

LAS TÉCNICAS PROBABILÍSTICAS Y SU APLICACIÓN COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO

José A. CARRETERO FERNANDINO

Hace aproximadamente diez años (1975) se publicó el *Reactor Safety Study (WASH-1400)* [1], más conocido como *Informe Rasmussen*. Dicho informe constituyó la primera aplicación global de los métodos probabilísticos a la evaluación de temas de seguridad en la industria nuclear y demostró que las centrales nucleares podían ser analizadas de forma sistemática empleando técnicas probabilísticas.

Con posterioridad a su publicación, y con participación tanto de los expertos como de la opinión pública en general, se desató un gran debate en los EE. UU. sobre los méritos y limitaciones de estos métodos, que impidió la continuidad en su aplicación durante varios años. La similitud de los sucesos ocurridos en la central de *Three Mile Island* en 1979 con algunas de las secuencias previstas en el *WASH-1400* [1], y la publicación del *German Risk Study* (1979) [2], justificaron y relanzaron el empleo posterior de las metodologías probabilísticas.

Muchos de dichos estudios han tenido por objeto evaluar o justificar la aceptabilidad del riesgo específico de una central. Sin embargo, no se deben dejar pasar desapercibidos otros resultados, tanto o más valiosos obtenidos en dichos estudios, así como en estudios de menor alcance, en los que no se pretende determinar el riesgo de la central.

Está demostrada la capacidad de los análisis de fiabilidad de sistemas para ayudar a identificar en el diseño puntos débiles que pueden pasar desapercibidos con las técnicas deterministas. La circunstancia, inherente a ese tipo de estudios, de combinar puntos de vista de especialistas en diversas disciplinas, permite alcanzar una visión más completa de sistemas muy complejos como los que se encuentran en las centrales nucleares.

LAS TÉCNICAS PROBABILÍSTICAS EN EL PASADO

La incorporación de los métodos probabilísticos en los procesos de toma de decisiones para temas relacionados con la seguridad ha tenido hasta hace poco una finalidad de tipo normativo y regulador o técnico.

Con motivos reguladores se realizaron los estudios promovidos para cuantificar el riesgo social de la industria nuclear (por ejemplo: *WASH-1400* [1]) o de una central concreta (por ejemplo: *Zion* [3], *Indian Point* [4]), así como los realizados para cumplir con los objetivos probabilísticos de seguridad («*safety*

goals») establecidos en diversos países. Parecida causa ha promovido estudios de apoyo para la decisión sobre accidentes severos, que reglamentará los diseños futuros de centrales en los EE. UU. Como conclusión de estos estudios se afirma, a nivel regulador, que las centrales actualmente en operación no suponen un riesgo indebido para la sociedad.

La utilización de criterios probabilísticos, como apoyo de los deterministas, ha resultado muy beneficiosa para la industria nuclear, por su contribución a una limitación razonable de la explosión normativa y reglamentaria que se produjo a raíz del suceso de *Three Mile Island*.

La utilización técnica de los métodos probabilísticos reconoce su capacidad para no sólo cuantificar la fiabilidad de los sistemas, sino también identificar las interacciones entre sistemas diversos. Esto permite descubrir desequilibrios en la seguridad que se puedan presentar en el diseño de las centrales que, de otro modo, pasarían desapercibidos.

La evaluación probabilística permite, además, complementar las herramientas deterministas empleadas en el diseño (criterios, normativa, prácticas de diseño, etc.) con la experiencia nueva que se gana en la explotación, introduciendo un elemento de ponderación técnico con el que valorar la significación para la seguridad de exigencias cada vez más estrictas.

En este sentido, los métodos probabilísticos se están empleando para:

- Lograr una mejor comprensión de las características de seguridad de las centrales.
- Optimizar el diseño y el funcionamiento de las centrales.
- Anticipar «experiencias» que, de otra forma, sólo se obtendrían por la ocurrencia real de sucesos no deseables.

No es necesario subrayar la importancia que ello tiene para las centrales en operación de diseño antiguo que se enfrentan al problema de introducir modificaciones que las lleven a un nivel de seguridad equivalente al exigido a las nuevas centrales. Lograr una dedicación óptima de los recursos económicos ha aconsejado, en estos casos, la utilización de métodos probabilísticos como complemento de los determinísticos (por ejemplo: *Big Rock Point* [5]) que, por sí solos, podrían haber sugerido que la continuidad de dicha explotación era antieconómica.

Igualmente, en los diseños de las futuras centrales nucleares, difícilmente



José A. CARRETERO FERNANDINO es Ingeniero Industrial por la Escuela de Barcelona (1974) y diplomado en Ingeniería Petroquímica por IPA de la ETSIIB, ingresó en Empresarios Agrupados en 1976, siendo Jefe de Proyecto de Seguridad desde 1983. Es el responsable del grupo de desarrollo de estudios de fiabilidad y profesor de los cursos de seguridad nuclear para postgraduados del ICAI.

se podrán dejar de aplicar los métodos probabilísticos si se quiere llegar a un diseño con un nivel de seguridad equilibrado y capaz de funcionar con los niveles de disponibilidad razonablemente alcanzables.

APLICACIONES ACTUALES EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

En función del tipo de responsabilidades de la organización que participa en el proceso de toma de decisiones, los ejemplos de aplicaciones de estudios probabilísticos se pueden clasificar en los cuatro grupos siguientes:

- Con fines reguladores y normativos.
- Para toma de decisiones científicas y sobre investigación.
- Análisis de temas de seguridad singulares.
- Optimización del diseño y operación de centrales.

Hay que señalar que los resultados de un estudio probabilístico no suelen corresponder, generalmente, a uno solo de los grupos anteriores.

ACTIVIDADES REGULADORAS Y NORMATIVAS

Estas actividades son de dos tipos:

- Generación de normativa nueva.
- Evaluación del cumplimiento con la normativa existente.

Para ambos tipos de actividades se ha hecho amplio uso del apoyo técnico que proporcionan los análisis probabilísticos.

Las metodologías deterministas han probado su capacidad para llevar la industria nuclear a las altas tasas de seguridad que ha demostrado tener. Sin embargo, las técnicas probabilísticas se han empezado también a aplicar con intensidad en este campo, ya que han demostrado que proporcionan una información muy valiosa para el análisis de la seguridad y valoración de los riesgos.

Como cualquier otro método analítico, los análisis probabilísticos, por sí solos, no dictan las decisiones pero sí proporcionan información muy valiosa que,

al permitir una mejor comprensión del problema analizado, favorece la toma de decisiones.

Sólo a título de ejemplo, y dejando fuera muchas otras aplicaciones, cabe señalar los siguientes temas en los que se han empleado hasta la fecha, o se aplicarán en el futuro, los métodos probabilísticos:

- Política de la NRC para diseños futuros de reactores [6].
- Norma final de la NRC sobre el proceso de «backfitting» que se aplicará a los reactores nucleares [7].
- Posición (provisional) de la NRC sobre objetivos de seguridad («safety goals») [8].
- Fiabilidad de los sistemas de agua de alimentación auxiliar [9].
- Proyecto de mejora de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento actuales.
- Normativa sobre transitorios previstos sin parada de emergencia [7], etc.

DECISIONES CIENTIFICAS Y SOBRE INVESTIGACION

Estas decisiones se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Evaluación de los nuevos problemas que se presenten.
- Evaluación de las posibles soluciones a los problemas existentes.

Las técnicas probabilísticas se están empleando en ambos casos.

La evaluación probabilística de los temas nuevos de seguridad, a medida que se presentan, ha resultado imprescindible como apoyo a la definición de prioridades relativas a la distribución de los recursos dedicados a investigación. Los ejemplos más claros en esta área lo constituyen:

- La primera lista de 20 USI («unresolved safety issues») que se elaboró por selección mediante una evaluación de riesgos de los 133 temas genéricos que figuraban en la lista inicial, y
- la actual metodología empleada en la elaboración del NUREG 933 [10].

Por otra parte, la evaluación probabilística de las diversas soluciones a pro-

blemas de seguridad proporciona una medida de la eficacia de cada alternativa. Igualmente, la integración de estas técnicas dentro del programa de investigación ayuda a evitar la dispersión de recursos en temas secundarios y coordinar los esfuerzos de los grupos de trabajo múltiples. Como ejemplo significativo en esta área, realizado fuera de los EE. UU., cabe señalar la adaptación de los requisitos aplicados en reactores de agua ligera al diseño conceptual del HTGR (High Temperature Gas Reactor).

TEMAS DE SEGURIDAD NUEVOS O ESPECIALES

Las decisiones que se toman dentro de este grupo suelen referirse a temas que resultan técnicamente complejos, afectan a muchas centrales y tienen una importancia para la seguridad suficiente como para requerir una actuación reguladora simultánea con el desarrollo de las soluciones técnicas. En estos temas suelen cobrar una importancia vital, por su impacto, las decisiones que se tomen sobre la continuidad de la explotación.

Como ejemplo de aplicaciones de técnicas probabilísticas en este grupo cabría citar:

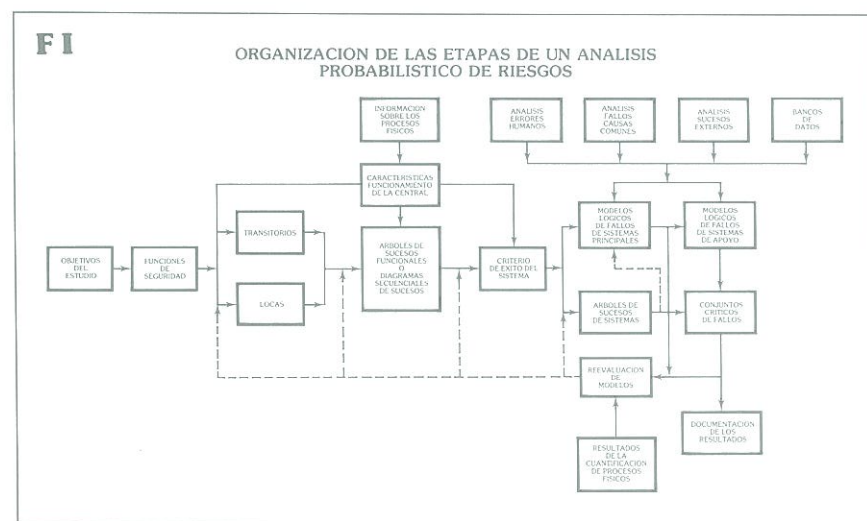
- La resolución del tema de «choque térmico en vasijas a presión», y
- la investigación realizada en Gran Bretaña sobre el fenómeno de «fuel pin ballooning».

OPTIMIZACION DEL DISEÑO Y OPERACION DE CENTRAL

Aunque la realización de análisis probabilísticos no es un requisito para las centrales en explotación en ningún país, muchas compañías han realizado, por iniciativa propia, estudios con diversos alcances. La característica fundamental de los estudios probabilísticos patrocinados por las compañías propietarias, o por los diseñadores, ha sido que no tenían como principal objetivo demostrar el cumplimiento con ciertos criterios formales, sino la búsqueda de soluciones de diseño y la mejora de la operación de las centrales. La materialización de alguna de dichas mejoras ha requerido, no obstante, la aprobación del organismo regulador por su incidencia en aspectos de seguridad.

Las técnicas probabilísticas se pueden aplicar en este campo con cualquiera de los siguientes propósitos:

- Selección de alternativas en cuanto a la operación de centrales.
- Optimización de las frecuencias de inspección.
- Identificación de los aspectos limitativos de la fiabilidad de los sistemas y valoración coste/beneficio de su mejora.
- Diseño de sistemas cumpliendo objetivos de fiabilidad (especialmente para nuevas centrales).
- Evaluación del diseño equilibrado de los sistemas de una central, confir-



mando la ausencia de puntos débiles en el diseño, o identificándolos si existieran.

Como ejemplo se pueden citar los estudios probabilísticos realizados en las centrales de *Indian Point* [4] o *Big Rock Point* [5], como resultado de los cuales las compañías propietarias propusieron, y realizaron una vez aceptadas por la NRC, cierto número de modificaciones con objeto de reducir la probabilidad de ocurrencia de accidentes, en sustitución de las modificaciones que habría resultado de la aplicación directa de los requisitos deterministas emitidos a raíz del suceso de *Three Mile Island*.

Especial significación tienen los estudios probabilísticos realizados en Gran Bretaña para la central de *Sizewell B*, pues su carácter previo a la etapa de proyecto, propiamente dicha, permite que sus resultados sean ampliamente considerados en el diseño.

Son muy numerosos los ejemplos que se pueden encontrar sobre estudios probabilísticos con alcance limitado, realizados con objeto de optimizar un diseño o mejorar la operación de centrales. Así se han realizado este tipo de estudios en múltiples centrales de agua a presión para verificar que la fiabilidad del sistema de agua de alimentación auxiliar es equiparable a la de sistemas similares en otras centrales o, en caso contrario, realizar las modificaciones de procedimientos, o incluso de diseño, que resultasen necesarias [11].

LAS TECNICAS PROBABILISTICAS COMO UNA DISCIPLINA MAS DEL DISEÑO

Desde el punto de vista de la ingeniería, la inquietud principal que motiva el conocimiento y utilización de las técnicas probabilísticas es su responsabilidad como diseñadores. Si bien todas las posibles aplicaciones antes descritas suelen tener un impacto directo o indirecto en las actividades del proyecto, es el último grupo de aplicaciones el que cobra mayor importancia para el diseño. Ello se debe a que los resultados de las restantes aplicaciones se plasmarán a menudo en forma de criterios, códigos y normas, método que ha demostrado ser el más eficaz para su incorporación al diseño de centrales al limitar el campo de incertidumbre con que se enfrenta el diseñador, y permitir la recopilación y transferencia de experiencias anteriores.

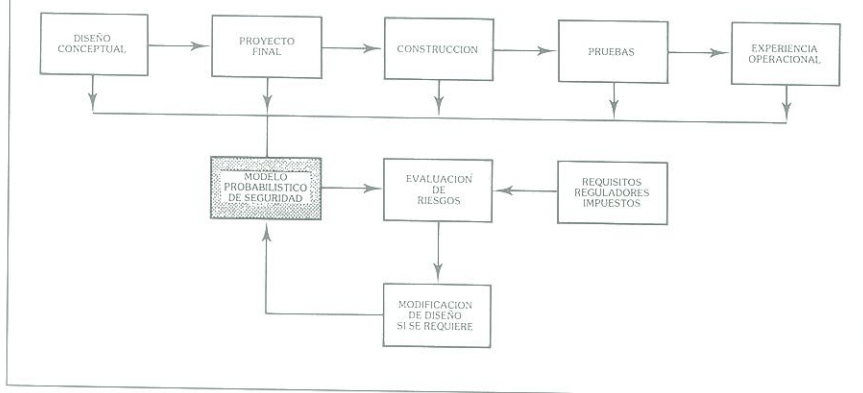
Es, por tanto, el grupo de aplicaciones orientadas a la optimización del diseño y la operación de centrales donde se centra el interés de la ingeniería. Dentro de este grupo se podrían definir igualmente dos grandes campos:

- La optimización del diseño y operación de centrales en explotación.
- El diseño de centrales futuras.

La aplicación de las técnicas probabilísticas a centrales en explotación suele

F II

ESTRUCTURA DE UN ANALISIS PROBABILISTICO DE RIESGOS INTEGRADO EN UN PROYECTO



tener que asociar los análisis probabilísticos de seguridad con análisis coste/beneficio y, en ciertos casos, con análisis de los efectos que supondrían sobre la disponibilidad de la central. El impacto económico que supone en una central en explotación cualquier modificación del diseño que se realice, o indisponibilidad que se produzca, hace, a menudo, injustificable la aplicación directa de gran número de conclusiones que no supongan una mejora suficientemente significativa de la seguridad o de la disponibilidad de la central. Ello condiciona, por tanto, los objetivos, alcance y metodología con que se deben llevar a cabo los análisis probabilísticos de este tipo de centrales.

Una situación totalmente distinta se presenta en el caso de centrales de nuevo diseño, en las que es factible la aplicación de técnicas probabilísticas como una disciplina más a utilizar para la selección de la alternativa óptima de proyecto. Así parece que ha sido tenido en cuenta por la NRC al aprobar una posición sobre el tema de accidentes severos en la que se establecen requisitos para las centrales actualmente en explotación o en construcción, diferentes

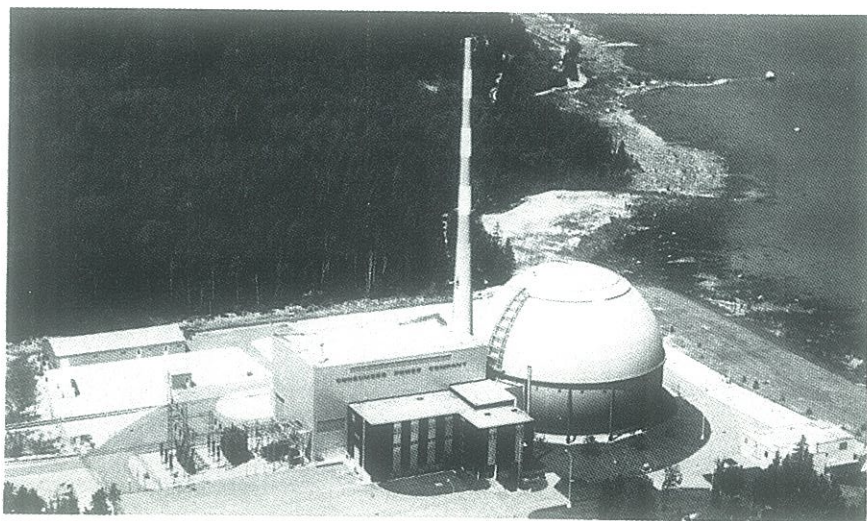
de los que se exigirán a las nuevas centrales.

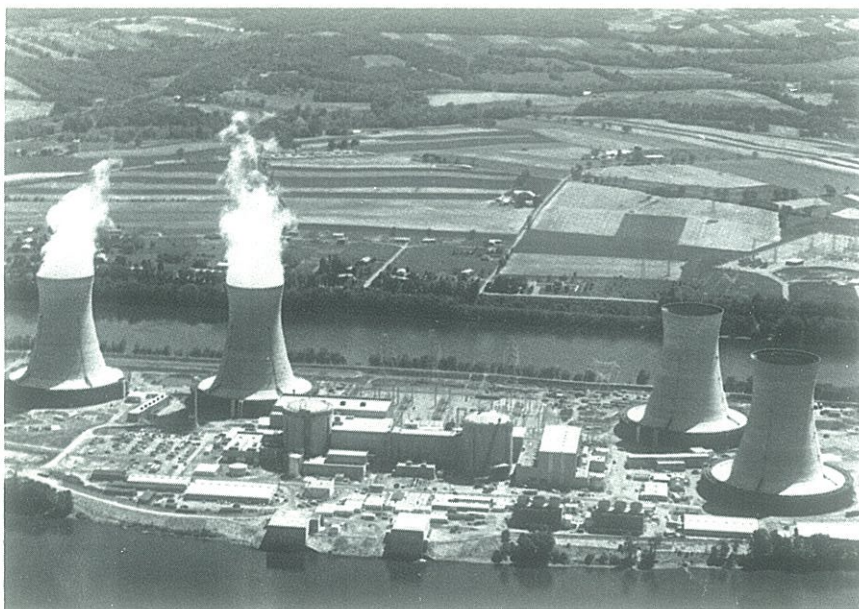
La ventaja principal con que se cuenta al realizar un estudio probabilístico para una central en explotación es que la documentación de proyecto se encuentra en su estado final, siendo de escasa significación los cambios que se puedan efectuar en la central durante el período de realización del estudio.

Por el contrario, en una central en fase de diseño o construcción, la realidad cambiante asociada con ciertas áreas del proyecto exige de las técnicas probabilísticas mayor capacidad de seguimiento y adaptación. Por ello se hace imprescindible que los analistas estén plenamente integrados en la organización que realiza el proyecto puesto que, en caso contrario, su aplicación sólo se conseguiría a costa de un esfuerzo extra para evitar retrasos indebidos al proyecto, lo que podría reducir su eficacia.

Una de las críticas que se ha realizado a estas técnicas, para su incorporación a un proyecto, ha sido su falta de flexibilidad para adaptarse al ritmo de un proyecto nuevo. En la medida en que se materialice la filosofía actual-

Big Rock Point.





Three Mile Island.

mente existente en todo el mundo de una mayor estandarización de los diseños de centrales y una mayor estabilidad de éstos en el tiempo, mayor será la importancia que cobren las técnicas probabilísticas como método que se ha demostrado válido para conseguir la incorporación a los nuevos diseños de la experiencia operacional actualmente existente. No se puede olvidar que la complejidad actual de los proyectos nucleares hace menos imprescindible la transmisión de dicha experiencia por los caminos clásicos de comunicación entre, o transferencia de, profesionales pertenecientes a distintas ramas de esta industria. La especialización que ello supone convierte los bancos de datos de tasas de fallos en un medio de comunicación técnica enormemente valioso. La experiencia operacional ya disponible de centrales, permite, por otra parte, que los datos que se han recopilado hasta la fecha resulten técnicamente significativos.

El desarrollo de los sistemas informáticos aplicables a la ingeniería permite en la actualidad la integración de los análisis probabilísticos con la flexibilidad necesaria para el ritmo de un proyecto, siempre que se tome la decisión de realizarlos en el momento en que se disponga de un diseño básico, y se actualicen al mismo ritmo que éste.

EXPERIENCIA ADQUIRIDA

Desde el momento en que se percibió que las técnicas probabilísticas podrían llegar a ser una disciplina más del diseño, se consideró la necesidad de disponer de un grupo especializado en dicho campo.

Por ello, cuando en España se tomó la decisión de realizar el primer análisis probabilístico, estudio de fiabilidad del sistema de agua de alimentación auxiliar de CN Almaraz [11], se examinaron las distintas posibilidades de organización y transferencia de tecnología para

su realización. Viéndose la necesidad, a corto plazo, de incorporar las técnicas probabilísticas a la ingeniería del proyecto, se optó por una organización que permitiera no sólo la adecuada realización técnica del estudio, sino la familiarización del nuevo personal con dichas técnicas desde un punto de vista integrado en el proyecto.

Se decidió contratar una firma consultora extranjera cuya participación se enfocó al cumplimiento de un triple fin:

- Conocimiento por la ingeniería y la propiedad de las posibilidades y limitaciones de las técnicas probabilísticas en el diseño.
- Asimilación por personal español de la metodología mediante la realización de un trabajo concreto («on-the-job training»).
- Supervisión del estudio.

La realización del estudio ha permitido profundizar en las capacidades de estas técnicas para el análisis de la ingeniería de sistemas y mejoras de diseño.

La asimilación alcanzada por personal español en el uso de estas técnicas ha permitido la realización de otros estudios probabilísticos como, por ejemplo, el desarrollado para la identificación de la alternativa óptima de diseño entre las razonablemente posibles, con vistas a la mejora del sistema de suministro eléctrico de emergencia de CN Almaraz.

La realización posterior por Santa María de Garoña de un análisis probabilístico de nivel I, dentro del programa de reevaluación de la central por el CSN, ha permitido consolidar la utilización de estas técnicas como un apoyo más para el análisis del diseño de centrales.

RESUMEN

Como se ha expuesto en este artículo, las aplicaciones que se están dando a las técnicas probabilísticas son distintas,

dependiendo del tipo de organización que tome la iniciativa de su realización. Sin embargo, su incidencia y difusión son cada vez mayores, introduciendo un mayor grado de flexibilidad en temas donde la experiencia adquirida por la industria lo exige. Nuevos conceptos o criterios que se están empezando a aplicar, como el del «*Leak Before Break*», y que tan beneficiosos pueden resultar para la industria, no se hubiesen aprobado fácilmente sin la credibilidad que tienen actualmente los métodos probabilísticos.

La aplicación de técnicas probabilísticas en centrales actualmente en explotación ha resultado, por sí sola, suficientemente valiosa aunque sólo fuera por el mayor grado de conocimiento de la central que adquiere el personal de explotación que se involucra en la realización del estudio y por las aplicaciones complementarias que le encuentran. Sin embargo, es en las mejoras de diseños y disponibilidad de las actuales centrales y en el diseño de las futuras donde, con su desarrollo actual y con el que se prevé adquirirán en un futuro próximo, pueden aplicarse dichas técnicas con toda su potencialidad.

Con vistas a dicho futuro sería importante un análisis y discusión sobre las áreas en las que el esfuerzo investigador y de desarrollo que se viene realizando en otros países debería complementarse con investigación o desarrollo nacional, concentrando en dichas áreas los recursos, por definición escasos, que se dediquen a la investigación en este campo.

REFERENCIAS

- [1] WASH 1400, NUREG-75/014 (1975), «Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risk in US Commercial NPP», NRC.
- [2] ISBN 3-921059-67-4 (1979), «Deutsche Risikostudie Kernkraftwerk», GRS.
- [3] Commonwealth Edison Company (1981), «Probabilistic Safety Study».
- [4] Consolidated Edison Company and New York State Power Authority (1982), «Indian Point Probabilistic Safety Study».
- [5] Consumers Power Company (1981), «Big Rock Point NPP Probabilistic Risk Assessment».
- [6] NUREG 1070 (1985), «NRC Policy on Future Reactor Designs».
- [7] 10CFR 50, «Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities».
- [8] NUREG 880, Rev. 1 (1983), «Safety Goals for Nuclear Power Plant Operation».
- [9] NUREG 611 (1980), «Generic Evaluation of Feedwater Transients and Small Break Loss-of Coolant Accidents in Westinghouse Designed Operating Plants».
- [10] NUREG 933 y Sup., «A prioritization of Generic Safety Issues».
- [11] NUCLEAR ESPAÑA, núm. 13 (1983), «Aplicación de los estudios probabilísticos de fiabilidad a CN Almaraz. Estudio del Sistema de agua de alimentación auxiliar».