

## CONSIDERACIONES SÍSMICAS EN EL DISEÑO DE LAS CENTRALES NUCLEARES

Juan García-Monge (IE University. School of Architecture)

El proyecto de instalaciones nucleares en España, incluye entre otros requisitos, ha de justificar la capacidad para realizar las funciones de seguridad necesarias, durante y tras la ocurrencia de la máxima sollicitación sísmica esperada en el emplazamiento. Este criterio, aplicable a las centrales nucleares, es igualmente aplicable con sus requisitos específicos, a otras instalaciones nucleares como almacenes de residuos radiactivos.

La metodología seguida en la calificación sísmica de las instalaciones nucleares sigue las recomendaciones establecidas en la normativa de EE.UU. tanto por ser el país origen de la mayor parte de los suministradores principales del NSSS de las centrales españolas como por ser la más completa de las establecidas, habiendo sido adaptada a la normativa del OIEA y aceptada en todos los países.

En esta Nota Técnica se pretende una aproximación a los criterios seguidos en la calificación sísmica de las centrales nucleares en España.

### Terremotos de diseño. SSE y OBE

La capacidad sísmica de la planta debe justificarse para dos niveles sísmicos, uno de bajo nivel, denominado OBE o de operación y otro de seguridad SSE.

El OBE (*Operating Basis Earthquake*) es aquél para el que debe proyectarse la planta de tal forma que permanezca funcional. Es decir, debe considerarse básicamente como un criterio económico al garantizar que tras este sismo (y una vez realizada una evaluación del estado de la central) puede continuar la operación normal de la planta.

El SSE (*Safe Shutdown Earthquake*) es con el que deben proyectarse las estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad de la planta, para que se garantice la integridad de la barrera de presión del refrigerante y la capacidad de apagar el reactor y mantenerlo en condición segura.

Otra interpretación más práctica del significado de estos terremotos de

diseño es que el SSE es el *terremoto máximo previsible* en el emplazamiento considerando para ello todos los condicionantes como la historia de terremotos ocurridos, sismología, tectónica, geología todos ellos tanto en el entorno del emplazamiento como en un radio mas amplio (hasta 320 km). Por el contrario el terremoto OBE será el *máximo probable durante la vida de la central*. La dificultad de determinar el nivel de este último, hace que se admita un valor mitad del correspondiente al SSE.

En el proyecto de una central nuclear los terremotos de nivel OBE se consideran suceden varias veces (de 2 a 5) antes de la ocurrencia del terremoto de nivel SSE, es decir producen una fatiga previa al sismo de diseño.

### **Sismicidad aplicada a los emplazamientos de instalaciones nucleares**

En toda normativa internacional la sismicidad se define en porcentajes de aceleración debida a la gravedad, dado que este coeficiente de aceleración permite estimar las fuerzas inerciales mediante su aplicación a la masa de los elementos.

Tanto la península ibérica como las islas Canarias y Baleares son de sismicidad baja. Incluso las zonas consideradas muy sísmicas como es el Sur-Este, tienen asignados, de acuerdo con la Norma Sismorresistente Española NCSE-02, valores sísmicos inferiores a 0,3g (desde el punto de vista de los efectos que causan, se consideran de baja sismicidad valores por debajo de 0,3g, media sismicidad con valores entre

0,3 y 0,5g y alta por encima de éste último valor).

Las centrales nucleares españolas se sitúan en zonas de muy baja sismicidad, siendo Cofrentes la de mayor coeficiente de acuerdo con dicha norma a la que se asigna un nivel de 0,06g seguida de Ascó y Vandellós con 0,04g. El resto, Almaraz, Garoña o Trillo, se sitúan en zonas para las que la Norma NCSE-02, no requiere evaluación sísmica (evidentemente esta norma aplica a la edificación y otra obra civil, pero no a instalaciones nucleares). Sin embargo la investigación sísmológica específica para estos emplazamientos asigna valores muy superiores como es 0,2g para Vandellos, 0,17 para Cofrentes y 0,13g para Ascó, es decir en el peor de los casos mas del triple de lo que exige la norma NCSE-02 para edificación, obra pública o instalaciones industriales. En la siguiente figura se muestran las zonas de concentración de sismos en la península y la situación de las centrales nucleares.

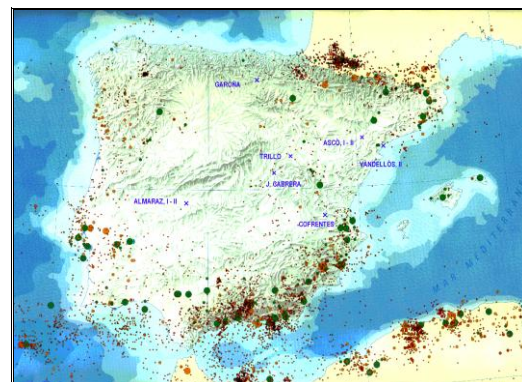


Figura 1.- Registros de terremotos en la península y situación de las planta nucleares

Con objeto de tener un orden de magnitud adecuado sobre el significado del nivel sísmico mencionado, necesario para cualquier proyectista previo a un análisis basado en esas magnitudes, es conveniente relacio-

nar los niveles sísmicos mencionados con los efectos que pueda causar, puesto que el sentimiento sobre los efectos en las estructuras e instalaciones tras un terremoto, puede estar deformado por las imágenes que ofrecen los medios de comunicación, que lógicamente se refieren a aquello que colapsa y no a lo que se comporta adecuadamente. En general y al referirse a un terremoto se habla de su *magnitud* en la escala de Richter, que define la energía liberada por el terremoto. Más intuitiva es la de *intensidad* de Mercalli modificada, basada en los efectos producidos por el sismo. La relación entre ambas escalas se incluye en la siguiente tabla:

Richter (Magnitud)	1	2	3	4	5
Mercalli (Intensidad)	I	II	III	IV	VI

Richter (Magnitud)	6	7	8	9
Mercalli (Intensidad)	VIII	IX X	XI	XII

Neumann estableció la relación entre intensidad y nivel de aceleración a nivel del suelo según se puede ver en la siguiente figura (obsérvese la escala logarítmica que implica un aumento exponencial al pasar de grado en la escala)

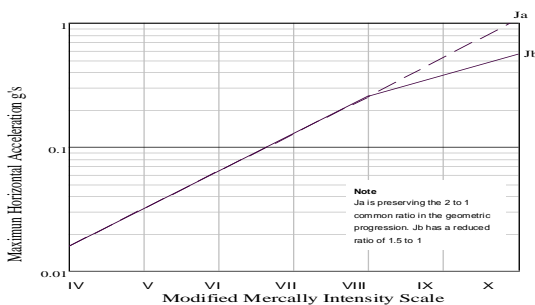


Figura 2.- Correspondencia intensidad de Mercalli / aceleración según Neumann

De acuerdo con ello, los efectos del sismo máximo aplicable a una central nuclear española, corresponderá en la escala de Mercalli a un grado entre VII y VIII, cuyos efectos son los siguientes (Considérese en lo siguiente la mampostería A como aquella edificación proyectada estructuralmente para resistir esfuerzos laterales y la B como bien construida pero no proyectada en detalle para resistir fuerzas laterales. Las C y D son construcciones de baja calidad).

*Grado VII: Es difícil permanecer de pie. Lo notan los conductores de automóvil. Los objetos colgados trepidan. Los muebles se rompen. Daños en la mampostería D, incluyendo grietas. Las chimeneas débiles se rompen por su base. Caen los aplanados, los ladrillos se aflojan; las piedras, revestimientos, cornisas, los parapetos sin contrafuertes y los ornamentos arquitectónicos también caen; Algunas grietas en la mampostería C. Olas en los estanques; agua turbia con lodo. Pequeños deslizamientos y derrumbes en los bancos de arena o de grava. Las campanas grandes repican. Se dañan los canales de riego.*

*Grado VIII: Se afecta la conducción de automóviles. Se daña la mampostería C; colapso parcial. Algún daño a la mampostería B; ninguno a la mampostería A. Caen los aplanados y algunos muros de mampostería. Caída y torsión de chimeneas de las casas y de las fábricas, monumentos, torres y tanques elevados. Las casas con estructura de madera salen de sus cimientos si no están ancladas; los muros de relleno son arrojados hacia fuera. Los pilotes podridos se quiebran. Las*

ramas se desprenden de los árboles. Cambio en el caudal y temperatura de los manantiales y pozos. Grietas en terreno mojado y en taludes inclinados.

En definitiva, para los niveles sísmicos asignados a las instalaciones nucleares españolas no se esperan efectos significativos en estructuras bien construidas y proyectadas para soportar cargas dinámicas, o lo que es lo mismo, para las correspondientes a instalaciones nucleares.

### **Metodología seguida en la calificación sísmica de instalaciones nucleares en España**

La calificación sísmica en las centrales nucleares españolas se aplica a todas las estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad, así como a aquellos que no siéndolo, si se produce su fallo puede afectar a la función de seguridad de las anteriores y a ciertos equipos de monitorización de accidente.

### Estructuras

El primer factor a considerar en un proyecto sismorresistente de estructuras es que su tipología estructural sea adecuada para soportar este tipo de sollicitación, siendo en este caso el proceso de análisis matemático un mero trámite para comprobar su capacidad. Las características son básicamente simetría, sistema estructural que transmita adecuadamente las fuerzas horizontales, y distribución de masas preferible en cotas inferiores. Las estructuras que conforman los edificios de seguridad de las plantas españolas cumplen adecuadamente este requisito al corresponder su tipología estructural a la definida por la acción combinada de losas y muros de cortante (estructura en cajón).

Su capacidad se ve además aumentada a causa de otros requisitos no estructurales como son blindaje y contención, que obligan a un espesor de muros, losas y forjados muy

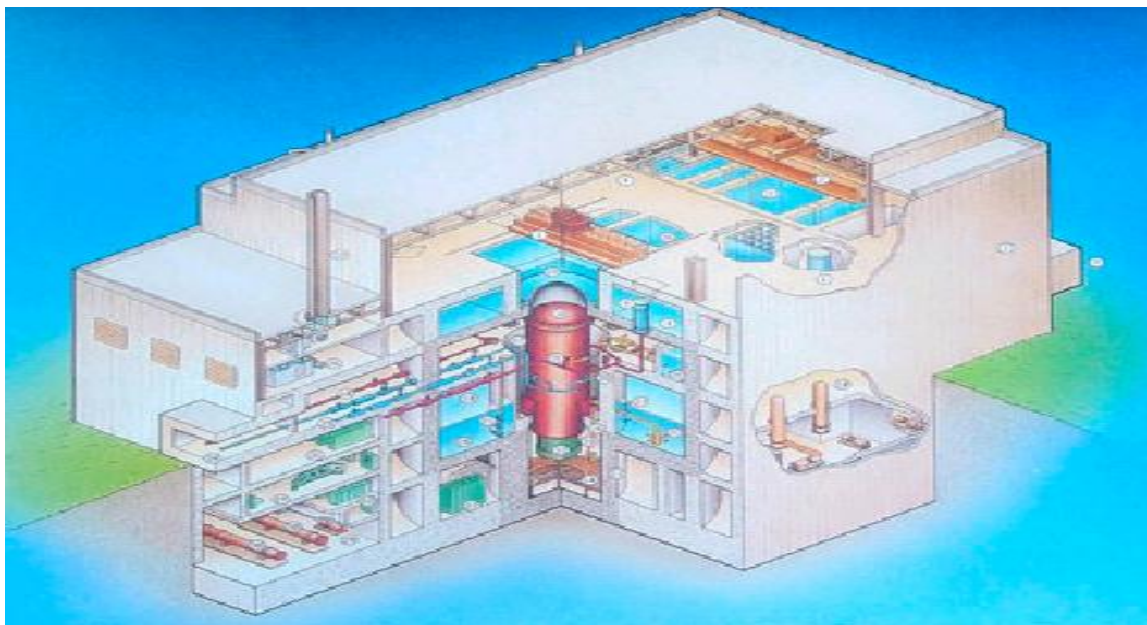


Figura 3.- Típica estructura basada en muros y losas

superior a aquel que en buena práctica sería el adecuado para los niveles sísmicos esperados.

El proceso de análisis sísmico de los edificios corresponde a análisis modal con espectro de respuesta en el dominio de la frecuencia, utilizando un modelo del edificio que incluya la interacción dinámica suelo-estructura. La solicitación de partida, espectro de respuesta a campo libre, corresponde a los propuestos en la US NRC RG 1.60, desarrollados por Newmark, Blume y Kapur (1973), más conservadores que los de la normativa española de edificación (o incluso la correspondiente a EE.UU. en la costa Oeste, como es el UBC) y no permitiendo en ningún caso reducción por ductilidad, es decir no se admiten estados plásticos.

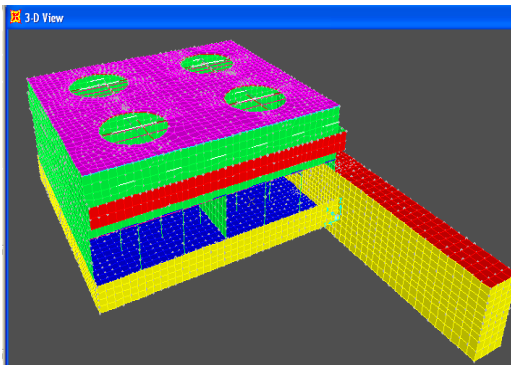


Figura 4a. Modelo dinámico de elementos finitos de un edificio

El resultado del análisis sísmico se combina con los obtenidos para otras solicitaciones (peso propio, sobrecargas, temperatura, presión, etc.) mediante combinaciones de carga que tienen en cuenta en sus coeficientes de seguridad la probabilidad de ocurrencia simultánea de estas cargas. Estas combinaciones de carga se obtienen de normativa de origen EE.UU (ACI, ASME) dado que la nacional (EHE) no contempla

explícitamente casos extremos como los que se consideran en el proyecto de instalaciones nucleares (por ejemplo limita su campo de aplicación a temperaturas inferiores a 70°C. Existe un borrador de norma EHE para instalaciones nucleares que contempla estos casos, pero no tenemos noticia de que haya sido publicada.

Un punto fundamental en el análisis sísmico de los edificios es la determinación de los espectros de respuesta de piso, dato imprescindible para la posterior calificación sísmica de los equipos, sistemas y componentes de la central. Para este análisis se utiliza el mismo modelo matemático que el derivado para el análisis estructural pero este caso se resuelve por el método del Time-History igualmente en el dominio de

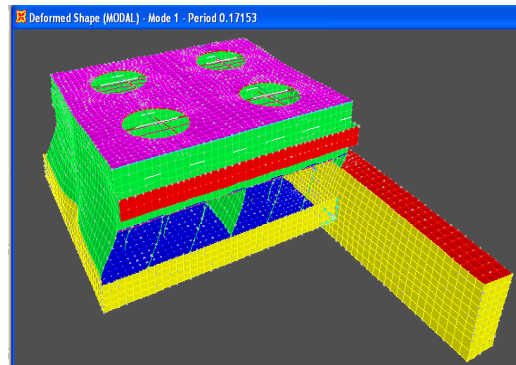


Figura 4b. Representación del primer modo de vibración

la frecuencia, determinando los acelerogramas de piso cuya integración resulta en los espectros de respuesta.

### Sistemas

Los sistemas considerados en el análisis sísmico de las instalaciones nucleares son las tuberías, conductos de ventilación y aire acondicionado (CVAA), bandejas de cables

eléctricos, conductos eléctricos (*conduits*) y otras tuberías (*tubing*).

El análisis sísmico de los *sistemas de tuberías* se incluye dentro del análisis global de la línea (*pipe stress analysis*) de acuerdo con los requisitos del código ASME. Del mismo modo que para las estructuras de los edificios, el análisis modal con espectro de respuesta define los esfuerzos sísmicos, que en combinación con otros aplicables definen los resultantes en la tuberías y los que transmiten a sus soportes. Un aspecto importante en este análisis es la limitación de aceleraciones en los puntos en que se montan las válvulas de tal forma que se eviten niveles para los que éstas no estén calificadas. En el caso de tuberías enterradas, donde la amplificación sísmica no puede darse al estar confinada por el propio terreno, los esfuerzos sísmicos se derivan bajo el supuesto de que el suelo que la rodea impone las mismas deformaciones que las ondas sísmicas imponen al terreno. La calificación sísmica de los sistemas CVAA, bandejas, conductos y otras tuberías, se basa en definir separaciones admisibles entre soportes para las que mediante métodos de análisis o ensayo, se ha justificado la capacidad de los conductos o bandejas, para las cargas sísmicas esperadas. El montaje no superará dicha longitud, utilizando para ello soportes típicos o especiales analizados para resistir los esfuerzos que les transmitan las bandejas o conductos.

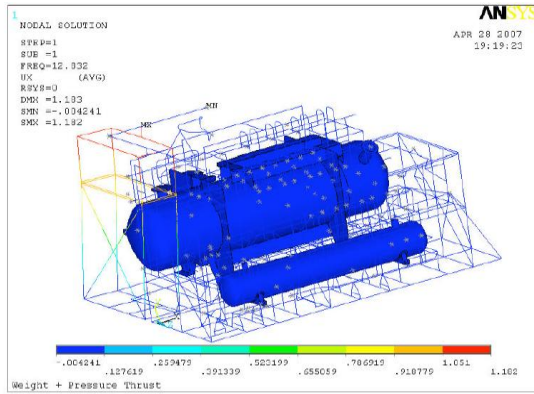
### Componentes

Todos los equipos mecánicos, eléctricos o de instrumentación requie-

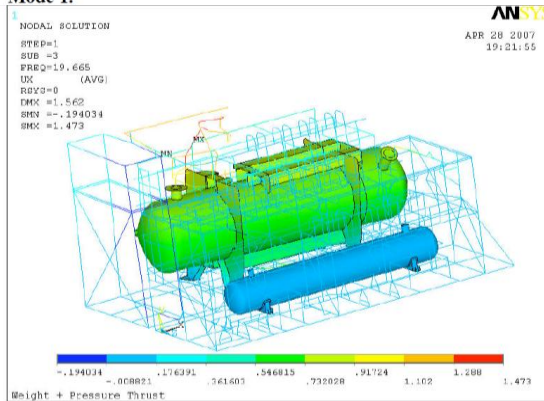
ren un proceso de calificación sísmica individual. Los métodos, requisitos y condicionantes de calificación sísmica de equipos admitidos de forma general, se desarrollan en la norma IEEE-344 "Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations", siendo su metodología aplicable a cualquier tipo, independientemente de que sean o no componentes eléctricos.

De acuerdo con dicha normativa, el método preferido es el ensayo dinámico con excitación sísmica simulada. Admite el análisis si sus resultados en tensiones y deformaciones son suficientes para justificar tanto la integridad estructural como la correcta función de seguridad. Este último criterio es adecuado para equipo mecánico, cuya calificación por ensayo es inviable en gran número de ensayos por su tamaño. Para equipo eléctrico aunque con alguna excepción, es prácticamente obligada la calificación por ensayo, incluso para elementos meramente estructurales como son las cabinas y armarios eléctricos, que al incorporar componentes eléctricos sensibles a la excitación dinámica y por tanto a la frecuencia con que vibra la cabina que los aloja, exige un ensayo de comprobación de los resultados del análisis caso de utilizar dicho método.

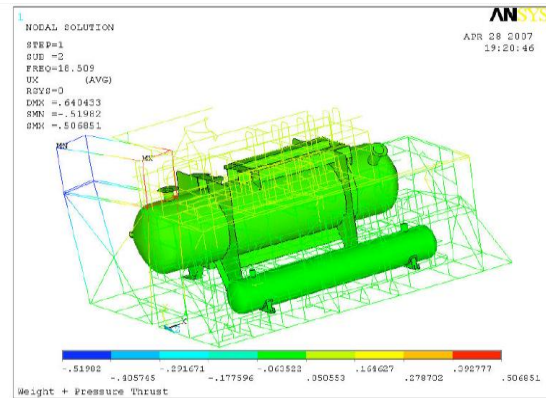
El equipo mecánico y algunos eléctricos como motores o transformadores, al ser inherentemente robustos, admiten calificación sísmica por análisis dinámico, partiendo de un modelo matemático que recoja sus características geométricas y de rigidez detallando aquellos elemen-



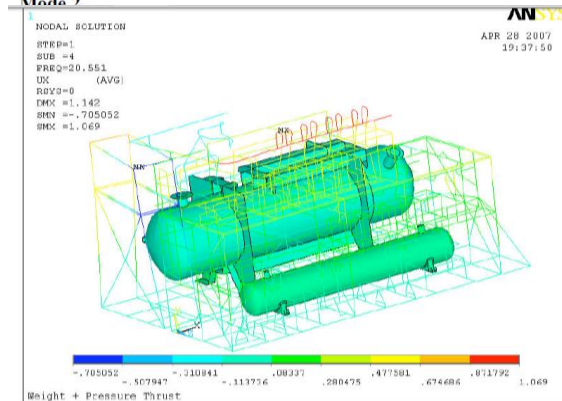
Mode 1.



Mode 3.



Mode 2.



Mode 4.

Figura 5.- Análisis de un equipo mecánico

tos móviles cuya deformación pudiera producir malfunción al superarse las tolerancias admitidas (rotores en bombas, ejes y yugo de válvulas, etc.) produciéndose consecuentemente choques o rozamientos entre las partes fijas y móviles. El modelo así creado se analiza tanto para cargas dinámicas como para otras sollicitaciones propias de su función, combinándose los resultados.

El método de ensayo implica situar un equipo igual al que se pretende calificar, incluyendo todos sus componentes, en instalaciones de ensayo adecuadas que simulen la excitación sísmica esperada en el punto de montaje en la planta. Antes, durante y después del ensayo se comprueba la función de seguridad asignada al equipo. En particular,

durante el ensayo se controla dicha función, obligándole si así se requiere, a arrancar, parar, cambiar de estado, etc., midiendo tiempo de operación, continuidad eléctrica y posibles saltos de contacto durante los ensayos, con objeto de comparar con lo obtenido en los ensayos previos y posteriores al sísmico.



Figura 6.- Montaje y control del ensayo de un equipo de Inabensa en los laboratorios de Viriab (San Sebastián)

## Consideración de sucesos iniciados por un sismo

Como consecuencia de un sismo (no necesariamente como suceso iniciador) podría producirse la pérdida de alimentación exterior, por tsunamis o por fallo de presas aguas arriba de la central.

La pérdida de alimentación eléctrica (*blackout*) es una de las situaciones previstas en el proyecto de una instalación nuclear en España. Para ello se disponen los generadores diesel y baterías. Estos sistemas se incluyen en la lista de equipos a calificar, por lo que aplica lo antes dicho sobre calificación de sistemas y componentes.

Los tsunamis son sucesos que sólo pueden darse en centrales próximas al mar. En España la única susceptible a este fenómeno es Vandellós II. No obstante los tsunamis propios del Mediterráneo son de muy baja energía, y en el caso de CN Vandellós de mínimo efecto al estar la central muy elevada respecto al nivel del mar (21m s.n.m), incluyendo en esa cota, el nuevo sistema de refrigeración de emergencia.

Respecto al colapso de presas aguas arriba de las centrales, es una situación que podría darse en plantas situadas en las proximidades de ríos. Esta situación se estudia de dos formas: En primer lugar mediante un análisis sísmico específico de las presas situadas aguas arriba de la central (independientemente del realizado durante el proyecto original de la presa, considerando sismos más desfavorables que los recogidos en la normativa de presas). Se utiliza para ello la

última tecnología en códigos de ordenador que consideran la interacción dinámica suelo-presa-fluido. Además del estudio de integridad de la presa, se supone el caso que esta fallase (análisis equivalente al que exige Protección Civil para todas las existentes), estudiando la avenida, nivel que alcanzarían las aguas y tiempo que se dispone antes de la llegada de la avenida, permitiendo desarrollar un procedimiento de actuación que permita tomar las medidas que resultaran necesarias.

## Mantenimiento del proceso de calificación sísmica

Tan importante es la calificación de la central durante la fase de proyecto y construcción como su mantenimiento durante la vida de la central. El proceso seguido utiliza los mismos principios y criterios aplicados en la fase inicial para cualquier modificación o sustitución de sistemas y componentes. Debe observarse que a causa de la falta de nuevos proyectos nucleares la mayor parte de fabricantes y suministradores han abandonado la industria nuclear lo que dificulta la adquisición de elementos sísmicamente calificados con sello nuclear. Este problema se solventa con el proceso de “*dedicación*” que permite elevar el grado de elementos comerciales a grado nuclear. No obstante, y en lo que se refiere al proceso de calificación sísmica de estos componentes, no existe diferencia con lo hasta aquí apuntado.

Desde un punto global de la calificación de la planta, se procede a una evaluación periódica de su estado. La metodología seguida está



basada en la investigación realizada para el grupo de propietarios SQUG (Seismic Qualification Utilities Group) durante los años 80-90 del siglo pasado, sobre el comportamiento de las estructuras, sistemas y componentes, no necesariamente de la industria nuclear, al soportar terremotos reales o bases de datos de los resultados de ensayos, con objeto de verificar la capacidad sísmica de aquellas plantas nucleares con fecha de construcción anterior al desarrollo de un procedimiento de calificación sísmica de común aceptación. Los conceptos básicos de esta metodología se han utilizado para desarrollar un procedimiento aplicable a la evaluación periódica de las plantas, incluido dentro del programa IPEEE (*Individual Plant Evaluation for External Events*).

Junto con otras actividades relativas a recopilación y análisis de la documentación sísmica generada durante el periodo a causa de modificaciones y mejoras, la actividad principal es la evaluación del estado real de la planta mediante recorridos de inspección (*walkdown*), identificando posibles puntos débiles en las estructuras, sistemas y componentes necesarios para la parada de reactor. Es prioritaria la identificación, montaje y evaluación sísmica de todos los relés y contactos, señalando para su sustitución aquellos modelos conocidos por su baja capacidad sísmica. La inspección debe identificar igualmente aquellos equipos con anclajes o estructura de baja capacidad estructural, defectos de montaje de los componentes incluidos en el equipo, interacciones por proximidad de equipos que pudieran dar lugar a choques, elementos mal soportados que pu-

dieran caer sobre equipos (luminarias), existencia de elementos sueltos (mesas de trabajo, andamios, herramientas etc.) que en caso de sismo pudieran deslizarse o volcar produciendo impactos en equipos de seguridad, así como cualquier deficiencia que a juicio del equipo evaluador pudiera afectar a la seguridad de la planta.

Como consecuencia de la evaluación y si existieran, se informa sobre los puntos débiles (*outliers*) encontrados y su propuesta correctora, de tal forma que sean solucionados en el menor plazo posible.

En las primeras evaluaciones de las centrales españolas participaron en las revisiones como homólogos (*peer reviews*) los ingenieros R.P. Kennedy y M.K. Ravindra, principales investigadores en el desarrollo de esta metodología, cuyas conclusiones respecto a las plantas españolas confirman un proyecto sísmico adecuado.



Figura 7.- R.P. Kennedy y A. Barrios durante las actividades del IPEEE de CN Vandellós II

## Conclusiones

En los proyectos de las instalaciones nucleares españolas se ha considerado un proceso de calificación sísmica de estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad utilizando unos niveles sísmicos superiores a los normalmente exigidos en la normativa aplicable a la construcción civil, justificando el cumplimiento con las funciones de seguridad mediante una metodología combinada de análisis y ensayos dinámicos de común aceptación a nivel mundial.

El nivel sísmico alcanzado en la fase del proyecto y construcción se aplica también a las modificaciones de diseño, manteniéndose durante la vida de la planta mediante evaluaciones periódicas que consideran tanto las modificaciones y mejoras realizadas como el estado general de la planta.