



INCREMENTO DE MÁRGENES EN LOS ANÁLISIS DETERMINISTAS DE ACCIDENTES MEDIANTE EL EMPLEO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Los transitorios y accidentes base de diseño de las centrales nucleares PWR se analizan de forma determinista y utilizando hipótesis contrastadas y conservadoras. En el inicio de la industria nuclear cada hipótesis de partida a los análisis de accidentes consideraba una incertidumbre en el sentido más perjudicial para resultado. Con el tiempo se han desarrollado nuevos métodos de tratamiento de estas incertidumbres con objeto de recuperar los márgenes perdidos debido a modificaciones en planta, aumentos de potencia, mejora en la gestión del combustible que se han ido estableciendo en las centrales. En las plantas españolas ya se han implementado, en los análisis de licencia, métodos estadísticos para análisis del LEN y de muestreo para el análisis de pérdida de refrigerante (LOCA). En este artículo se presenta un nuevo camino de ganancia de márgenes para transitorios y accidentes no-LOCA/no-CLEN, aplicando métodos estadísticos con base Montecarlo, para considerar las incertidumbres en las condiciones iniciales. A modo de ejemplo, se estudia el incremento de margen al criterio de llenado del presionador en el análisis del transitorio de pérdida de agua de alimentación normal, mediante un estadístico de orden 1 con 59 casos y un método sustitutorio de ajuste con 50 000 combinaciones de incertidumbres en las condiciones iniciales del transitorio. Se han perturbado la temperatura, la presión, la potencia, nivel del presionador y el calor residual, considerando distribuciones de densidad de probabilidad de las incertidumbres uniforme y normal. El margen al criterio en este transitorio se ha incrementado en ambos casos, siendo mayor la ganancia en el método sustitutorio con 50 000 combinaciones. Este tipo de metodologías podrán ser de aplicación a los análisis de licencia para asegurar el cumplimiento de criterios distintos al LEN.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

El análisis de transitorios y secuencias accidentales forma parte de la base de la licencia y diseño de las centrales nucleares. Con ellos se diseña y/o verifica la capacidad de los distintos sistemas de control y seguridad y su funcionamiento frente a los posibles transitorios y accidentes. Estos análisis, que se presentan generalmente en el capítulo 15 del *Estudio de Seguridad* de las centrales, garantizan la protección de las personas físicas y el medioambiente, a través del cumplimiento de ciertos límites establecidos por el Organismo regulador.

La metodología utilizada para estos análisis es determinista, conservadora y envolvente en el sentido de obtener unos resultados pesimistas y minimizar los márgenes frente a los límites a verificar y envolver cualquier desviación o accidente que se pueda dar en la central. Este conservadurismo se asienta en tres puntos; 1) actuación de los sistemas (consideración del peor fallo simple en la actuación de los sistemas de seguridad o no considerar la actuación de

otros sistemas "no-seguridad" para paliar el accidente), 2) empleo de modelos de cálculo simples que no simulan todos los fenómenos físicos que ocurren durante un accidente, pero que los envuelven y 3) de imputación de las incertidumbres asociadas a las condiciones iniciales y de contorno como el valor máximo de su variabilidad, de forma que agrave el accidente.

Durante las últimas décadas se ha trabajado en los dos últimos puntos con objeto de, manteniendo un enfoque conservador, incrementar los márgenes en los resultados de los accidentes para aumentar la flexibilidad de operación de la planta y/o variar sus parámetros de operación para obtener más energía. Así, se han desarrollado códigos más realistas que son capaces de simular mejor los fenómenos físicos y metodologías de análisis de incertidumbres o metodologías combinadas.

En este sentido, para los reactores PWR de metodología Westinghouse, se han desarrollado metodologías que combinan las incertidumbres en el límite de CLEN a verificar, como el



GONZALO HERNÁNDEZ

Responsable de diseño termohidráulico y de análisis de accidentes de C.N. Ascó.

ENUSA

Ingeniero industrial en la especialidad de Técnicas Energéticas por la UPM y licenciado en Historia del Arte por la Universidad Complutense de Madrid.



MARISOL CORISCO

Responsable del análisis de accidentes y diseño termohidráulico de reactores PWR

ENUSA

Licenciada en Ciencias Físicas por la Facultad Complutense de Madrid.

MARGINS INCREASE IN THE DETERMINISTIC ANALYSIS OF ACCIDENTS USING STATISTICAL METHODS

Design basis accidents in nuclear power plants PWR are analyzed in a deterministic way and using contrasted and conservative hypotheses. In the beginning of the nuclear industry, the uncertainties to parameters were considered in the most penalizing sense to the results of the accident analysis. Over time, new methodologies and codes have been developed for recovering the lost margins due to some changes in the plant, power uprates, or improvements in fuel management that have been implemented. In the Spanish plants, statistical methods for analysis of DNB and sampling methodologies for the Loss of coolant accident analysis have already been implemented in the license analysis. In this article, a new way to gain margins in transients and non-LOCA/non-DNB accidents is presented, by applying Monte Carlo based statistical methods. As an example, the increase of margin to the pressurizer filling criterion in a typical Loss of Normal Feedwater accident analysis using a Wilks tolerance limit sampling method with 59 cases and also a substitution regression method with 50000 combinations of uncertainties in the initial and operating operation conditions is studied. The temperature, pressure, power, pressure level and residual heat have been perturbed according to uniform and normal probability distributions. The margin to the criterion in this transient has been increased in both cases, being greater the gain in the substitute method with 50000 combinations. This type of methodologies may be applicable to license analysis to ensure compliance with criteria other than DNB.



ITDP, RTDP o mini ITDP, o metodologías estadísticas de muestreo para el análisis del accidente de pérdida de refrigerante. Estos métodos desarrollados por Westinghouse han sido aplicados a los análisis de las plantas de este tipo, permitiéndolas flexibilizar la operación, cambiar sistemas e incrementar la potencia.

En el marco de los análisis actuales en España y tras la incorporación de estas metodologías, son los análisis de transitorios y accidentes no-LOCA con criterios de aceptación distintos del CLEN, los que pueden limitar cualquier flexibilidad adicional en la operación. Por tanto se plantea la aplicación de un método alternativo de combinación de incertidumbres a estos análisis. En este artículo se presenta la aplicación de un tratamiento estadístico de las incertidumbres de las condiciones iniciales y de contorno al análisis de un transitorio para verificación de límites distintos al CLEN.

MÉTODO MONTECARLO EN ANÁLISIS DE ACCIDENTES

En general cuando se quiere hacer un estudio de incertidumbres de un proceso es necesario: a) conocer cuáles son las incertidumbres que intervienen en el proceso, en nuestro caso en la evolución del accidente; b) cuantificarlas si es posible; y c) encontrar una forma de combinarlas para obtener la incertidumbre total que afecta al proceso. En este caso vamos a utilizar dos métodos de aproximación al método Montecarlo.

Las incertidumbres que intervienen y afectan al análisis de un transitorio son las relacionadas con las condiciones iniciales de operación (presión, temperatura, potencia, nivel del presionador y generador, etc.), las de contorno relacionadas con actuaciones de sistemas (caudales de SIS, tiempos de actuación) o las intrínsecas al núcleo como pueden ser las asociadas al calor de decaimiento o determinación de los

parámetros cinéticos y de reactividad.

La cuantificación de estas incertidumbres no es fácil y para ello se utilizan funciones de distribución de probabilidad, como las mostradas en la Figura 1, asociada a cada parámetro.

Por ejemplo, la asociada a la temperatura media de vasija se considera que es una función de distribución normal y la asociada al nivel del presionador como uniforme.

Una simulación Montecarlo consiste en generar un número elevado de valores aleatorios de estas variables considerando sus funciones de distribución de probabilidad. Se generan combinaciones aleatorias de estos valores y con cada una de ellas se realiza una simulación del accidente y se obtiene un resultado para el parámetro de salida de interés. Con el conjunto de los resultados se obtiene una función de densidad de probabilidad para este parámetro. El valor resultante, que deberá ser contrastado con el límite, debe asegurarse con el 95% de confianza y 95% de probabilidad (95/95) o los valores acordes con el Organismo regulador.

Este método es muy utilizado en los problemas de ingeniería y en particular en ingeniería nuclear. Las metodologías que se están aplicando en los análisis de plantas españolas, que se mencionaron en la introducción, están basadas en este método.

Aunque hoy en día la capacidad y tiempo de cálculo de los ordenadores ha mejorado mucho y en general ya no es un problema generar muestras de 10000 casos, la utilización de estadísticos de orden, por ejemplo de orden 1 de Wilks [1,2], donde 59 casos son suficientes para asegurar un 95/95. También son una buena aplicación los llamados métodos de sustitución que consisten en estimar el resultado a partir de una base de datos utilizando por ejemplo técnicas de regresión (lineales, cuadráticas etc.) Estas téc-

nicas deben ser posteriormente validadas.

APLICACIÓN A UN CASO PARTICULAR

Se presenta en este apartado la aplicación de dos métodos estadísticos al análisis de pérdida de agua de alimentación normal.

Uno de los criterios a cumplir en los transitorios de condición II es que no evolucionen a un transitorio de condición superior. En particular, en el transitorio de pérdida de agua de alimentación normal esto se asegura verificando que el presionador no se llena de agua líquida en su totalidad con objeto de que, al actuar las válvulas de seguridad del presionador, no se alivie agua por ellas incapacitándolas para cerrar y evolucionando, por tanto, a un pequeño LOCA, accidente de condición III.

Una pérdida de agua de alimentación normal, debido a un fallo de bombas, válvulas o pérdida de corriente alterna, hace que disminuya la capacidad del secundario de eliminar el calor generado por el núcleo. Como consecuencia de esto se incrementa la temperatura y presión en los circuitos primario y secundario. El vapor generado en el secundario se alivia por las válvulas de seguridad.

La falta de suministro de agua al secundario hace que la señal de bajo nivel en un generador haga disparar el reactor y arranque las bombas de agua de alimentación auxiliar; en el análisis base de licencia del accidente se considera el fallo de una de ellas.

Mientras tanto, el transitorio evoluciona tras el disparo, con un nuevo incremento de temperatura y presión, así como del nivel del presionador debido al calor residual, hasta el momento en el que el agua de alimentación auxiliar aportado a los generadores sea suficiente para eliminarlo completamente. Es este segundo incremento del volumen del presionador el que tiene que ser verificado para que no llegue a llenarse completamente. En la Figura 2 se presenta una secuencia típica de tiempo y la evolución del volumen de agua en el presionador para una planta PWR tipo Westinghouse.

Este caso corresponde al caso con potencia exterior disponible. Es un análisis estándar de licencia donde las incertidumbres aplicadas a los parámetros iniciales están consideradas en su máximo valor y en el sentido que minimicen el margen al límite. El segundo pico máximo al-

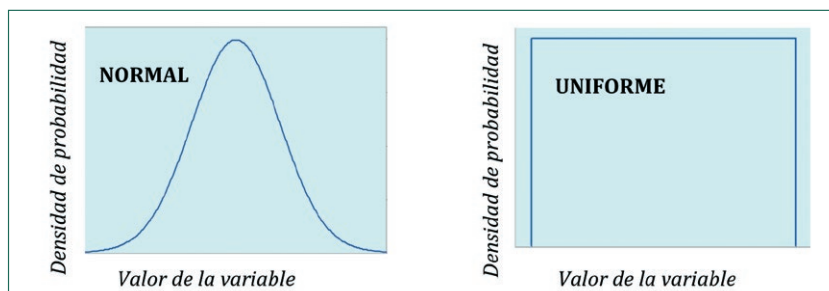


Figura 1.

SUCESO	TIEMPO (s)
Pérdida de las bombas de agua de alimentación	10
Se alcanza señal de disparo por nivel bajo-bajo en el G. y de agua de alimentación auxiliar	47
Las barras de control comienzan a caer	49
El agua de alimentación auxiliar llega a los generadores	277
El presionador alcanza un nivel máximo	830

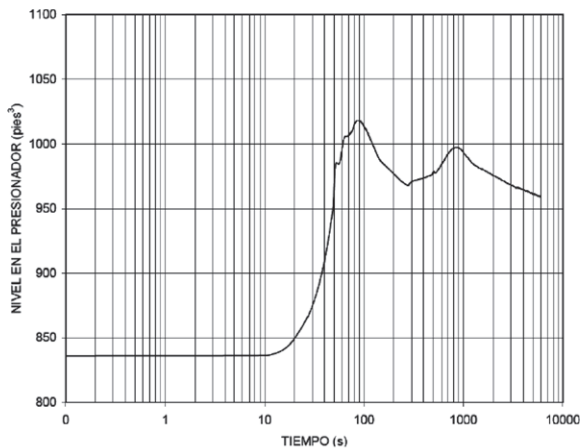


Figura 2.

canzado en el volumen de agua del presionador es 28,2 m³ (996 ft³).

Para la aplicación del método estadístico, con las mismas hipótesis de simulación del accidente y actuación de los sistemas, se sigue el proceso que se describe en la Figura 3. Se presenta la aplicación de dos métodos estadísticos diferentes: a) un método de combinación de incertidumbres con un estadístico de orden 1 y b) un método sustitutorio de regresión que simula un análisis Montecarlo con 50 000 casos.

incertidumbres al considerarlos en el análisis; las condiciones iniciales del transitorio, presión, temperatura, potencia, nivel del presionador y el calor residual tras el disparo. Existen otros parámetros que afectan al llenado del presionador pero no se conocen sus incertidumbres y en este caso se han desestimado.

Con la aplicación Minitab se generan datos aleatorios de estas variables teniendo en cuenta la función de distribución probabilidad asociada. En esta primera fase, se han considerado todas las incertidumbres con una función de distribución uniforme.

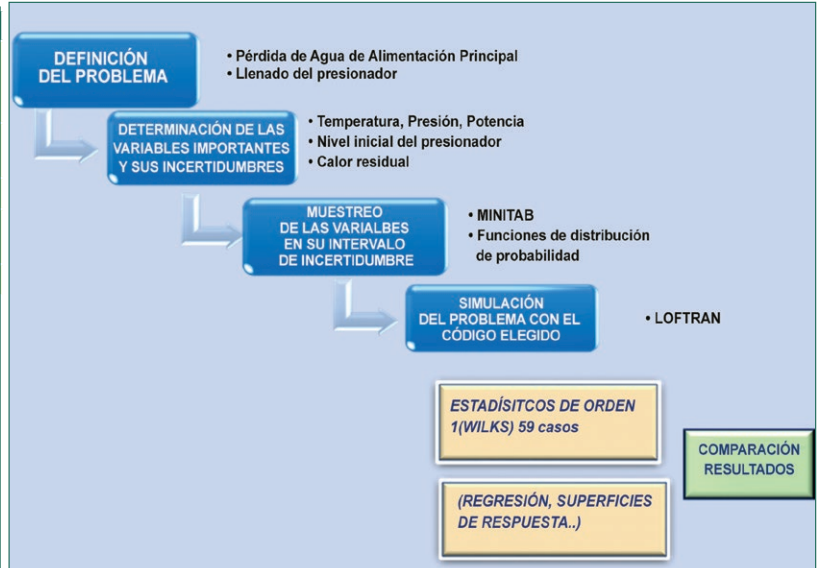


Figura 3.

a) Estadísticos de Orden 1

La aplicación más simple de este método estadístico se limita a generar una muestra aleatoria de tamaño $n=59$, siendo este el tamaño mínimo de una muestra para asegurar según la tabla [3] el 95% de probabilidad (β), con el 95% de confianza (γ) al considerar el peor valor obtenido entre los 59 resultados, en nuestro caso el máximo llenado del presionador alcanzado.

MINIMO TAMAÑO DE MUESTRA LIMITE DE TOLERANCIA UNILATERAL			
$\gamma \downarrow / \beta \Rightarrow$	90	95	99
90	22	45	239
95	29	59	299
99	44	90	459

Se generan 59 combinaciones de valores de los parámetros, y con el código Loftran, que se utiliza para el análisis de licencia de este transitorio,

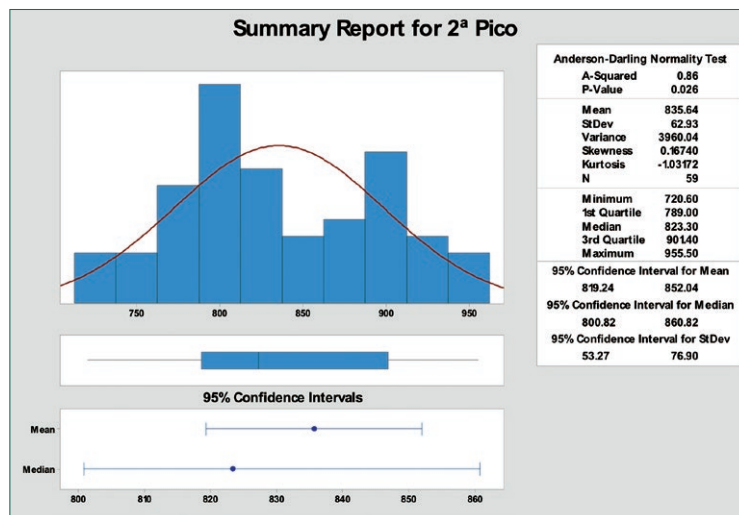


Figura 4.

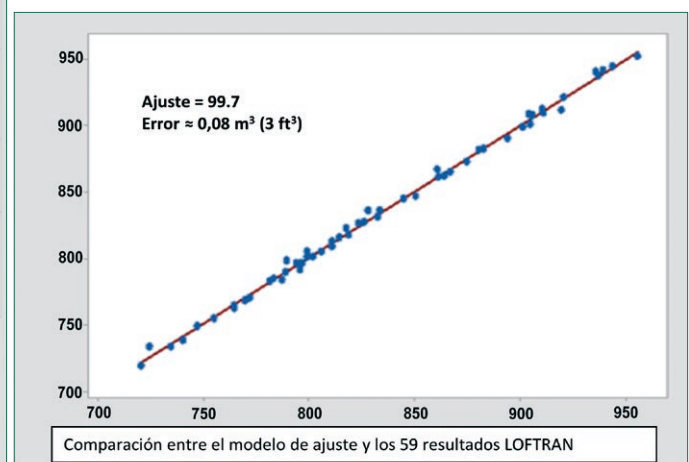


Figura 5.

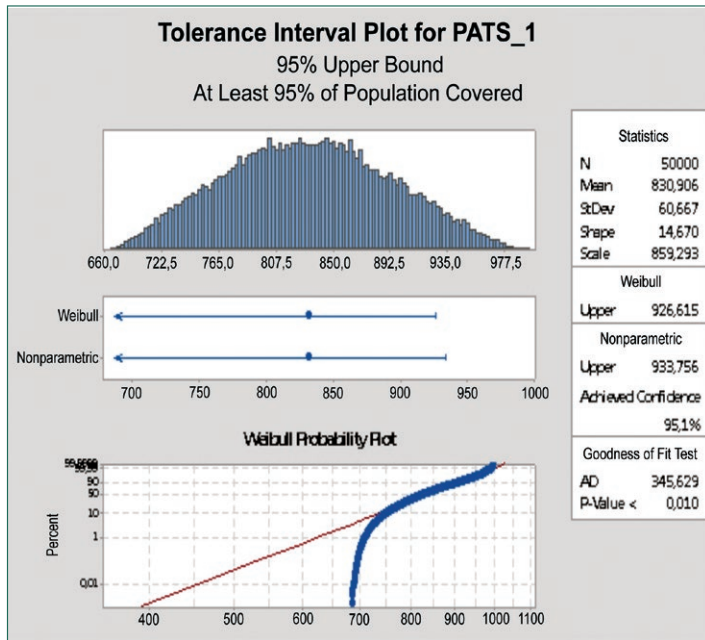


Figura 6.

se realizan 59 análisis de pérdida de agua de alimentación normal. La distribución de los resultados, máximo valor del 2º pico de nivel del presionador, de los 59 casos, se presenta en la Figura 4.

Tomando el peor resultado de los 59 obtenidos el valor máximo de volumen del presionador es de 27,04 m³ (955 ft³), lo cual supone un incremento del margen de 40 ft³ frente al análisis estándar. De acuerdo a la teoría estadística este valor cubre conservadoramente el 95% de la población con un nivel de confianza del 95%.

b) Modelo sustitutorio de Regresión

Este modelo tiene como objeto generar 50000 resultados del transitorio correspondientes a 50000 combinaciones de los parámetros elegidos. En vez de ejecutar los 50000 casos con el modelo Loftran se utiliza un modelo sustitutorio mucho más rápido y abordable en la forma que se describe a continuación.

Partiendo de los cálculos de Loftran realizados en el caso anterior, se ha buscado con Minitab un ajuste predictivo de los resultados de Loftran a una función que dependa de los parámetros utilizados en grado 1, 2 o combinados (Figura 5).

de entrada elegidas para el modelo de ajuste (presión, temperatura, potencia, nivel del presionador, Calor residual) y a partir de este se obtienen 50000 valores de llenado del presionador en el transitorio. En la Figura 6 se representa la distribución de estos 50000 resultados y el límite superior de tolerancia unilateral 95/95 que resulta ser 26.44 m³ (933.75 ft³). Este valor muestra un margen superior que el estadístico de orden 1.

c) Funciones de densidad

Por último se estudia el impacto de las funciones de distribución de las incertidumbres. En los casos anteriores se ha utilizado una distribución uniforme para todos los parámetros. Se considera ahora que, tanto la incertidumbre de la temperatura media de vasija, como la de la presión, tienen funciones de densidad normales 2σ , y se generan los 50000 casos con esta distribución. Aplicando a estos valores el mismo ajuste que en el caso anterior se generan 50000 resultados cuya distribución de densidad se presenta a continuación. En este caso el límite superior de tolerancia unilateral 95/95 resulta 26.18 m³ en 924,56 ft³, que indica más margen al criterio.

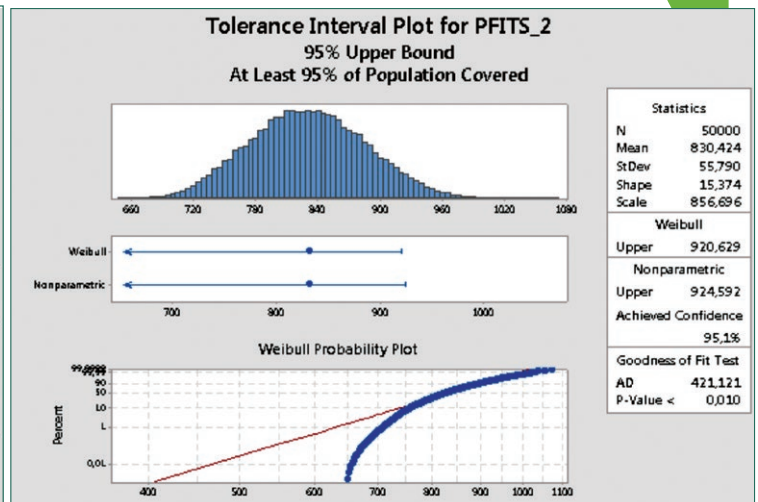


Figura 7.

De nuevo se generan con MINITAB 50000 valores aleatorios de las variables

Resumiendo el impacto de los métodos aplicados a este análisis, se identifica una ganancia en el margen en la aplicación de los métodos estadísticos, que se incrementa con el tamaño de la muestra y en la consideración de funciones de densidad apropiadas (tabla inferior).

CONCLUSIONES

En análisis de transitorios y accidentes base de diseño, para incrementar los márgenes a los límites de no DNB es posible utilizar un método estadístico en la aplicación de incertidumbres.

Con objeto de reducir los cálculos de ordenador, es posible utilizar estadísticos de orden o métodos sustitutorios como regresiones ajustadas a cálculos previos realizados.

Se ha comprobado que incrementando el número de casos simulados, la ganancia de margen es mayor.

Es importante la elección de parámetros que se van a perturbar y el conocimiento de sus incertidumbres y de su función de densidad de probabilidad. ■

Margen adicional en llenado del presionador sobre el cálculo estándar (ft ³)		
ESTADÍSTICO DE ORDEN 1 (59 casos)	REGRESIÓN (50 000 casos)	REGRESIÓN (50 000 casos) Impacto de la función de densidad
41	62	71

- [1] Wilks, S. S. (1941). Sample size for tolerance limits on a normal distribution. The Annals of Mathematical Statistics, 12, 91-96.
- [2] Wilks, S. S. (1941). Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limits. The Annals of Mathematical Statistics, 13, 400-409.
- [3] Gaens, T. (2017). ASQ Reliability and Risk Division. <https://www.asqrd.org/wilks-tolerance-limit-for-affordable-monte-carlo-based-uncertainty-propagation/>