

APLICACION DE LOS ESTUDIOS PROBABILISTICOS DE FIABILIDAD A C. N. ALMARAZ

ESTUDIO DEL SISTEMA DE AGUA DE ALIMENTACION AUXILIAR

Xavier JARDI y José A. CARRETERO

C. N. ALMARAZ

Una moderna tecnología se está desarrollando internacionalmente en el campo de la seguridad nuclear: los estudios probabilísticos de fiabilidad de sistemas.

C. N. de Almaraz ha considerado importante la asimilación de esta nueva tecnología para su posible aplicación en futuros estudios de apoyo a la operación.

En este artículo se describe el estudio de fiabilidad realizado, con el fin anterior, para el sistema de agua de alimentación auxiliar. Se comprobó la alta fiabilidad del sistema, incrementándose adicionalmente mediante variaciones mínimas en algunos procedimientos de mantenimiento.

INTRODUCCION

El 28 de marzo de 1979, en la central de Three Mile Island Unit 2 (TMI-2), se produjo un suceso de pérdida de agua de alimentación principal asociado con un agarrotamiento en posición abierta de la válvula motorizada de alivio del presionador, y un fallo temporal del sistema de agua de alimentación auxiliar. Entre las acciones desarrolladas por la NRC como respuesta a este suceso, estuvo la de llevar a cabo una revisión genérica y una evaluación de los sistemas de agua de alimentación auxiliar de todas las centrales en operación, con reactores diseñados por Westinghouse, mediante técnicas de análisis de probabilidades, que se presentó en el NUREG 611, ref. 1.

La fiabilidad de los distintos sistemas de agua de alimentación auxiliar analizados (NUREG 611), en las 25 centrales de diseño Westinghouse en operación en 1980 en EE. UU., se extiende en un rango de al menos dos órdenes de magnitud. Esta variación es debida a diferencias en el proyecto, procedimientos de mantenimiento y pruebas, y al grado permisible de intervención humana.

Aunque los estudios probabilísticos de fiabilidad están siendo realizados en la actualidad por múltiples centrales americanas, ninguno de estos estudios es requerido formalmente por la USNRC dentro del proceso de licencia. C. N. de Almaraz ha considerado importante la asimilación de esta nueva tecnología, para su posible aplicación en futuros estudios, con objeto de disponer de las más modernas herramientas para el apoyo a la operación.

De acuerdo con lo anterior, encontrándose el diseño del sistema de agua de alimentación auxiliar de C. N. de Almaraz 1 y 2, perfectamente de acuerdo con los requisitos indicados en el NUREG 660, se creyó conveniente la realización de un análisis mediante técnicas probabilísticas de dichos sistemas con el fin de comparar la fiabilidad de los mismos con los de otras centrales de diseño Westinghouse, recogida en el NUREG 611, ref. 1.

Este estudio permitiría, además, esta familiarización, buscada por C. N. de Almaraz, en las técnicas probabilísticas de riesgo. Como complemento se identificarían posibles puntos del sistema de agua de alimentación auxiliar de C. N. de Almaraz 1 y 2 que permitieran mejoras adicionales en su disponibilidad.

El estudio ha sido realizado por Empresarios Agrupados, que contó con el apoyo de NUS en la definición de hipó-



José A. CARRETERO FERNANDINO es Ingeniero Industrial por la Escuela de Barcelona (1974) y diplomado en Ingeniería Petroquímica por IPA de la ET-SIIB, ingresó en Empresarios Agrupados en 1976 siendo responsable de proyecto de seguridad desde 1978. Es el responsable del grupo de desarrollo de estudios de fiabilidad y profesor de los cursos de seguridad nuclear para posgraduados del ICAI.



Xavier JARDI BESA es Ingeniero Industrial (T. E.) por la Escuela de Barcelona (1969) y diplomado en ingeniería nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares, JEN (1971). Ingresó en Empresarios Agrupados en marzo de 1972 siendo responsable desde 1974 de las actividades de Seguridad Nuclear, desempeñando el cargo de Jefe del Departamento de Seguridad Nuclear desde 1980. Es miembro de la SNE, ANS, ASME e IEEE y director de los cursos de seguridad nuclear para posgraduados del ICAI desde su inicio.

TRANSITORIOS ANALIZADOS

LMFW : Pérdida de caudal del agua de alimentación principal.

LMFW/LOOP : Pérdida de caudal del agua de alimentación principal debida a la pérdida de alimentaciones eléctricas exteriores.

LMFW/LOAC : Pérdida de caudal del agua de alimentación principal simultánea con pérdida de corriente eléctrica.

VALORES DEL "FACTOR-C"

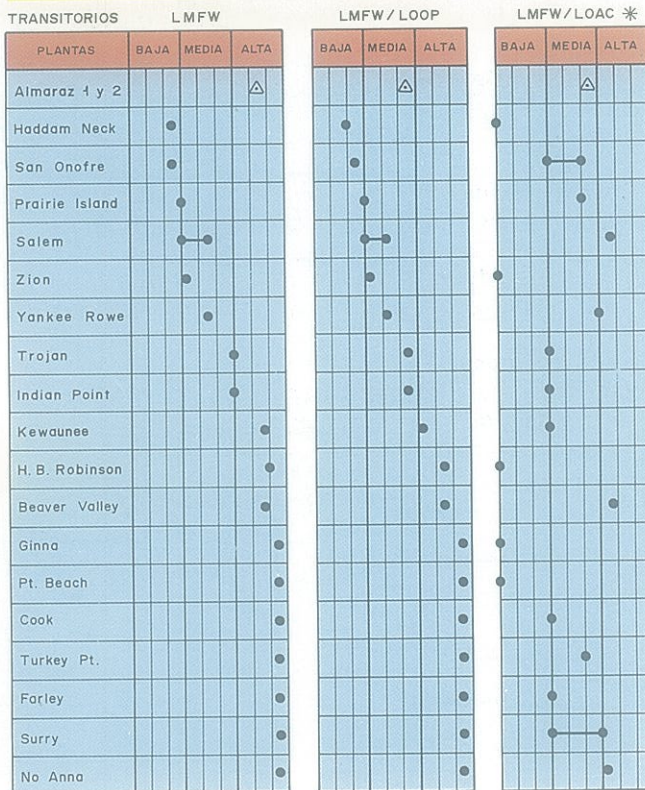
TIPO DE COMPONENTE	MODO DE FALLO	FACTOR-C
MOTOBOMBA	FALLO AL ARRANQUE (FALLOS MECANICOS)	3.9E-2
VALVULA NEUMATICA	FALLO AL OPERAR	0.14
GENERADOR DIESEL	FALLO AL ARRANQUE FALLO A SEGUIR OPERANDO	5.4E-2 8.0E-2
BATERIA	FALLO DE SUMINISTRO	4.0E-1

NIVELES DE CONFIANZA DE LA INDISPONIBILIDAD DEL SISTEMA

TRANSITORIOS	NIVEL DE CONFIANZA	UNIDAD -1	UNIDAD -2
LMFW	NC 5 %	7.81E-6	6.23E-6
	NC 50 %	5.94E-5	5.11E-5
	NC 95 %	4.51E-4	4.19E-4
LMFW-LOOP	NC 5 %	7.14E-5	6.62E-5
	NC 50 %	2.93E-4	2.65E-4
	NC 95 %	1.20E-3	1.06E-3
LMFW-LOAC	NC 5 %	9.27E-3	9.27E-3
	NC 50 %	2.41E-2	2.41E-2
	NC 95 %	6.26E-2	6.26E-2

NOTA :
NC 50 % - MEDIANA

COMPARACION DE LA FIABILIDAD DEL AFWS DE C.N. ALMARAZ. UNIDADES 1 y 2. CON OTROS DISEÑOS DEL SISTEMA EN PLANTAS CON NSSS DE WESTINGHOUSE EN OPERACION.



* NOTA.- ESTA ESCALA ES DIFERENTE A LOS SUCESOS DE LMFW y LMFW / LOOP.

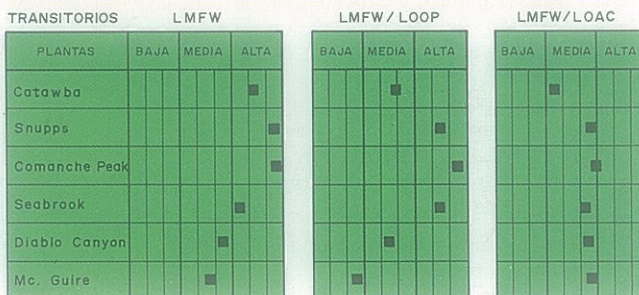
SIMBOLOGIA

● NUREG - 0611

MEJORA DE LA FIABILIDAD DEBIDA A MODIFICACIONES

	LMFW	LMFW-LOOP	LMFW-LOAC
UNIDAD 1	47,5 %	20,1 %	22,4 %
UNIDAD 2	49,7 %	29,5 %	22,4 %

COMPARACION DE LA FIABILIDAD DEL AFWS EN PLANTAS CON DISEÑO NSSS DE WESTINGHOUSE EN CONSTRUCCION (1980).



tesis y metodología, y en el análisis de resultados.

ALCANCE

En el estudio realizado, se ha ampliado el alcance de los análisis recogidos

en el NUREG 611, ref. 1, en distintos aspectos. En particular cabe señalar:

- La consideración más detallada de las características de los sistemas de apoyo de c.a. y c.c.
- El análisis de incertidumbre de los resultados en base a los límites de error de los datos.

- El análisis de los fallos de causa común mediante la técnica del factor-C.
- El análisis detallado de los procedimientos de operación para un tratamiento más preciso de las acciones del operador.
- La consideración de otros estudios y documentos específicos en las áreas

de suministro eléctrico a la central, este sistema proporciona un sumidero de calor para absorber parte del calor de desintegración, atenuando así la evacuación de vapor a la atmósfera a través de las válvulas de alivio del generador.

METODOLOGIA

A efectos de análisis de la fiabilidad, el sistema de agua de alimentación auxiliar incluye parte de los equipos y componentes principales del sistema, la instrumentación y control relacionado con los mismos y el suministro eléctrico de corriente alterna y continua necesario para el funcionamiento de los equipos o componentes del sistema de agua de alimentación auxiliar, fig. 1.

Suceso Principal

El criterio de éxito para que el sistema de agua de alimentación auxiliar garantice la evacuación de calor del primario, es el funcionamiento de una motobomba o una turbobomba aportando al menos 20,8 l/s (330 gpm) a un generador de vapor antes de los primeros veinticinco minutos. Este valor es el tiempo necesario para el secado («dryout») de los generadores de vapor después de la parada de emergencia, que se recomienda que se adopte en el NUREG 611, ref. 1, para las centrales tipo Westinghouse.

Así, pues, el fallo del sistema, llamado *suceso principal* («top event»), se define como: «Caudal insuficiente de agua de alimentación auxiliar (menos de 20,8 l/s, 330 gpm) desde una de tres bombas a uno de tres generadores de vapor durante los veinticinco primeros minutos transcurridos desde la demanda inicial del sistema de agua de alimentación auxiliar.»

Arbol de Fallos del Sistema

Se ha construido un modelo lógico, *árbol de fallos*, que representa gráficamente las posibles combinaciones de sucesos que conducen el fallo del sistema («suceso principal»). Para el dibujo de estos árboles se ha empleado el método de diseño gráfico automático mediante ordenador con representación gráfica (CEDIAP).

El árbol de fallos construido para el sistema de agua de alimentación auxiliar de la Unidad 2 se muestra en las figs. 2 y 3.

El árbol de fallos de este sistema para la Unidad 1 es formalmente análogo,

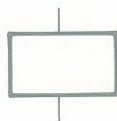
SIMBOLOS UTILIZADOS EN EL ARBOL DE FALLOS



Puerta "Y".
La coexistencia de todas las entradas es necesaria para producir la salida.



Puerta "O".
Siempre que exista una entrada se producirá la salida.



RECTANGULO.
Suceso que resulta de la combinación de fallos a través de puertas lógicas.



TRIANGULO.
Símbolo de transferencia.



CIRCULO.
Describe un fallo básico.



ROMBO
Describe un fallo que se toma como básico.

salvo en lo correspondiente a la motobomba del tren «A».

El sistema de agua de alimentación auxiliar se ha subdividido en tramos de tuberías y nudos de unión de varios tramos para facilitar la modelización lógica y la cuantificación probabilística del suceso principal.

No se han considerado como fallos potenciales aquellos que, debido a su bajísima probabilidad no repercuten significativamente en los resultados del análisis. En este sentido, no ha sido necesario considerar la contribución por rotura de componentes (tuberías, válvulas, bombas, reductores..., etc.) del sistema, por su baja significación en la fiabilidad total en comparación con las contribuciones a la probabilidad del suceso principal, debidas a fallos de equipo, instrumentación, humanos y por causa común, o indisponibilidad debida a pruebas o mantenimiento.

En este estudio se ha seguido un nivel de detalle de definición de fallos básicos similar al incluido en el NUREG 611, pero con mayor énfasis en los fallos de-

bidos a los sistemas eléctricos de apoyo.

La probabilidad de ocurrencia del suceso principal se ha determinado, por tanto, teniendo en cuenta:

- Los fallos aleatorios por demanda o funcionamiento de equipos y componentes.
- La indisponibilidad debida a pruebas o mantenimiento.
- Las actuaciones indebidas y omisiones potenciales del operador, antes y durante el transitorio considerado.
- Los fallos de causa común.

DATOS DE FALLOS

Fallos básicos de componentes

La base de datos fundamentalmente empleada ha sido el NUREG 611, ref. 1, con objeto de que los resultados puedan ser comparables con los de las otras centrales de diseño Westinghouse que se recogen en dicho documento. Dichos datos coinciden en su mayoría con los publicados en el WASH 1400, ref. 4. En

los casos en que el NUREG 611, ref. 1, no contenía el dato requerido, se ha utilizado el que figura en el WASH 1400, ref. 4.

El modo de fallo, debido a rotura de componentes mecánicos (depósitos, tuberías, válvulas, etc.), tiene una insignificante contribución a la indisponibilidad total del sistema.

En cuanto al suceso de «Pérdida de alimentaciones eléctricas exteriores», en los cálculos se ha considerado que tiene una probabilidad condicional de ocurrencia de 0.1 por demanda del sistema de agua de alimentación auxiliar; dicho de otro modo, en un 10 % de los casos de pérdida de agua de alimentación principal, el suceso iniciador habrá sido de pérdida de las alimentaciones eléctricas exteriores. El valor de 0.1 se ha deducido a partir de los datos recogidos en el NUREG 611, ref. 1, y que se ha corroborado con bibliografía adicional, ref. 5.

No se ha encontrado en el sistema de agua de alimentación auxiliar ningún fallo básico unido de componente que pueda dar lugar a la pérdida completa del funcionamiento del sistema.

Fallos de origen humano

Si bien el sistema de agua de alimentación auxiliar está proyectado para su actuación automática, el operador puede influir en la disponibilidad del sistema, tanto por acciones como por omisiones, antes o durante el transitorio.

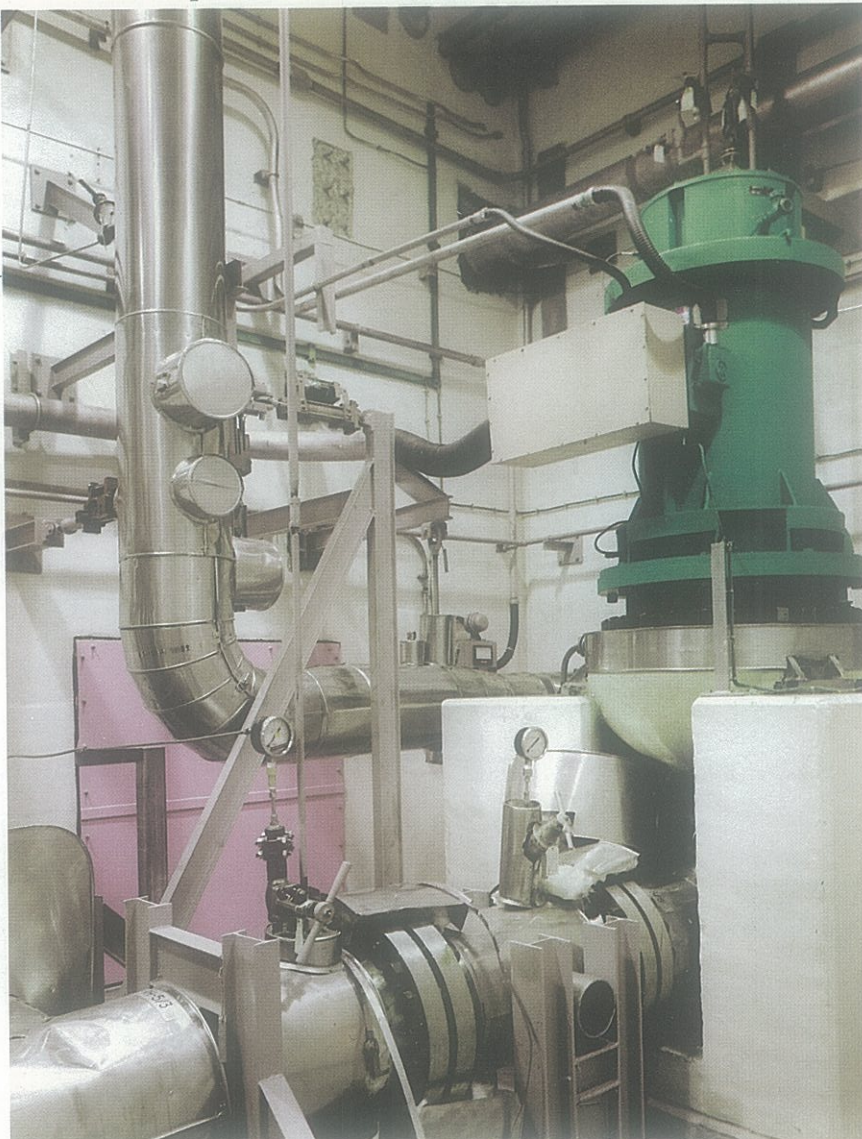
La base de datos fundamentalmente empleada ha sido NUREG 611, ref. 1, suplementada por el WASH 1400, ref. 2.

En la determinación de la probabilidad de error de las acciones del operador durante el transitorio, se ha tenido en cuenta que dispone de un tiempo máximo de veinticinco minutos, ref. 1, desde el principio del transitorio para llevar a cabo con éxito la acción antes de que se produzca el secado («dryout») de los generadores de vapor. Se ha dado un crédito limitado al suministro de agua procedente del sistema de agua de servicios esenciales por tratarse de agua no tratada químicamente.

No se ha encontrado en el sistema de agua de alimentación auxiliar error único de origen humano que pueda dar lugar a la pérdida completa del funcionamiento del sistema.

Indisponibilidad debida a pruebas y mantenimiento

Los componentes principales del sistema de agua de alimentación auxiliar y de los sistemas de apoyo pueden estar



indisponibles debido a pruebas o mantenimiento.

La indisponibilidad de las bombas, generadores diésel y baterías se ha determinado de acuerdo con los criterios establecidos en el NUREG 611, ref. 1. La contribución debida a su mantenimiento se considera que viene determinada por los límites de tiempo que, según las Especificaciones de Funcionamiento de la central, permiten que un componente se encuentre fuera de servicio. Con el término mantenimiento no se identifica, por tanto, el realizado durante la recarga, sino el que se pueda requerir durante la operación a potencia.

Si bien las pruebas de algunos de los componentes citados no dejan indisponible el componente, el NUREG 611, ref. 1, recomienda que se considere una contribución a la indisponibilidad debida a pruebas para tener en cuenta pequeñas operaciones de mantenimiento que se identifica su necesidad durante las pruebas periódicas.

La fórmula empleada para calcular la indisponibilidad debida a pruebas ha sido:

$$Q_{PR} = \frac{f \text{ (actos/mes)} \times t \text{ (horas/acto)}}{720 \text{ (horas/mes)}}$$

y la indisponibilidad debida a mantenimiento ha sido:

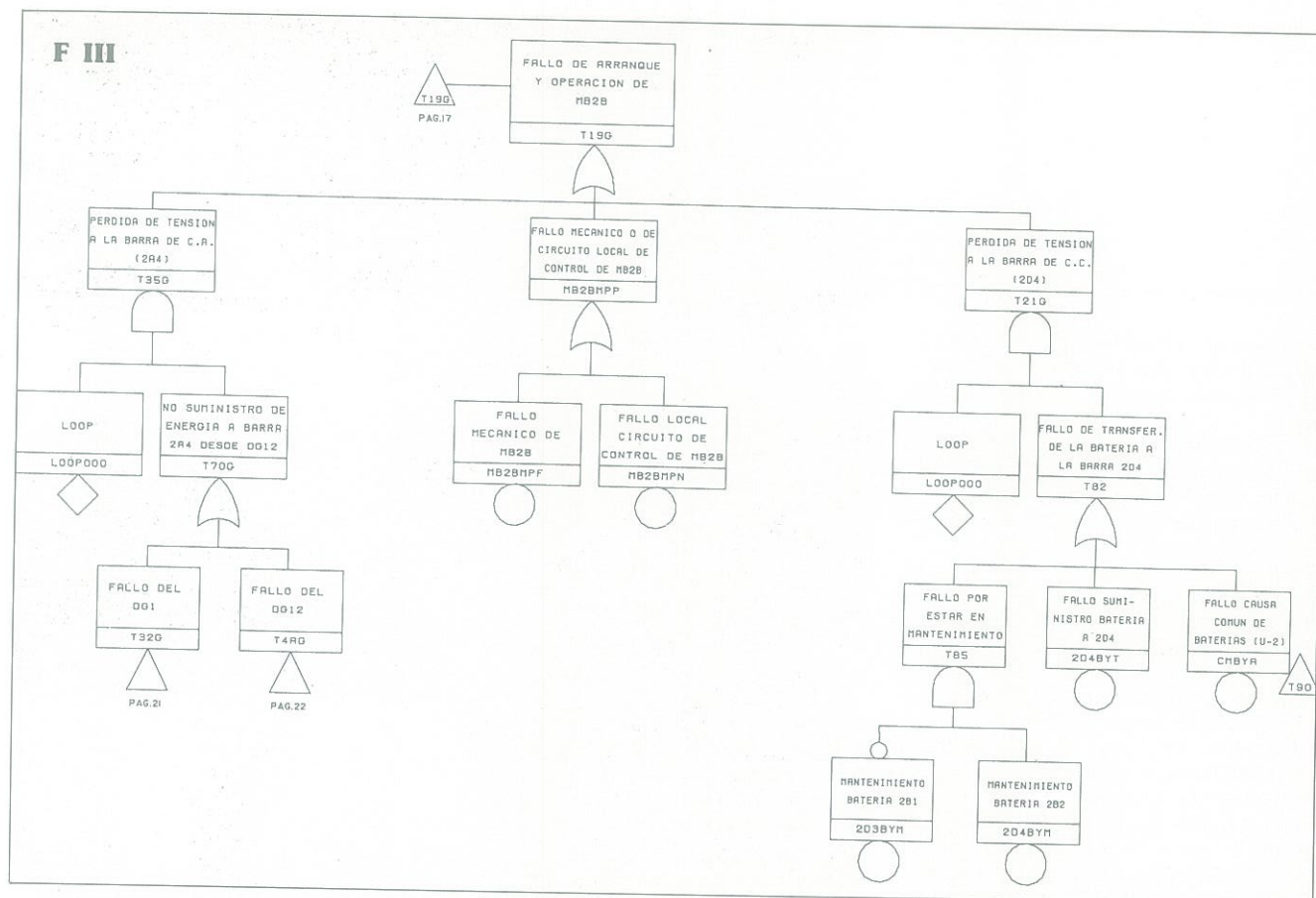
$$Q_M = \frac{0,22 \cdot \text{(horas/acto)}}{720 \text{ (horas/mes)}}$$

Fallos de causa común

En el árbol de fallos desarrollado para el sistema de agua de alimentación auxiliar, se han incluido las dependencias estimadas como más significativas entre componentes del sistema y con otros sistemas, salvo las debidas a sucesos externos.

Adicionalmente a lo realizado en el NUREG 611, en este estudio se ha incorporado el análisis de las dependencias de carácter residual o modelizadas por el procedimiento anterior, mediante el método del «factor-C», para disponer de una perspectiva global de la importancia relativa de los fallos del sistema (tabla II).

El método del «factor-C» es un método mejorado del denominado del «factor-B» que recoge la experiencia sobre fallos únicos y múltiples de componentes registrada en los informes de sucesos de centrales (LER), así como en otros informes de sucesos.



Se denomina «factor-C» a la razón entre:

$$\frac{\text{fallos de modo común}}{\text{fallos totales (modo común + fallos únicos)}}$$

Dado que la tasa de fallo global de un componente λT viene dada en las bases de datos, y que el «factor-C» suele ser un valor pequeño, λ_i (tasa de fallos independientes) y λ_c (tasa de fallos de modo común) se pueden determinar:

$$\frac{\lambda_i}{\lambda_c} = \frac{T}{C \cdot \lambda T}$$

En la tabla 3 se recogen algunos valores que toma el «factor-C», para diversos tipos de componentes, y que se han empleado en el análisis.

CUANTIFICACION DE LA INDISPONIBILIDAD DEL SISTEMA

Programas de ordenador

El análisis de la indisponibilidad del sistema de agua de alimentación auxiliar se ha llevado a cabo mediante programas de ordenador desarrollados al efecto. Estos programas permiten determinar la probabilidad de fallo para el suceso principal, así como para sucesos intermedios del árbol de fallos que se consideran importantes en el análisis e interpretación de los resultados.

El método operativo de los programas consiste en la identificación de los «conjuntos mínimos de corte» («minimal cut sets»), cuya probabilidad de ocurrencia supera un valor preestablecido. En

los cálculos realizados se ha fijado una probabilidad mínima de 1×10^{-7} , valor suficientemente bajo como para poder considerar que la probabilidad residual de los «conjuntos mínimos de corte» no calculados es despreciable y no afectaría significativamente a los resultados.

Cuantificación del árbol de fallos

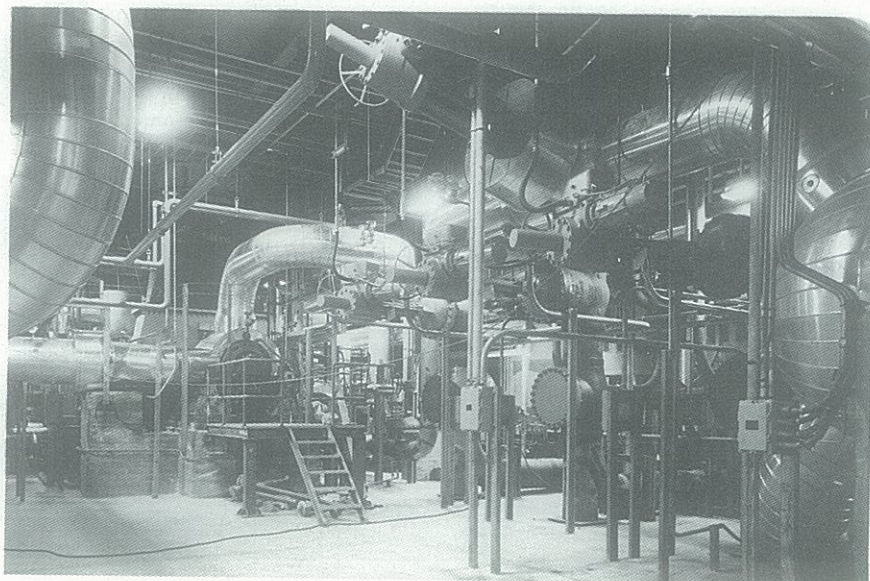
Se ha calculado la indisponibilidad/infiabilidad del sistema de agua de alimentación auxiliar para los siguientes sucesos:

- Pérdida de agua de alimentación principal; la probabilidad de fallo a la demanda del suceso «pérdida de alimentaciones exteriores» se toma igual a 0.1.

- Pérdida de agua de alimentación principal ocasionada por pérdida de alimentaciones exteriores: al ser el suceso iniciador, la probabilidad de fallo a la demanda del suceso «pérdida de alimentaciones exteriores» se toma igual a 1.

- La infiabilidad del sistema para el suceso de «Pérdida de agua de alimentación principal simultánea con pérdida total de c.a.» calculada al mismo tiempo que el caso «b» anterior si se toma el valor correspondiente a una puerta intermedia.

Se han realizado los cálculos tanto para la Unidad 1 como para la Unidad 2, para tener en cuenta las caracterís-



ticas de la lógica de los generadores diésel.

Análisis de incertidumbres

El cálculo de la indisponibilidad/infiabilidad del sistema de agua de alimentación auxiliar de la C. N. de Almaraz se ha realizado considerando la incertidumbre en los datos de partida que se han introducido mediante el primer momento (media) y segundo momento. Este análisis ha sido una mejora, sobre el requerido en el NUREG 611, que consiste en determinar la infiabilidad puntual del sistema sin considerar la incertidumbre de los datos empleados.

El único dato empleado en el que no se ha considerado incertidumbre ha sido el suceso externo de pérdida de alimentaciones eléctricas exteriores, al que se ha asignado una probabilidad de ocurrencia de 0.1 y 1 para los casos LMFW y LMFW/LOOP, respectivamente.

En la tabla III se recogen los valores de distintos niveles de confianza de probabilidad de fallo del sistema para los distintos casos considerados.

El caso LMFW es el que tiene mayor intervalo de confianza debido a la gran incertidumbre introducida en el fallo por causa común de los trenes C y H (los tramos de las bombas motorizadas), debido al error humano de calibración que domina los resultados.

CONCLUSIONES

El estudio realizado permite confirmar que los sistemas de agua de alimentación auxiliar de la Central Nuclear de Almaraz 1 y 2 tienen gran redundancia y diversidad, lo que los hace comparables a los sistemas con mejores características de centrales con diseño Westinghouse.

En la tabla IV se representan los valores incluidos en el estudio NUREG 611 para centrales W en operación en 1980 y en la tabla V, los correspondientes a distintas centrales en construcción en 1980.

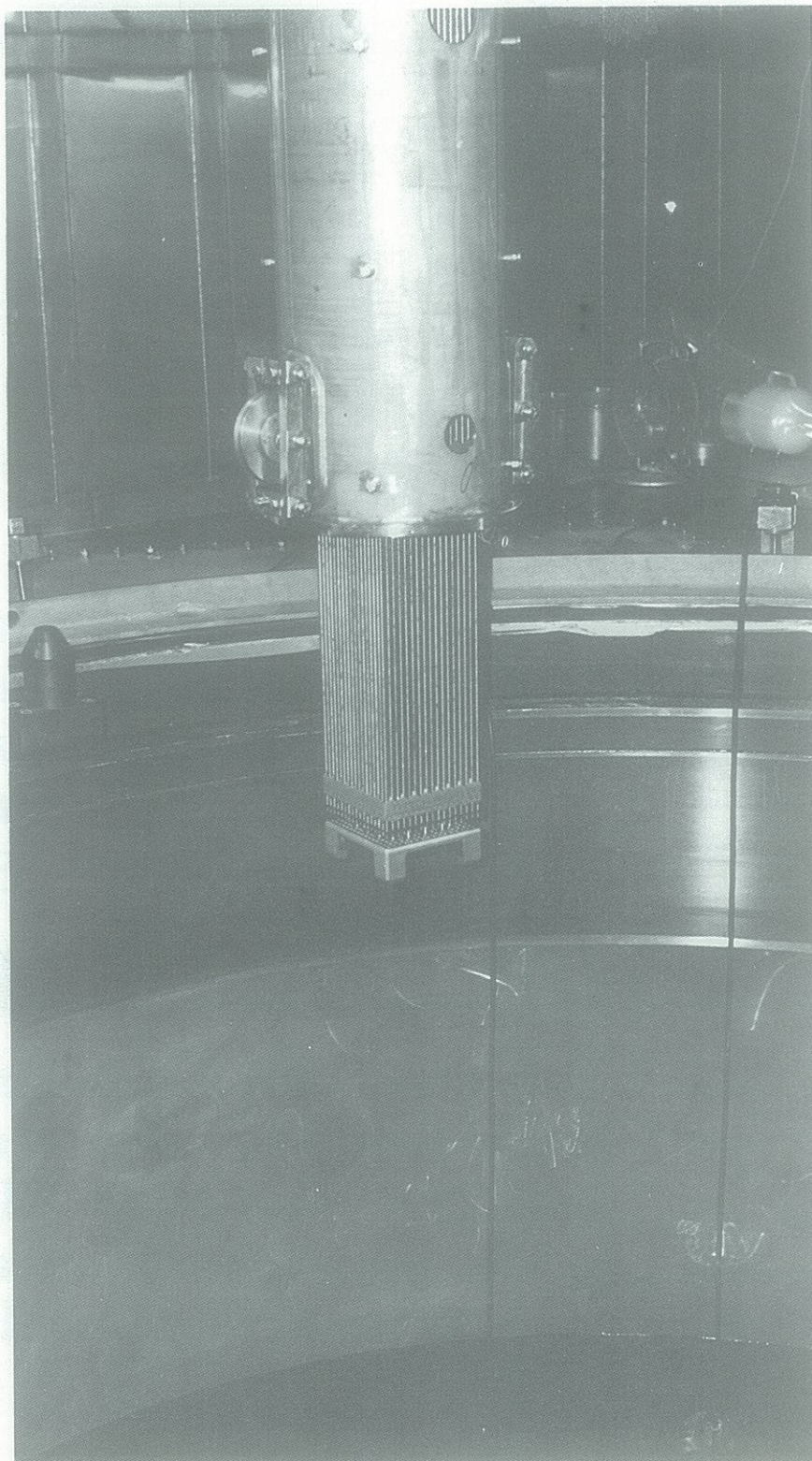
Se puede observar que los valores encontrados para la Central Nuclear de Almaraz se encuentran entre los más altos, cosa que dadas las diferencias de hipótesis adoptadas en la C. N. Almaraz (más conservadoras) permite catalogar la central como una de las que disponen de sistema de agua de alimentación auxiliar más fiable.

No se han identificado fallos únicos que puedan dar lugar a la indisponibilidad de todas las líneas de flujo del sistema.

La fiabilidad del sistema viene determinada por la dependencia existente entre los potenciales errores humanos de calibración. Esto se manifiesta principalmente en el caso LMFW tanto para

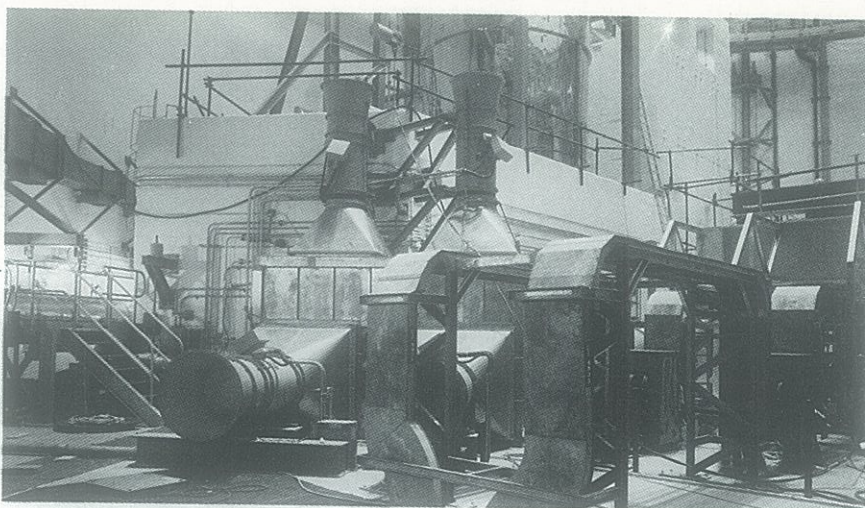
la Unidad 1 como para la 2 y en el caso LMFW/LOOP para la Unidad 2.

Dado el impacto que tiene en los resultados la dependencia entre los errores humanos de calibración, se ha anali-



zados con mayor detalle empleando la última metodología en el análisis de los fallos de origen humano que se recoge en el NUREG/CR-1278, ref. 6. Considerando en la tabla 7.1 del NUREG/CR-1278 una dependencia media entre dichos errores, aunque en nuestra opinión dicha dependencia es fuerte si se realiza por el mismo operador en el mismo día, resulta una probabilidad de fallo de modo común similar a la que resulta de aplicar el NUREG 611, ref. 1, por lo que consideramos que no se han introducido criterios más restrictivos en este dato que en los restantes datos empleados en el estudio.

Finalmente, en la tabla VI se indican las mejoras adicionales introducidas en la disponibilidad del sistema mediante la introducción de cambios menores en los procedimientos de mantenimiento de varios equipos (instrumentación, válvulas).



REFERENCIAS

- NUREG 611, Generic Evaluation of Feed-water Transients and Small Loss of-Coolant Accidents in Westinghouse-Designed Operating Plants, enero/1980.
- NUREG 666, A Probabilistic Safety Analysis of D. C. Power Supply Requirements for Nuclear Power Plants, abril/1982.
- Analysis of Station Blackout Accidents for LWR's, A. M. Kolaczowski, y A. C. Payne Jr., de Sandia National Laboratories, y P. W. Baranowski, de USNRC.

- WAS-1400 (NUREG-75/014), Reactor Safety Study An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear Power Plants, octubre/1975.
- NUREG/CR-660, Enhancement of Onsite Emergency Diesel Generator Reliability, enero/1979.
- NUREG/CR-1278, Handbook of Human Reliability Analysis With Emphasis on Nuclear Power Plant Applications, Draft 11/80.
- EPRI-NP-2301, LOOP at Nuclear Power Plants: Data and analysis, Science Applications, Inc. Interim Report 3/82.
- C. N. ALMARAZ 1 y 2, Informe Final de Seguridad.

**Las Empresas que trabajan
en el campo de la ENERGIA están en contacto
con nosotros para vender sus productos
o servicios por que
ANUNCIARSE EN**

NUCLEAR ESPAÑA

**se traduce en conseguir
una comunicación directa
con los Sectores Eléctrico
y de Ingeniería españoles
e internacionales**