgo sísmico y de otros sucesos externos en reactores de Generación IV (FP7-SERIM.G4).

RELEVANCIA PARA LA SEGURIDAD DE LOS TERREMOTOS DE CAMPO CERCANO

Planteamiento

El proyecto de IAEA sobre la importancia para la seguridad de los sismos de campo cercano (NFE) se desarrolló entre 2002 y 2006 como un programa de investigación coordinada (CRP). En dicho programa participaron más de veinte grupos de investigadores, procedentes de 17 países de todo el mundo.

El movimiento sísmico en las proximidades del epicentro, es decir, a menos de 15 a 30 km, tiene unas características que lo diferencian del movimiento que se produce a mayores distancias. El movimiento está mucho más relacionado con el mecanismo focal, es muy direccional y ocasiona en general fuertes aceleraciones con una duración muy corta. Se podría decir que el movimiento se parece más al ocasionado por una onda de choque ("shock"), que se produciría cuando la velocidad de propagación de la rotura en el terreno se asemeja a la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

Los métodos tradicionales de cálculo sísmico, basados en las aceleraciones de pico del terreno, tienden a sobrestimar los efectos de los terremotos de campo cercano (NFE). Conscientes de este hecho, el objetivo del programa fue la valoración de los métodos disponibles para el diseño sísmico de estructuras con paredes de cortante y de su idoneidad cuando las acciones sísmicas son causadas por un sismo próximo.

El Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) francés puso a disposición de los participantes en el programa los resultados del experimento CAMUS, llevado a cabo en mesa vibrante sobre un modelo a escala 1:3 de un edificio con estructura a base de muros de cortante (figura 1). En el experimento, el modelo fue sometido a terremotos artificiales de nivel creciente, hasta producir la rotura del espécimen. Los terremotos artificiales tenían duraciones y contenidos de frecuencia que correspondían tanto a terremotos de "campo lejano" (banda ancha) como de "campo cercano" ("shock").

En la primera parte del CRP se pidió a los participantes realizar la simulación de la respuesta del espécimen empleando diferentes técnicas y metodologías, para luego comparar las predicciones con la respuesta real en el ensayo. El objetivo era valorar la capacidad de predicción de cada procedimiento de cálculo. Se utilizaron procedimientos de espectro de respuesta, de integración directa en el tiempo, con comportamiento lineal y no lineal del material, y procedimientos cuasiestáticos del tipo "push-over".

En la tabla 1 se indican los niveles de carga sísmica evaluados en esta primera fase del proyecto.

La segunda parte del CRP se dedicó a analizar las respuestas obtenidas con sismos reales de campo próximo suministradas por Japón. Se pidió a los participantes el análisis con dos inputs diferentes del modelo a escala del experimento CAMUS. Los inputs utilizados se corresponden con el sismo de Ito Oki, que se consideró representativo del sismo de campo cercano.

Con el objeto de investigar los efectos del comportamiento no lineal del hormigón en la generación de espectros de respuesta de piso se llevó a cabo la tercera parte del CRP. En esta fase los participantes obtuvieron espectros de respuesta de piso con diversos inputs sísmicos. Se utiliza-

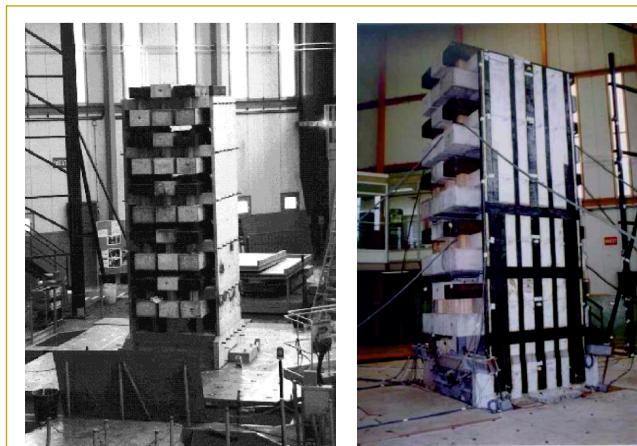


Figura 1. Modelo de edificio a escala empleado en el experimento CAMUS.

Tipo de sismo	Nice (banda ancha)	San Francisco (sock)	San Francisco (sock)	Nice (banda ancha)	Nice (banda ancha)
Aceleración máxima	0.24 g	0.13 g	1.11 g	0.41 g	0.72 g

Tabla 1. Niveles de terremoto empleados en el experimento CAMUS.

ron los registros del terremoto de Gas-ho Dam, también de campo cercano.

Conclusiones generales

En general, los resultados obtenidos por todas las organizaciones participantes indican una gran dificultad en conseguir que los resultados numéricos reproduzcan los experimentales, especialmente en las fases inmediatamente previas a la rotura. Esto es debido a la complejidad de los fenómenos relacionados con el agrietamiento y la localización de la deformación en unos pocos puntos de la estructura. Por lo tanto, se recomienda efectuar estudios de sensibilidad con objeto de tener en cuenta las incertidumbres asociadas a los modelos.

Los modelos de cálculo deben mantenerse tan sencillos como sea posible, ya que los modelos complejos no garantizan un mejor resultado. En cualquier caso, los procedimientos de diseño deben seguir siendo conservadores para cubrir las incertidumbres en el input sísmico, en la interacción suelo estructura y en el comportamiento dinámico de las estructuras.

Para un mismo nivel de aceleración máxima, los sismos de campo cercano tienen menos capacidad de daño sobre las estructuras. Es muy conservador utilizar para el diseño un espectro de banda ancha escalándolo al nivel de máxima aceleración del terreno ocasionado por un sismo de campo cercano.

Los procedimientos de cálculo basados en desplazamientos, tipo “push over”, son muy utilizados en el diseño y comprobación de estructuras convencionales, para las que se admite un cier-

to nivel de daño sísmico. Sin embargo, estos procedimientos son casi desconocidos en la práctica nuclear. Es posible que esta clase de procedimientos se adapte bien al estudio de los efectos de terremotos de campo cercano y que sea necesario regular su aplicación mediante una normativa específicamente nuclear.

Los espectros de piso son muy sensibles a cambios en la rigidez de los elementos estructurales ocasionados por la fisuración. Una pequeña fisuración, compatible con deformaciones en el acero de armar inferiores al 1% puede ocasionar variaciones en los picos de los espectros que no quedarían cubiertas por la técnica habitual de ensanchar los picos un $\pm 15\%$.

RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICIOS SOMETIDOS A TORSIÓN (CEA-SMART 2008)

Planteamiento

Este proyecto ha sido promovido por el CEA, aunque ha contado desde el principio con el apoyo de la OECD y la IAEA. Su objetivo es investigar la respuesta sísmica de edificios de hormigón armado en los que el centro de rigidez se encuentra muy alejado del centro de masas y, por tanto, experimentan efectos de marcado carácter tridimensional debidos a la torsión de eje vertical de la estructura. En el proyecto participan 43 organizaciones de todo el mundo.

En una primera fase se pidió a los participantes que predijeran la respuesta de un modelo a escala 1:4 de un edificio muy asimétrico de hormigón armado a base de muros, losas, vigas y pilares (fi-

gura 2). Tras el ensayo del modelo a escala en mesa vibrante, las predicciones fueron comparadas con los resultados del ensayo. Con ello se pretende efectuar una calibración de las herramientas utilizadas en el cálculo estructural lineal y no lineal.

En una segunda fase, los participantes deben modificar sus modelos de cálculo para ajustarlos a los resultados de los ensayos. Para ello se analizan los resultados obtenidos con diversos niveles de excitación con objeto de cuantificar la variabilidad de la respuesta estructural asociada a las incertidumbres sobre los parámetros de partida y desarrollar métodos de obtención de curvas de fragilidad.

La primera fase del proyecto se desarrolló entre 2007 y 2009. La segunda fase finalizará en 2010.

Dentro del proyecto, la predicción se lleva a cabo en dos frentes, el que utiliza los métodos lineales convencionales y el que utiliza métodos no lineales para obtener la mejor estimación del comportamiento.

Conclusiones generales

Las conclusiones finales están pendientes de que se complete la segunda fase del proyecto. Sin embargo, como resultado de la primera fase, destaca la variabilidad de hipótesis de cálculo empleadas por los participantes, lo que sugiere la falta de una práctica internacional común para analizar esta clase de estructuras. A nivel normativo, se requiere definir reglas para describir adecuadamente los datos de partida en función de la estructura a estudiar y se señala la importancia de cuantificar la variabilidad de los datos de partida y las incertidumbres y sensibilidades de los modelos de cálculo.

En general, los modelos de cálculo empleados por los participantes muestran una buena identificación de los modos de vibración de la estructura, a pesar del carácter tridimensional de los mismos. Como era de esperar, los modos de menor frecuencia se encuentran mejor representados que los de frecuencias altas.

Igual que en el caso del proyecto anterior (NFE), se ha demostrado la capacidad de los modelos de cálculo actuales para tener en cuenta el daño asociado a la fisuración, aunque hay una dificultad creciente en la representación

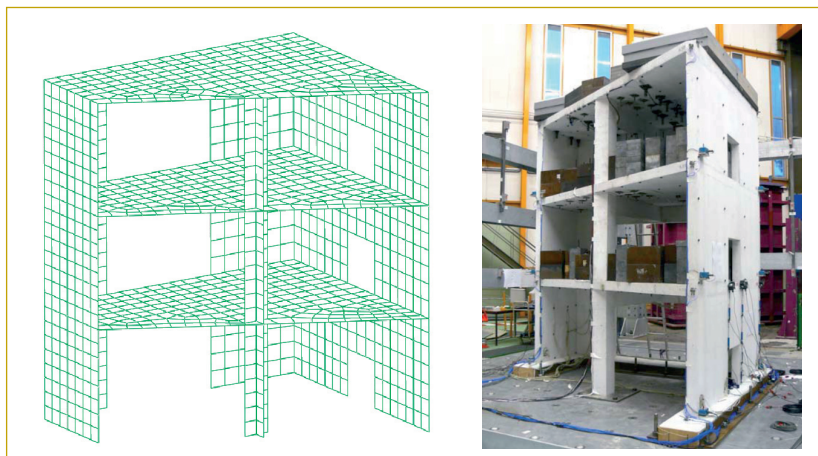


Figura 2. Modelo numérico y modelo a escala 1:4 construido sobre la mesa vibrante.

del comportamiento estructural cuando la carga sísmica se sitúa por encima de la de diseño.

También se ha confirmado que los espectros de piso son muy sensibles a cambios en la rigidez de los elementos estructurales ocasionados por la fisuración, produciendo un desplazamiento muy significativo de los picos hacia el lado de las frecuencias bajas. Este desplazamiento no queda necesariamente cubierto por la técnica habitual de ensanchar los picos un $\pm 15\%$.

REVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD SÍSMICA DE CENTRALES EN OPERACIÓN

Planteamiento

De acuerdo con los requisitos de la normativa de seguridad aplicable, las centrales nucleares han sido diseñadas para resistir suficientemente los efectos de fenómenos naturales extremos que pudieran ocurrir en su emplazamiento; de modo que las estructuras, sistemas, equipos y componentes que sean importantes para la seguridad de la central puedan seguir realizando sus funciones incluso en caso de que ocurran esos fenómenos. El terremoto es entre los sucesos externos el que presenta una mayor contribución en la valoración probabilista del riesgo global de una central y constituye, por tanto, el principal elemento de las bases de diseño asociadas a los fenómenos naturales extremos.

Como base de diseño sísmico en centrales nucleares, el terremoto se contempla con dos niveles de severidad diferentes: un nivel máximo a efectos de seguridad, que es realmente el 'terremoto base de diseño' (suele denominarse SSE, o Safe Shutdown Earthquake), y otro nivel más reducido a efectos del funcionamiento de la central, que constituye el 'terremoto base de operación' (OBE, Operating Basis Earthquake).

El terremoto base de diseño (SSE) es el máximo que podría ocurrir razonablemente en un determinado emplazamiento; tiene una probabilidad muy baja de ser excedido durante toda la vida de la central y se asocia a los máximos requisitos de seguridad. Si llegara a suceder este terremoto se seguiría conservando la integridad de la barrera de presión del refrigerante del reactor; la capacidad de parar el reactor y mantenerlo en parada segura, y la capacidad de prevenir o mitigar accidentes que pudieran provocar liberación incontrolada de efluentes radiactivos.

Por su parte, el terremoto base de operación (OBE) es menos severo que el SSE y de ocurrencia más probable.

Se considera que este sismo puede ocurrir en la central a lo largo de su vida operativa y se asocia a los requisitos de seguridad exigibles para que la central nuclear pueda seguir en funcionamiento; ya que el OBE debe ser resistido por todos los elementos que la central necesita para continuar su operación normal sin riesgo indebido. Si llegara a excederse el OBE, la central no podría seguir funcionando y el reactor tendría que llevarse a parada segura de forma ordenada, siguiendo los procedimientos de actuación establecidos en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de cada central nuclear. Con el fin de registrar cualquier movimiento sísmico significativo que se detecte en el emplazamiento y poder así compararlo con los terremotos de diseño antes citados (OBE y SSE), las centrales nucleares disponen de programas operativos de vigilancia sísmica, dotados con instrumentación de alta precisión instalada en campo libre y también en el interior de los edificios principales, para valorar su respuesta.

Aunque los estudios de evaluación para caracterizar los terremotos de diseño son muy rigurosos y abarcan en su alcance el conocimiento disponible en todas las disciplinas relacionadas, desde la geología y sismotectónica hasta la ingeniería sísmica y el análisis probabilista de la peligrosidad sísmica, los resultados finales están siempre condicionados por las incertidumbres asociadas al estado actual del conocimiento. De hecho, se han registrado en los últimos años y en distintos países importantes terremotos en emplazamientos de centrales nucleares, que han producido daños significativos y que han llegado a exceder las bases de diseño sísmico de alguna central, teniendo consecuencias de seguridad en relación con los mecanismos de parada o disparo y con la respuesta global de la central ante un suceso sísmico extremo.

Entre los casos significativos más recientes de centrales nucleares afectadas por terremotos próximos a sus bases de diseño sísmico, o incluso superiores, se recuerdan el terremoto de Spitak en Armenia (1988), que afectó al emplazamiento de ANPP con cuatro unidades nucleares; el terremoto de Muzaffarabad en Pakistán (2005), que impactó en la central de Chashma; el de Miyagi-Ken en Japón (2005), que alcanzó la central de Onagawa, y los otros terremotos japoneses de Kobe (1995) y Chuetsu (2004 y 2007, en la región de Niigata). Pero el de mayor impacto en el mundo nuclear ha sido el reciente de Niigataken Chuetsu-Oki (2007), ocurrido muy próximo a Kashiwazaki-Kariwa en Japón y que afectó a las

siete unidades nucleares allí instaladas, todas ellas paradas como consecuencia de un sismo que superó ampliamente las bases de diseño.

Con las experiencias acumuladas a lo largo del tiempo, el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) ha prestado particular interés a la seguridad sísmica de centrales nucleares en funcionamiento, constatando hechos relevantes, a saber: la elevada contribución del suceso sísmico en la frecuencia de daño al núcleo; el registro de aceleraciones del orden de 1g y mayores en zonas próximas a fallas; el mayor conocimiento del riesgo sísmico asociado a los emplazamientos, cuyos nuevos estudios probabilistas de peligrosidad sísmica han obtenido resultados incluso mayores que las bases de diseño originales; la evolución de las técnicas de diseño y de las prácticas de análisis y revaluación sísmica, que no siempre coinciden en su metodología; la extensión de vida prevista en el parque de centrales, que obliga a considerar los efectos del envejecimiento en la capacidad de respuesta sísmica.

Todas estas realidades han impulsado a la IAEA a promover el desarrollo de un gran programa internacional específicamente dedicado a la seguridad sísmica en centrales nucleares ya construidas. El programa se lanzó a finales de 2007 y por un periodo de tres años, todavía en curso. En él participan una veintena de países a través de más de cuarenta entidades, instituciones y organismos propios, públicos y privados. Por parte española intervienen el Consejo de Seguridad Nuclear y la Ingeniería IDOM Internacional.

El programa en desarrollo se denomina "Extrabudgetary Project on Seismic Safety of Existing Nuclear Power Plants" (abreviadamente Seismic EBP). Su objetivo primordial es investigar, en el ámbito mundial, los métodos disponibles y las prácticas de ingeniería que se emplean para resolver cuestiones de seguridad sísmica en relación con el diseño y la operación de centrales nucleares ya existentes. También es objetivo del programa proporcionar, a los estados miembros que participan, el asesoramiento preciso para aplicaciones prácticas específicas.

El alcance global del programa se ha estructurado en cinco grandes áreas de trabajo, cuyas líneas básicas de desarrollo se recogen en el esquema de la tabla 2 y cuyo contenido temático se resume a continuación.

- Área 1: Revisión de la peligrosidad sísmica originalmente valorada.

La experiencia adquirida en la IAEA durante los últimos veinte años al revala-

luar la peligrosidad en diversas centrales nucleares, ha enseñado que en todos los casos la nueva peligrosidad sísmica obtenida resultó mayor que la inicialmente determinada para el diseño original de la central. En la evaluación probabilista de la peligrosidad sísmica (PSHA) han surgido grandes cuestiones sin consenso a raíz de las diversas metodologías empleadas, como es el caso del tratamiento de incertidumbres o la aplicación del juicio de expertos. Existen importantes discrepancias entre la peligrosidad sísmica calculada específicamente en algunos emplazamientos nucleares y la aportada por recientes mapas de peligrosidad publicados con carácter regional o nacional. Por tanto, las actividades desarrolladas se han orientado al análisis de experiencias en PSHA, a la investigación de nuevos parámetros de escala para establecer leyes de atenuación sísmica en relación con el daño potencial y al desarrollo de modelos avanzados en el entorno próximo de las fallas.

- Área 2: Revaluación de la seguridad sísmica en centrales nucleares ya existentes.

Se agrupan aquí las actividades relacionadas con criterios aplicados para la revaluación de la seguridad sísmica; métodos deterministas y probabilistas; cálculo de curvas de fragilidad y del HCLPF para componentes, sistemas y estructuras; efectos del envejecimiento en la respuesta sísmica y en la capacidad resistente de los distintos elementos de una central nuclear.

Forma parte de esta área de trabajo la actividad singular 'KARISMA Benchmark'. Esta actividad se centra en el análisis estructural del Edificio del

Reactor de la Unidad 7, incluyendo el efecto de interacción suelo estructura y el análisis de sistemas de la planta tales como el sistema RHR, tanques exteriores y piscina de combustible. Todo ello utilizando los planos de construcción y los registros reales del sismo. El objetivo es identificar los márgenes reales de todos estos elementos frente al evento sísmico real.

- Área 3: Respuesta operativa en una central nuclear tras un terremoto.

Se dedica al análisis de actuaciones realizadas en una central caso de suceder un terremoto, abarcando desde la verificación de excedencia de las bases de diseño sísmico hasta el establecimiento de planes operativos adecuados para su puesta en marcha tras un terremoto. Las líneas de desarrollo incluyen: tendencias recientes en la actuaciones post-terremoto; umbrales de disparo y lógica de actuación en los sistemas automáticos de parada; indicadores de daño adecuados para valorar la situación tras un sismo; evaluación rápida y programada de la respuesta de una central ya parada ante su posible nuevo arranque.

- Área 4: Bancos de Datos de experiencia sísmica.

El desarrollo propio del proyecto ha requerido la organización de bases de datos específicas que ayuden al avance del conjunto de actividades y faciliten la propia gestión del proyecto. Se necesitaba agilizar la comunicación y seguimiento de actividades entre los participantes, la consulta de documentos generados y la transmisión masiva de información entre los interesados. Ejemplos claro de ello han sido la recopilación de datos

a gran escala en plantas que han sufrido terremotos o el propio 'KARISMA Benchmark'.

Conclusiones generales del proyecto

Este proyecto de evaluación sísmica en condiciones reales está resultando, en su conjunto, un instrumento excelente para impulsar la colaboración internacional científica y técnica aplicada a la seguridad sísmica de centrales nucleares; así como para debatir e integrar experiencias, opiniones y puntos de vista tanto de organismos reguladores y entidades explotadoras de las centrales, como de ingenierías consultoras y centros de investigación.

Los resultados que se van obteniendo en el desarrollo del proyecto están sirviendo como referencia y soporte para la aplicación detallada de recomendaciones de las guías existentes de la IAEA sobre estas materias. También se usan los resultados para enfocar adecuadamente la revisión de algunos documentos normativos en el marco regulador actual de la IAEA; de hecho ya se han elaborado nuevas guías, como la NS-G-2.13 (seismic safety) o la revisión de la NS-G-3.3 (seismic hazards) y estudios técnicos (Safety Report on earthquake preparedness and plant response).

MITIGACIÓN DEL RIESGO EN REACTORES DE GENERACIÓN IV

En septiembre de 2007 se lanzó en Bruselas la plataforma tecnológica de energía nuclear sostenible, a través de la cual la comunidad europea de investigación en fisión nuclear unió sus esfuerzos con la idea elaborar una Agenda de

GRANDES ÁREAS	LÍNEAS DE TRABAJO
Área 1: Peligrosidad sísmica	Tarea 1: Experiencias y realizaciones de PSHA en los estados miembros Tarea 2: Comparación de resultados entre los recientes PSHA Tarea 3: Parámetros alternativos de escala en leyes de atenuación de terremotos Tarea 4: Modelos de propagación en la proximidad de fallas Tarea 5: Métodos avanzados en geodinámica para analizar la peligrosidad
Área 2: Revaluación de la seguridad sísmica en CC.NN.	Tarea 1: Metodología para la revaluación sísmica y mejora del comportamiento Tarea 2: Comparación entre la respuesta real y la calculada analíticamente Tarea 3: Modelación de estructuras, sistemas y componentes para reevaluación Tarea 4: Evaluación general de la seguridad y criterios aplicados Tarea 5: Envejecimiento
Área 3: Actuaciones post-terremoto	Tarea 1: Sistemas de disparo, criterios de parada, experiencias ante terremotos Tarea 2: Criterios para el re-arranque tras una parada debida a un terremoto Tarea 3: Optimización de la función de disparo por causa sísmica
Área 4: Bancos de datos	Tarea 1: Diseño e implantación de la infraestructura tecnológica (Database IT) Tarea 2: Diseño de Bases de Datos específicas Tarea 3: Implantación de las Bases de Datos específicas Tarea 4: Recopilación de datos en plantas que han sufrido un terremoto (Survey)
Área 5: Aprendizaje de experiencias	Tarea 1: Sesión especial sobre el terremoto NCO de Japón y la central K-K Tarea 2: Visita al emplazamiento de la central K-K y recorrido de planta

Tabla 2: Áreas de actividad y líneas de trabajo en el proyecto "Seismic EBP" (IAEA).

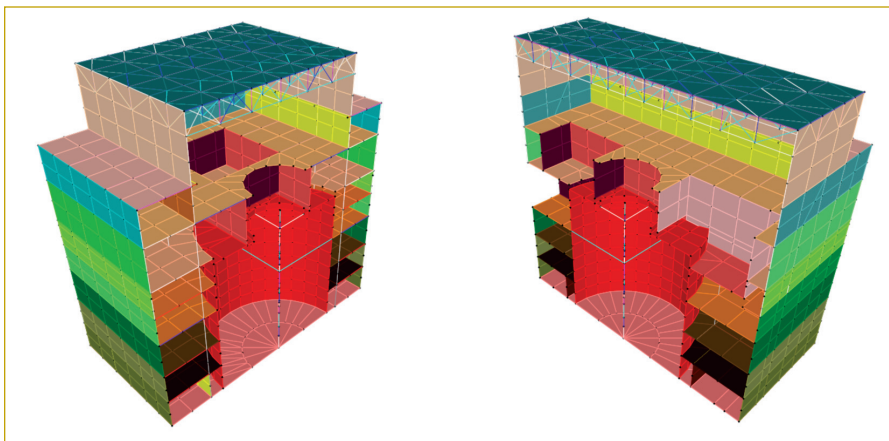


Figura 3: Modelo del Edificio del Reactor: Unidad 7 Kashiwazaki-Kariwa

Investigación Estratégica. El objetivo principal de la Agenda es identificar planes de desarrollo de las tecnologías de fisión que sirvan para apoyar la toma de decisiones y para orientar las actividades de la comunidad científica, teniendo en cuenta que la energía nuclear es la principal tecnología energética europea de baja emisión de carbono.

La Agenda se centra en las siguientes áreas:

- La Generación II y III de reactores de agua ligera, actualmente en operación. Estos diseños, han contribuido a satisfacer los objetivos de la política energética europea; habiendo tenido, los reactores europeos, un historial extraordinario de seguridad y de bajo coste de la electricidad.
- La innovadora Generación IV de reactores rápidos con ciclo cerrado, que ofrecen un importante mejora en la sostenibilidad. Suministrarán de 50 a 1000 veces más electricidad con la misma cantidad de uranio que los diseños actuales, permitiendo así que las reservas naturales se prolonguen durante miles de años. Además, con el ciclo avanzado y las nuevas técnicas de reciclado (partición y transmutación) producirán una cantidad significativamente menor de residuos, reduciendo por tanto su impacto ambiental.
- La nueva Generación IV de reactores de alta temperatura, que generarán energía térmica para la producción de hidrógeno y para otros procesos industriales, tales como la desalinización.

Centrando las actividades en los sistemas de neutrones rápidos, los responsables europeos han dirigido sus esfuerzos en dos direcciones preferentes: el reactor de neutrones rápidos refrigerado por sodio (SFR) y su tecnología paralela de refrigeración por plomo o gas (LFR y ADS).

Es por tanto claro que es necesario realizar un gran esfuerzo en dichas tecnologías en el marco de la Generación IV para mantener y mejorar la seguridad y la fiabilidad de su operación, mejorando la gestión del accidente y minimizando sus consecuencias.

Los reactores de la Generación IV deben ser muy seguros y deben estar diseñados para soportar cargas debidas a eventos externos tales como sismos, inundaciones, tornados impactos de avión e incendios e incluso ataques terroristas. Los nuevos diseños plantean la necesidad de actualizar los principios de seguridad.

La aproximación tradicional a las bases de diseño en estos campos se basa en juicios técnicos. Se define así el Accidente Base de Diseño. Sin embargo, en el nuevo contexto se necesita desarrollar nuevas metodologías de seguridad que incluyan la consideración formal del riesgo que den respuesta a la prevención y mitigación de las condiciones de accidente y de sus posibles iniciadores.

De hecho, se piensa que mediante metodologías rigurosas, es posible realizar análisis de riesgos que permitan obtener datos para proponer soluciones adecuadas a los distintos sistemas de la instalación y permitir al diseñador identificar sistemas de protección.

Con los objetivos indicados se ha propuesto el proyecto de investigación y desarrollo SERM-G4.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- Identificación de las características principales de los conceptos de los diseños de LFR, ADS y SFR que sean relevantes para la seguridad y para la evaluación de los riesgos asociados a los eventos externos.
- Evaluación del comportamiento de los sistemas seleccionados en caso de accidente severo.

- Identificación de estrategias de mitigación y de diseño de componentes adecuados del reactor.
- Evaluación de los beneficios económicos debidos a la utilización de medidas para reducir el daño en el reactor debido a eventos externos.
- Transferencia del conocimiento obtenido con las metodologías avanzadas de mitigación del riesgo a las tecnologías existentes (Generación III).

Las actividades se organizan en cinco paquetes técnicos de trabajo y en dos paquetes adicionales de gestión y distribución de la información.

PT 2: Requisitos de modelización. Se definirán los requisitos de modelización del sistema del reactor sobre los que se efectuara su evaluación del comportamiento. Incluirá también la definición del input sísmico de diseño así como los detalles de diseño disponibles de distintos elementos: vasijas, generadores de vapor, líneas de tuberías.

PT 3: Modelización numérica de sistemas preseleccionados de distintos diseños de reactor (SFR, LFR, ADS). Desarrollo de modelos del comportamiento de las piscinas de metal líquido, modelos detallados de componentes críticos ante la carga sísmica, modelos de aisladores sísmicos a utilizar en los diferentes sistemas de reactor.

PT 4: Desarrollo y caracterización de aisladores sísmicos. Se efectuara el desarrollo, diseño y fabricación de sistemas de aislamiento sísmico. Incluyendo soportes de goma de elevado amortiguamiento y deslizadores de superficie curva.

PT 5: Diseño de componentes críticos. Se seleccionaran los componentes especialmente críticos a la carga sísmica además de juntas de expansión para acomodar desplazamientos sísmicos y las losas de cimentación y de soportado del aislamiento sísmico.

PT 6: Análisis de los eventos externos sobre los sistemas de aislamiento del reactor. Se incluirán cargas de viento, impacto de avión inundaciones e incendio.

PT 7: Recomendaciones para la normalización. Se pretende desarrollar recomendaciones tendentes a reducir el riesgo debido a eventos externos. Se prestará atención a las mejoras económicas derivadas de la mitigación del riesgo de fallo ante dichos eventos.

El interés del proyecto esta refrendado por la participación en el mismo de 10 países y 20 instituciones empresariales y públicas de la Unión Europea.

CONCLUSIONES

La experiencia adquirida en el diseño y explotación de centrales nucleares en el mundo ha permitido valorar la seguridad, eficiencia y economía de dichas instalaciones. Por otro lado, la creciente demanda energética del planeta plantea la necesidad de desarrollo de nuevos sistemas de generación nuclear, que deben satisfacer los requisitos de cualquier nueva tecnología: sostenibilidad y ausencia de daño al entorno.

El planteamiento anterior implica que al reto de desarrollar las nuevas tecnologías se suma el de diseñar con una minimización del riesgo. Los eventos externos suponen las mayores exigencias sobre los sistemas de control y operación de las instalaciones, siendo el evento sísmico uno de los dominantes y el que más contribuye en la valoración probabilista de la frecuencia de daño al núcleo del reactor.

Este hecho ha impulsado a la comunidad técnica internacional, tanto reguladores como propietarios y suministradores, a emplear grandes recursos en evaluar el comportamiento de los sistemas y componentes de las centrales nucleares ante estos eventos. El objetivo es aumentar la seguridad y reducir los riesgos, optimizando los diseños a través de

un mejor conocimiento de la operación de los sistemas y de la magnitud de las acciones externas. No puede olvidarse que, aunque el nivel de conocimiento progresa claramente con el tiempo, las incertidumbres en la caracterización de los sucesos sísmicos no desaparecen, sino que a veces incluso crecen. Lo importante es conocerlas y acotarlas en rangos de confianza, lo más cortos y razonables posible.

La numerosa participación en los diferentes proyectos de desarrollo descritos en este artículo pone de manifiesto el interés de la comunidad técnica en desarrollar metodologías y conocimientos que garanticen el alcanzar los objetivos que se persiguen de seguridad y minimización de daños al entorno.

REFERENCIAS

- Safety Significance of a Type of Seismic Input Motions and Consequences on Nuclear Industry Practice. Results of the IAEA Coordinated Research Project on "Safety Significance of Near-Field Earthquakes". IAEA-TECDOC 2006
- Safety Significance of Near Field Earthquakes. SN169 IDOM 2005
- A 3 story building with 3D and non-linear effects Earthquake blind prediction contest and fragility assessment. CEA 2008
- Presentation of the blind prediction contest. Project SMART 2008. SEMT/EMSI/PT/07-003/A
- Results of the blind prediction. SMART -2008. SN-256 IDOM 2009
- IAEA Preliminary Findings and lessons learned from the 16 July 2007 earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP" Mission Report 2007
- IAEA Follow-Up IAEA Mission in relation to the findings and lessons learned from the 16 July 2007 earthquake at Kashiwazaki-Kariwa. report to the government of Japan. 2008.
- Kashiwazaki-kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment "KARISMA Benchmark". Guidance document. Diciembre 2009.
- Seismic and other External Risks Mitigation in GEN-IV reactors. SERIM-G4 Project Proposal 2010, for SNE-TP-Strategic Research Agenda.■

CONVOCATORIAS 2010

Congresos, Cursos y Reuniones

12-18 JULIO CIUDAD DEL CABO, SUDÁFRICA	IYNC 2010 INTERNATIONAL YOUTH NUCLEAR CONGRESS IYNC www.iync.org
25 AGOSTO-3 SEPTIEMBRE CADARACHE, FRANCIA	FRÉDÉRIC JOLIOT / OTTO HAHN SUMMER SCHOOL ON NUCLEAR REACTORS: PHYSICS, FUELS AND SYSTEMS CEA, KIT www.fjohss.es
20 SEPTIEMBRE VALENCIA, ESPAÑA	ESPECIALISTA PROFESIONAL EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN INSTALACIONES RADIATIVAS Y NUCLEARES. ESPECIALISTA UNIVERSITARIO EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN INSTALACIONES RADIATIVAS Y NUCLEARES UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA y TITANIA http://especialistapr.blogs.upv.es especialistapr@upv.es
20 SEPTIEMBRE – 3 DICIEMBRE SACLAY, FRANCIA	2010 INTERNATIONAL SCHOOL IN NUCLEAR ENGINEERING CEA, INSTN, ENEN http://www-instn.cea.fr
6-8 OCTUBRE SANTIAGO DE COMPOSTELA, ESPAÑA	36ª REUNIÓN ANUAL DE LA SOCIEDAD NUCLEAR ESPAÑOLA SNE http://www.reunionanualsne.es/
2 – 3 NOVIEMBRE PENRITH, CUMBRIA, REINO UNIDO	UK DECOMMISSIONING & WASTE MANAGEMENT 2010 NUCLEAR INSTITUTE Info: http://ukdwm10.nuclearinst.com/ibis/ukdwm10/home