

Desarrollo y Aplicación de una Metodología CSAU para el Caso de un ATWS en un BWR utilizando Métodos de Teoría de la Información

J.L.Muñoz-Cobo¹, A.Escrivá¹, R.Mendizabal², F.Pelayo², J.Melara³

¹ Universitat Politècnica de Valencia, (IIE)

² CSN, Justo Dorado 11, 28040 Madrid

³ IBERDROLA, Víctor Redondo 1, Madrid

jlcobos@iqn.upv.es, aescriva@iqn.upv.es, rmsanz@csn.es, fpl@csn.es, jls@iberdrola.es

Resumen – Se ha desarrollado una metodología tipo CSAU utilizando herramientas de teoría de la información para evaluar la incertidumbre en los parámetros de entrada y de los modelos que pueden afectar al parámetro crítico de seguridad (PCS). Para ello se han desarrollado dos herramientas auxiliares los programas GEDIPA-V1 y UNTHERCO –V1, el primero averigua la distribución de un parámetro o parámetros utilizando teoría de la información y evalúa también los momentos de la distribución con sus intervalos de confianza a partir de los datos. Mientras que el segundo realiza el muestreo por MONTECARLO de los parámetros de entrada cuya importancia ha sido puesta de manifiesto previamente mediante el PIRT y el análisis de sensibilidad. En el caso de que la información sobre un parámetro sea incompleta se aplica el principio de la máxima entropía o el de la máxima entropía relativa para obtener su función de distribución. La metodología se ha aplicado a la C.N. de Cofrentes para determinar el valor del Parámetro Crítico de Seguridad de un ATWS con un 95/95 de cubrimiento y confianza.

1. INTRODUCCIÓN

La NRC revisó en 1988 las normas de licenciamiento con el fin de permitir el uso de códigos termo-hidráulicos “Best Estimate” teniendo en cuenta todas las fuentes de incertidumbre asociadas al uso de tales códigos. Con el fin de dar soporte al proceso de licencia bajo esta nueva perspectiva la NRC desarrolló la metodología de análisis de incertidumbre en códigos TH conocida por sus siglas en inglés CSAU. En los últimos 20 años se han desarrollado varias metodologías para evaluar y cuantificar todas las fuentes de incertidumbre asociadas al uso de códigos TH (Glaeser 2011, Pourgol 2007).

Los accidentes del tipo ATWS en reactores BWR presentan según el análisis de riesgos una probabilidad no despreciable de que ocurran, y debido a las consecuencias que pueden derivarse de los mismos, resulta importante su análisis con cierto detalle. Para ello se utilizan códigos “Best-Estimate”, y se tienen en cuenta todas las posibles fuentes de incertidumbre que pueden afectar a los resultados obtenidos, lo que permite evaluar las posibles consecuencias de este tipo de accidentes.

El primer objetivo del presente trabajo es desarrollar una metodología tipo CSAU, que permita obtener de una forma consistente la incertidumbre existente en el parámetro o parámetros críticos de seguridad, con la información disponible sobre la planta. El segundo es crear herramientas informáticas y conceptuales que permitan aplicar dicha metodología de una forma sistemática y conservadora, aunque la información disponible sobre

determinados parámetros sea parcial. El tercero es aplicar la metodología a una Central Nuclear en operación.

Para obtener la metodología CSAU utilizaremos herramientas de teoría de la información con el fin de obtener la incertidumbre en los parámetros de entrada y de los modelos que pueden afectar al parámetro crítico de seguridad (PCS). Para ello se han desarrollado dos herramientas auxiliares los programas GEDIPA-V2 y UNTHERCO -V1, el primero averigua la distribución de un parámetro o parámetros utilizando teoría de la información y evalúa también los momentos de la distribución con sus intervalos de confianza a partir de los datos. Mientras que el segundo realiza el muestreo por MONTECARLO de los parámetros de entrada cuya importancia ha sido puesta de manifiesto previamente mediante el PIRT y el análisis de sensibilidad. En el caso de que la información sobre un parámetro sea incompleta se aplica el principio de la máxima entropía o el de la máxima entropía relativa para obtener su función de distribución. La metodología se ha aplicado a la C.N. de Cofrentes para determinar el PCS de un ATWS con un 95/95 de cubrimiento y confianza.

2. CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN CÓDIGOS TERMO-HIDRÁULICOS

2.1. Estadística del orden

Cada escenario por ejemplo un ATWS, tiene su propia secuencia de sucesos, lo que da origen a la aparición de diferentes tipos de fenómenos a lo largo del tiempo. El código TH cuando simula un determinado escenario de planta usa diferentes conjuntos de modelos y correlaciones que cambian con el tiempo, y dependen de la evolución del transitorio. Por lo tanto la incertidumbre en el parámetro crítico de seguridad, que para el caso de un ATWS es la temperatura de la piscina de supresión, cambia con el tiempo. El método usual de cuantificar esta incertidumbre es usar métodos basados en la estadística del orden.

El método más común para obtener rangos de incertidumbre en las repuestas de códigos es el método de la estadística del orden desarrollado por Wilks and Wald (1941, 1943), posteriormente este método fue usado por Guba y colaboradores (2003) en su aplicación a las centrales nucleares. Este método es el que actualmente usa AREVA en su metodología realista de grandes LOCAS. En este método el objetivo consiste en obtener intervalos de tolerancia, de un lado o dos según el caso, para los parámetros críticos de seguridad del problema en cuestión. Estos intervalos de tolerancia contienen con probabilidad γ los valores de los parámetros críticos de seguridad con un nivel de confianza β . Según los métodos de la estadística del orden el número N_c de casos que tienen que ejecutarse con el código TH depende de la probabilidad γ y la confianza β . Además existe una dependencia adicional con el número de parámetros críticos de seguridad en las fórmulas deducidas por Guba (2003). Mientras que otros autores como Martin y Nutt (2011) han cuestionado el uso de las formulas de Guba. En nuestra opinión las fórmulas de Guba son correctas para ello las hemos verificado usando el método de Montecarlo para distintos casos usando cien mil muestras para cada caso y los resultados obtenidos concuerdan con los de las fórmulas de Guba Makai y Pal dentro de los errores estadísticos con errores en las probabilidades menores que una milésima en el peor de los casos.

En el caso de utilizar métodos basados en la estadística del orden se procede como sigue, primero se seleccionan los parámetros de entrada y de los modelos, basándose primero en un juicio de expertos y la elaboración de un PIRT que da una valoración a cada fenómeno ordenándolos en una tabla, de esta forma se selecciona un conjunto de fenómenos que son importantes para el transitorio objeto de análisis, junto con una valoración de la importancia que a juicio de los expertos tiene cada fenómeno respecto al parámetro crítico de seguridad (PCS). A continuación se determina que parámetros del código mejor pueden representar la incertidumbre asociada a dichos fenómenos. A continuación se eligen experimentos de efectos separados para obtener los rangos de variación de cada parámetro seleccionado. Dado que el número de parámetros que se obtiene es elevado, se efectúa a continuación un análisis de sensibilidad con el fin de seleccionar únicamente los parámetros que son más relevantes para el parámetro crítico de seguridad dentro de sus respectivos intervalos de variación.

2.2. Metodología CSAU

La aplicación de la metodología CSAU se realiza en 3 elementos y 14 etapas que definen las tareas necesarias que han de completarse para obtener un resultado cuantitativo para el PCS y la incertidumbre asociada a dicho resultado (Martin y colaboradores 2005). La llave es centrarse en la identificación y caracterización de los fenómenos dominantes que influyen sobre el parámetro crítico de seguridad. El primer elemento de la metodología CSAU es el análisis de las capacidades del código, la etapa más crucial de este elemento es llevar a cabo una tabla de identificación de fenómenos y ranking de los mismos (PIRT), para todos aquellos fenómenos relevantes para el PCS. El segundo elemento es la evaluación y determinación del rango de variación de los parámetros. En este segundo elemento se determinan los rangos de incertidumbre de los parámetros del código basándose principalmente en datos de test de experimentos de efectos separados relevantes para los fenómenos considerados. En el tercer elemento de la metodología CSAU, conocido como “Sensibilidad y análisis de incertidumbres”, se determina en primer lugar la sensibilidad del PCS a los distintos parámetros dentro de sus respectivos rangos de variación, seleccionándose únicamente aquellos parámetros que presenten una sensibilidad al PCS por encima de un determinado umbral. Por ejemplo en el caso de un ATWS cuya PCS es la temperatura de la piscina de supresión, se seleccionó como umbral un efecto sobre la PCS de 0.4°C. Si el efecto era inferior a este valor no se consideraba dicho parámetro. A continuación y dentro de este mismo elemento se determina la incertidumbre global, combinando el efecto de las incertidumbres en los parámetros del código, con las incertidumbres en los parámetros de diseño y operacionales de planta, y con los sesgos si los hubiere.

2.3 Estructura del código y complejidad

Los códigos termo-hidráulicos como TRACE y TRAC son capaces de modelar una gran variedad de sistemas y fenómenos. Las componentes del sistema como tuberías, válvulas, etc..., se modelan generalmente en 1D, solamente la vasija se modela normalmente en 3D. Los modelos de estos códigos se construyen mediante componentes que representan determinados volúmenes de la planta, divididos a su vez en nodos, y conectados a otras

componentes mediante uniones. Existen también estructuras de calor asociadas a estos volúmenes hidráulicos, cuyo objeto es simular las estructuras sólidas ligadas a estos volúmenes y en las cuales se genera y/o se transmite calor.

Estos códigos resuelven las ecuaciones de conservación monofásicas o bifásicas de masa energía y momento acopladas a las ecuaciones de la transferencia de calor en el combustible y las estructuras. La característica de los códigos TH es que además de las mencionadas ecuaciones de conservación, estos códigos utilizan una gran cantidad de relaciones constitutivas y de cierre (correlaciones), por lo tanto se podría decir que una de las características de este tipo de códigos es su complejidad.

Cada escenario, por ejemplo un ATWS, tiene su propia sucesión de sucesos, lo que da origen a la observación de diferentes conjuntos de fenómenos cuando la planta evoluciona con el tiempo. El código TH cuando simula un determinado escenario usa diferentes conjuntos de modelos y correlaciones que varían con el tiempo, y que dependen de cómo progresa el transitorio. Por lo tanto los valores del PCS van a variar a lo largo del tiempo.

2.4 Selección de escenario y división del transitorio en fases

El escenario accidental estudiado fué un ATWS que se inicia por un cierre inadvertido de la válvula de aislamiento del vapor principal (MSIV). Este escenario se ha seleccionado como el más desfavorable de los diferentes escenarios que podrían llevarnos a un ATWS. En este escenario para un BWR se descarga una gran cantidad del vapor producido en el núcleo en la piscina de supresión (SP) a través de las válvulas de alivio y seguridad. Como consecuencia la temperatura de dicha piscina aumenta y la contención puede verse eventualmente calentada y presurizada.

Al aumentar la presión en la vasija se produce la activación de “runback” de la bomba de agua de alimentación, y por tanto el nivel de agua en la vasija decrece rápidamente. Para evitar esta situación se toman dos acciones: i) el disparo de las bombas de recirculación, ii) la activación de la inyección de seguridad de alta presión en el núcleo.

Puesto que estas acciones no son suficientes para controlar el ATWS, se inyecta una solución de agua borada, a través de la línea del sistema HPSCS, a los 300 segundos del comienzo del transitorio que produce una parada rápida y efectiva del reactor. El sistema de control de boro líquido (SBLC) contribuye a mantener el reactor en estado subcrítico. El código TRAC-BF1 con el modelo de planta desarrollado por IBERINCO e IBERDROLA se usó para efectuar los cálculos del ATWS (Escrivá y colaboradores 2000).

El escenario se dividió en tres fases fenomenológicas caracterizadas por una serie de fenómenos en cada fase:

- 1- Desde el cierre de la válvula MSIV ($t=0.0$ s) a la activación del sistema ECCS de inyección de seguridad y refrigeración de emergencia del núcleo en $t=124$ s.
- 2- Desde la activación del sistema ECCS al comienzo de la inyección de seguridad de boro en $t=300$ s.
- 3- Desde el comienzo de la inyección de seguridad de agua borada hasta el final del transitorio cuando el nivel de agua en el down-comer alcanza el nivel L8 y se produce la señal de nivel alto.

Si graficamos la temperatura de la piscina de supresión (SP) obtenida con TRAC-BF1 en función del tiempo, usando para los parámetros y condiciones de contorno del modelo TH valores “best-estimate” (BE). Se observa en la figura 1 que la temperatura de la piscina SP evoluciona con tres pendientes distintas durante las tres fases.

Durante la primera fase la potencia del reactor es mayor que durante el resto de fases pero pronto empieza a disminuir debido a la pérdida de inventario en el núcleo, producida por el “runback de las bombas de agua de alimentación”, y la transferencia al régimen de baja velocidad de las bombas de recirculación. Estos hechos combinados con la descarga de vapor a través de las válvulas de alivio y seguridad (SRV) producen una reducción del inventario y la presión en el núcleo y un aumento de la fracción de huecos, lo que reduce la potencia vía la realimentación por fracción de huecos.

Durante el ciclado de las válvulas SRV, se descarga una gran cantidad de vapor en la piscina SP, lo que produce un gran aumento de temperatura en la misma con una gran pendiente como se muestra en la figura 1. Durante la segunda fase los sistemas de rociado del núcleo a alta presión (HPCS) y de aislamiento y refrigeración del núcleo (RCIC) inyectan agua en el nivel axial 8 de la vasija en el núcleo, y en el downcomer respectivamente. La potencia del reactor también disminuye durante esta segunda fase y por lo tanto la cantidad de vapor descargada en la piscina SP y el aumento de temperatura de la misma son menores. Durante la tercera fase tiene lugar la inyección de boro a través del sistema HPCS lo que detiene la reacción en cadena y solo queda el calor residual de desintegración por lo que la temperatura no cambia prácticamente.

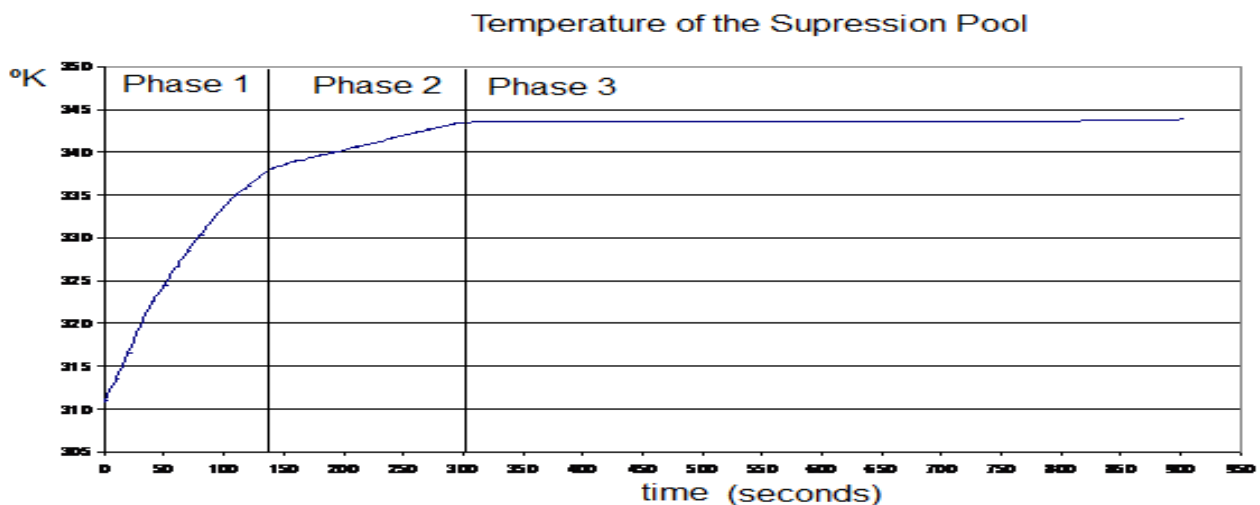


Figura 1. Evolución de la temperatura en la piscina de supresión durante un ATWS en la C.N. de Cofrentes, utilizando el código TRAC-BF1.

2.5 Selección de los parámetros de entrada y de los modelos para el análisis de incertidumbre.

La selección de los fenómenos más importantes con respecto al criterio primario de seguridad se realizó llevando a cabo en primer lugar una plantilla de todos los fenómenos que podían tener lugar durante las distintas fases de un ATWS. Una vez identificados todos los fenómenos y elaborada una breve descripción de cada uno de ellos se llevó a cabo un PIRT (“Phenomena Identification and Ranking Table”) en el cual se valoró la importancia de cada fenómeno por distintos expertos de tres organizaciones, Universidad

Politécnica de Valencia, Consejo de Seguridad Nuclear e IBERDROLA Ingeniería y Construcción. De esta forma se clasificaron los fenómenos según su importancia durante cada una de las tres fases en que se dividió el transitorio. A cada fenómeno se le asignó una importancia alta (A), Media (M) o baja (B) durante cada una de las fases según la opinión de los expertos. Cada experto además debía emitir un juicio razonado sobre cada valoración con el fin de evitar la arbitrariedad en las mismas y que tuviesen una justificación racional.

La siguiente etapa fue seleccionar todas las posibles fuentes de incertidumbre, estas fuentes de incertidumbre fueron clasificadas en cuatro grupos para el escenario del ATWS y cada grupo dividido en varios subgrupos:

- i) incertidumbres en el modelo de planta y condiciones de contorno
- ii) incertidumbres en las propiedades físicas
- iii) Incertidumbres en las relaciones de cierre y modelos físicos
- iv) Nodalización e incertidumbres numéricas

Se pasó luego a analizar aquellos fenómenos de importancia alta durante alguna de las fases del transitorio y luego pasamos a los de importancia media y se omitieron los de importancia baja durante las tres fases. Dentro de los fenómenos incluidos en cada subcategoría se estudió que parámetro o parámetros de entrada o de los propios modelos o correlaciones del código TRAC-BF1 podían utilizarse para tener en cuenta la incertidumbre asociada a ese determinado modelo que representa un fenómeno específico en el escenario del ATWS. Se generaron un total de 9 tablas para el escenario del ATWS, cada tabla contiene una serie de fenómenos identificados en el PIRT, la puntuación de cada fenómeno durante cada fase del escenario y la identificación del parámetro o parámetros del código donde es posible llevar a cabo el análisis de sensibilidad. Como ejemplo se muestran en la tabla 1, los resultados del PIRT para los fenómenos relacionados con la caída de presión y el comportamiento del flujo en los canales del reactor. Existiendo otras tablas para los distintos grupos de fenómenos.

Tabla 1. Fenómenos relacionados con el comportamiento del Flujo y la caída de presión

Categorías	Subcategoría	Valoración PIRT Fases 1-2-3	Análisis Sensibilidad y comentarios sobre las correlaciones o modelos
Fenómenos relacionados con la caída de presión y el flujo másico monofásico y bifásico	Factores de pérdidas de forma a la entrada y salida de los canales	M-M-B Importancia media según Wulff 6/10 y 6.4/10	En este caso la incertidumbre afecta a coeficiente de fricción de pérdidas de forma FKLOSS a la entrada y salida del canal.
	Factores de pérdidas de forma debidos a los espaciadores	M-M-B	Afecta a los coeficientes FKLOS y RKLOS de pérdidas debidas a los espaciadores
	Pérdidas debidas a la	M-M-B	En este caso la incertidumbre afecta a los coeficientes de fricción del líquido

	fricción con las paredes		<p>con la pared y del gas con la pared. Los factores de fricción dependen del número de Reynolds y la Rugosidad relativa, mediante la fórmula para régimen turbulento monofásico en tubería lisa:</p> $f_{1\phi} = \left[\frac{0.28}{\log \text{Re} - 0.82} \right]^2$ <p>En tubería rugosa con $\xi = 2\varepsilon / D_h$, la fórmula es</p> $f_{1\phi} = \left[\frac{0.25}{0.87 - \log \xi} \right]^2$ <p>En el modelo de TRAC-BF1 se supone rugosidad relativa en los canales nula pero no así en las tuberías. Debemos hacer análisis de sensibilidad a las constantes 0.25 y 0.28 y a la rugosidad relativa</p>
	Pérdidas en régimen bifásico	M-M-B	<p>En el caso bifásico la caída de presión de fricción se ve modificada por el multiplicador de Hancox ϕ_{Hancox}^2.</p> <p>En el caso de pérdidas de forma se usa el multiplicador homogéneo ϕ_{HOM}^2.</p>
Régimen dinámico del flujo bifásico (comportamiento del flujo bifásico)	Fuerza entre-fases por unidad de volumen	A-A-M Según Wulff la importancia sería 6.2/10, 6.8/10	<p>En este caso la fuerza F_{lg} entre fases por unidad de volumen se supone viene dada por:</p> $F_{lg} = \bar{C}_i (\bar{V}_r)^N$ <p>En donde \bar{V}_r es la velocidad relativa promedio entre las fases:</p> $\bar{V}_r = C_1 V_g - C_0 V_l$ <p>N es un exponente que depende del régimen</p> <p>\bar{C}_i es un coeficiente que depende del régimen de flujo</p>

Así pues la selección de los parámetros que son importantes para el escenario elegido del ATWS se basa en tres criterios, el primero es el PIRT. En este PIRT se asigna un rango de importancia a cada fenómeno durante cada fase del escenario. Por ejemplo como se muestra en la tabla 1, un rango de importancia de M-M-B significa que el fenómeno en cuestión tiene una importancia media para el PCS durante la primera y segunda fase y baja durante la tercera. El segundo criterio para valorar la importancia de los fenómenos es la bibliografía sobre el tema, de esta forma puede verse si las conclusiones de PIRT concuerdan o no con las opiniones de otros expertos, y de esta forma tener en cuenta otros parámetros de entrada o de los modelos que no se han considerado importantes en la etapa previa.

El último criterio para seleccionar un parámetro es realizar un análisis de sensibilidad, el intervalo de variación de cada parámetro se estima bien basándose en los experimentos de efectos separados, o bien en las recomendaciones de la bibliografía y estudios previos realizados en los laboratorios nacionales, dado que existe una amplia bibliografía sobre el tema. Entonces una vez seleccionado el intervalo de variación para cada parámetro se ve como afectan las variaciones en dicho parámetro al PCS en el escenario considerado. En total para el ATWS seleccionamos 55 parámetros basándonos en los dos primeros criterios, a continuación se efectuó un análisis de sensibilidad. Para los casos estudiados en las diversas simulaciones del análisis de sensibilidad, se ha calculado la diferencia entre la temperatura de la piscina de supresión al final del transitorio ($t=1000$ segundos), en el caso en el cual se ha variado el valor del parámetro objeto de estudio, y la que tenemos en el caso base (correspondiente al caso del parámetro sin perturbar). De esta forma tenemos un criterio objetivo para medir la sensibilidad del parámetro crítico de seguridad respecto a dicho parámetro. Este análisis se realizó para todos los parámetros de entrada y de los modelos que se consideraron importantes tanto en el PIRT, como en la literatura abierta a la cual tuvimos acceso.

Tabla 2.3. Variables más sensibles ordenadas según su importancia en el estudio del transitorio.

Variable	Componente	Descripción	Casos	IMPORTANCIA	ΔT_{max}
TL	CONTAN	Temperatura piscina pozo húmedo	$\pm 1\%$, $\pm 5\%$	ALTA	14.0
CBOR	POWER	Coeficientes reactividad Boro	$\pm 25\%$, $\pm 50\%$, $\pm 75\%$, $+100\%$, $+150\%$	ALTA	13.3
Control T30	CONTROL	Caudal sistema HPCS -> (kg/s)	$\pm 10\%$, $\pm 30\%$	ALTA	6.0
RML	CONTAN	Masa inicial de líquido en la piscina del pozo húmedo	$\pm 1\%$, $\pm 5\%$	ALTA	1.50
TC	CONTAN	RHR Temperatura de refrigeración	$\pm 1\%$, $\pm 5\%$	ALTA	1.0
C ₁	htcor.f (293) htcor1.f (302)	Coef. de la correlación de Mac Adams. (C ₁ =0,13)	$\pm 10\%$, $\pm 30\%$, $\pm 50\%$ (0,065; 0,091; 0,117; 0,143; 0,169; 0,195)	ALTA	0.95
AVLVE	VALVE	Valve 30-SRV-1 área abierta	$\pm 10\%$, $\pm 20\%$	ALTA	0.70
Control T31	CONTROL	Caudal sistema RCIC -> (kg/s)	$\pm 10\%$, $\pm 30\%$	MEDIA	0.50
m	ccflck.f (65)	Valor de m en la correlación de Kutateladze (CCFL)	$\pm 1\%$, $\pm 5\%$	MEDIA	0.48
FKLOS	CHAN	Coef. de pérdidas de forma a la salida canal	$\pm 10\%$, $\pm 25\%$, $\pm 50\%$, $+100\%$	MEDIA	0.48
FKLOS	CHAN	Coef. de pérdidas de forma a la entrada canal	$\pm 10\%$, $\pm 25\%$, $\pm 50\%$, $+100\%$	MEDIA	0.40
F&R	CHAN	Coef. de pérdidas de forma en los espaciadores	$\pm 10\%$, $\pm 25\%$, $\pm 50\%$, $+100\%$	MEDIA	0.48

RADPW	CHAN	Fracción de potencia generada por el chan	-20%, +1%, +5%, +10%, +20%, +50%	ALTA	0.47
C ₄	htcor.f (793;909;1078; 1314) htcor1.f (813;826;827; 980;994;996; 1223;1238; 1240;1577)	Coef. De la Ec. De Bromley. (C ₄ =0,62)	±10%, ±30%, ±50% (0,310; 0,434; 0,558; 0,682; 0,806; 0,930)	MEDIA	0.46
CVOID	POWER	Coeficientes reactividad Fracción de Huecos	±10%, ±25%	MEDIA	0.43
C	chen.f (97) heatif.f (60) htcor.f (323) htcor1.f (333)	Coef. de la ecuación de Dittus-Boelter. (C=0,023)	±10%, ±30%, ±50% (0,0115; 0,0161; 0,0207; 0,0253; 0,0299; 0,0345)	MEDIA	0.40
ZPOWR	POWER	Densidad de potencia axial relativa	Triangular, barriga	MEDIA	0.40
CTF	POWER	Coeficientes reactividad Doppler	±10%, ±25%	MEDIA	0.40
AVLVE	VALVE	Valve 32-SRV-3 área abierta	±10%, ±20%	MEDIA	0.40
V _m	Choke.f (595)	Choked Velocity	±1%, ±5%	MEDIA	0.40
HGAP		Coeficiente de Transferencia del Huelgo	-80%, +900% (Wulff y colaboradores) En nuestro analisis de sensibilidad	MEDIA	0.40 0.26

Las variables de la tabla 2, son aquellas variables seleccionadas del PIRT y de la literatura abierta a las cuales el código termo-hidráulico es más sensible, en total tenemos 21 variables de entrada y de los modelos de los códigos, que se han clasificado en la tabla por orden de su sensibilidad al parámetro crítico de seguridad. Es decir las primeras son aquellas cuya variación tiene más influencia en dicho parámetro. No habiéndose considerado aquellas cuyo efecto es inferior a 0.4 °C.

3. LAS HERRAMIENTAS GEDIPA Y UNTHERCO PARA APLICAR LA METODOLOGÍA CSAU

3.1 La herramienta GEDIPA V2 para la determinación de los momentos y distribución de los parámetros de entrada a partir de conjuntos de datos

El objetivo básico del programa GEDIPA V2 es el análisis de conjuntos de datos de un parámetro o de varios parámetros de entrada a un código termo-hidráulico o de cualquier otro tipo con el fin de determinar que funciones de distribución siguen dichos parámetros. En la versión actual V2 GEDIPA aplica métodos basados en la función de distribución empírica para determinar si un determinado conjunto de datos sigue una distribución

determinada, en este caso los estadísticos que aplica GEDIPA V2 en su versión actual son los de Kolmogorov-Smirnov y el de Anderson-Darling de esta forma GEDIPA puede determinar con un determinado nivel de confianza si un determinado conjunto de datos sigue una distribución Gaussiana o Exponencial (Muñoz-Cobo y Mollá, 2010, 2011).

Además GEDIPA trata de determinar si existen correlaciones entre dichos parámetros de entrada, y al mismo tiempo obtiene intervalos de confianza para la media y la varianza de los distintos parámetros así como los llamados momentos L basados en la estadística del orden.

En primer lugar para cada conjunto de datos GEDIPA trata en primer lugar de caracterizar ese conjunto de datos para ello obtiene, su media, su varianza, su apuntamiento y su asimetría, así como sus momentos L hasta el cuarto orden, y sus momentos L relativos al de segundo orden L_2 .

Igualmente GEDIPA calcula los intervalos de confianza para la media y la varianza suponiendo que la distribución es Gaussiana, en caso de que no lo sea GEDIPA calcula intervalos de confianza conservadores para la media. Estos intervalos son válidos para el caso de cualquier función de distribución arbitraria cuya varianza sea finita. Por ejemplo GEDIPA calcula el intervalo de confianza de Guttman para la media deducido por Louis Guttman de la Universidad de Cornell en 1948. Este intervalo de confianza conservador, para el caso de cualquier variable aleatoria de varianza finita viene dado por la expresión:

$$\left\{ \bar{x}(i) - \frac{S(i)}{\sqrt{n_i}} \left[1 + \sqrt{\frac{2(1-\alpha)}{\alpha}} \right]^{1/2}, \bar{x}(i) + \frac{S(i)}{\sqrt{n_i}} \left[1 + \sqrt{\frac{2(1-\alpha)}{\alpha}} \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

Esto significa que la probabilidad de que la media poblacional esté en este intervalo vale $1-\alpha$. Siendo $S^2(i)$ la varianza muestral del conjunto de datos i , n_i el número de datos de esa muestra y $\bar{x}(i)$ la media muestral.

3.2 Aplicación de los principios de máxima entropía (ME) y de máxima entropía relativa (MER) a los casos con información parcial: La herramienta UNHERCO para efectuar el muestreo por MONTE-CARLO.

Cuando se desconoce la función de distribución de un determinado parámetro o variable aleatoria se aplica el principio de máxima entropía. Si $P_K(k)$ es la función densidad de la variable aleatoria K , entonces C. Shannon define el concepto de entropía de la información H , como una medida de la incertidumbre asociada al resultado de un determinado proceso. Si K varía entre a y b , con $a > b$, la entropía de Shannon se define mediante la expresión:

$$H[P_K] = - \int_a^b P_K(k) \log P_K(k) dk \quad (2)$$

Generalmente se dispone de información estadística sobre los momentos de la distribución en la forma:

$$\int_a^b f_i(k) P_K(k) dx = \mu_i(f) \quad (3)$$

Para resolver este problema se usa cálculo de variaciones y el primer paso es construir un funcional con las restricciones impuestas por los momentos de la distribución:

$$F[P_K(k)] = \int_a^b dk [-P_K(k) \ln P_K(k)] + \sum_{i=0}^n \lambda_i \left[\int_a^b dk (f_i(k) P_K(k)) - \mu_i \right] \quad (4)$$

Buscamos entonces la función $P_K(k)$ y las constantes λ_i tales que obtengamos un extremo del funcional $F[P_K]$. Con el fin de encontrar este extremo se considera una perturbación $\alpha \delta P_K(k)$ que sea cero en los puntos a y b . Se utiliza ahora el calculo de variaciones y se calcula la variación primera de $F[P_K]$ y se iguala a cero obteniéndose:

$$\delta F = \left[\frac{\partial F(P_K(k) + \alpha \delta P_K(k))}{\partial \alpha} \right]_{\alpha=0} = 0 \Rightarrow \delta F = \int_a^b \delta P_K(k) \left(-\log(P_K(k)) - 1 + \sum_{i=0}^N \lambda_i f_i(k) \right) dk \quad (5)$$

Dado el caracter arbitrario de las perturbaciones, se obtiene a partir de (5) el siguiente resultado:

$$P_K(k) = \exp \left\{ -1 + \sum_{i=0}^N \lambda_i f_i(k) \right\} \quad (6)$$

Los valores de las constantes se obtienen a partir de las condiciones de restricción dadas por la ecuación (3).

El principio de máxima entropía relativa (MER) se aplica para actualizar la función densidad de un determinado parámetro cuando se conoce nueva información. Supongamos que un determinado parámetro tiene una función densidad desconocida $q(k)$ en el intervalo $[a, b]$. Supongamos que tenemos una estimación previa o "a priori" $p(k)$ de la verdadera función densidad. Entonces "a posteriori" se ha obtenido nueva información como por ejemplo determinados momentos de la función densidad desconocida. El objetivo es actualizar la función densidad previa $p(k)$ utilizando la nueva información, esto se logra utilizando el principio MER. En este caso la entropia relativa y las restricciones son:

$$S(q,p) = - \int_a^b q(k) \log \left[\frac{q(k)}{p(k)} \right] dk \quad ; \quad E(f_j) = \int_a^b dk f_j(k) q(k) = \mu_j \quad (7)$$

Primero construimos el siguiente funcional:

$$F(q,p) = - \int_a^b q(k) \ln \left[\frac{q(k)}{p(k)} \right] dk + \sum_{i=0}^N \lambda_i \left[\int_a^b f_i(k) q(k) dk - \mu_i \right] \quad (8)$$

A continuación buscamos la función extremo que maximiza dicho funcional $F(q,p)$, usando para ello cálculo de variaciones y obteniendo el siguiente resultado:

$$q(k) = p(k) \exp \left\{ -1 + \sum_{i=0}^N \lambda_i f_i(k) \right\} \quad (9)$$

Los valores de los parámetros $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots$ se pueden obtener a partir de las ecuaciones de restricción (7), para lo que en general debe resolverse un sistema algebraico no lineal.

Hemos aplicado el principio de la máxima a los siguientes casos que se presentan frecuentemente en las aplicaciones:

i) Caso en que únicamente se conocen los límites inferior y superior $[a,b]$ del intervalo de variación del parámetro, en este caso la aplicación del principio de ME da para dicho parámetro una distribución uniforme en el intervalo $[a, b]$.

ii) Los límites inferior y superior de la distribución son $[0,\infty)$ y conocemos la media, en este caso la aplicación del principio de máxima entropía da la distribución exponencial.

iii) Los límites inferior y superior de la distribución son $(-\infty,\infty)$ y solamente conocemos la media y la varianza, en este caso la aplicación del principio de ME da como resultado la distribución Gaussiana.

iv) Los límites inferior y superior del soporte de la distribución son $[a, b]$, y conocemos también el valor medio, entonces la aplicación del principio de la máxima entropía da una función densidad que es una exponencial truncada.

v) Los límites inferior y superior del soporte de la distribución son $[a, b]$, y la media es $(a+b)/2$, y conocemos también la varianza, en este caso la aplicación del principio de ME da una distribución Gaussiana truncada.

vi) Los límites inferior y superior del soporte son $[0, \infty)$ y conocemos también $\langle \log k \rangle = \mu_{\log}$ y $\langle (\log k - \mu_{\log})^2 \rangle = \sigma_{\log}^2$, entonces aplicando el principio de ME se obtiene una distribución log-normal.

vii) Los límites inferior y superior del soporte son $[0, \infty)$ y conocemos el primer momento $\langle k \rangle = \mu_1$ y $\langle \log k \rangle = \mu_{\log}$ entonces aplicando el principio de ME, se obtiene que la función de distribución es una función gamma.

Así pues de esta forma según el conocimiento parcial que tengamos sobre el parámetro en cuestión podemos calcular su función de distribución aplicando el principio de ME. Obviamente si a partir del conjunto de datos disponible sobre el parámetro podemos obtener que función de distribución sigue este aplicando tests como los de Kolmogorov-Smirnov o el de Anderson-Darling entonces no es necesario aplicar estos métodos.

La herramienta UNTHERCO para efectuar el muestreo por Monte-Carlo

Si conocemos la función de distribución de todos y cada uno de los parámetros de entrada y de los modelos que son importantes para el PCS, entonces debemos generar N_c conjuntos de datos muestreando mediante Monte-Carlo sobre la función de distribución que sigue cada parámetro individual. El número de conjuntos de datos se obtiene mediante la aplicación de las fórmulas de Wilks y Wald y depende del número de parámetros críticos de seguridad, el grado de tolerancia y la confianza. Si la función de distribución de algún parámetro es desconocida, entonces debemos aplicar el principio de ME con el fin de averiguar con la información disponible sobre el mismo como límite inferior y superior del parámetro y momentos de la distribución conocidos que tipo de distribución sigue ese parámetro. A continuación le asignamos un código a esa función de distribución de forma que UNTHERCO pueda reconocer el tipo de distribución entre sus librerías de casos en los cuales es posible aplicar el principio de ME. Con ese código UNTHERCO solicita la información disponible sobre el parámetro, de forma que con el código y la información disponible UNTHERCO obtiene la función de distribución del probabilidad (FDP) del parámetro y efectúa el muestreo.

3.3 Determinación de la FDP de los parámetros seleccionados

El siguiente paso fue reunir la información disponible sobre cada parámetro con objeto de determinar su función de distribución de probabilidad. Este estudio se realizó para cada uno de los parámetros relevantes para el PCS, y que fueron seleccionados en la etapa previa. En este caso se usaron varias fuentes de información: i) la información suministrada por las comisiones reguladoras de los países con información disponible, ii) la información suministrada por la empresas explotadoras de centrales, iii) la información suministrada por laboratorios nacionales y disponible en determinadas bases de datos, iv) la información suministrada por suministradores de equipos para centrales, v) la información disponible en revistas de calidad contrastada del SCI, vi) los experimentos de efectos separados disponibles.

A continuación si existía suficiente información sobre un determinado parámetro porque se conocía su FDP o teníamos suficientes datos sobre la misma de forma que después de un análisis con GEDIPA V2 podíamos conocer su PDF, entonces se podía en este caso suministrar a UNTHERCO su PDF. Si la información disponible sobre el parámetro era parcial es decir se conocían únicamente algunos de los momentos de su distribución de probabilidad y los extremos inferior y superior del soporte de su distribución de probabilidad, entonces se podían aplicar los principios de ME o MER a dichos parámetros para obtener su FDP. Con esta información se elaboró una serie de tablas que contenían funciones de distribución de probabilidad conservadoras para los distintos parámetros generalmente en forma de multiplicadores de los mismos. Por ejemplo en la tabla 3, se muestran las distribuciones obtenidas para los distintos coeficientes de pérdidas en los canales

Tabla 3. FDP de los parámetros seleccionados relacionados con la pérdida de carga en los canales con la incertidumbre en forma de factores multiplicadores.

Variable (número)	Componente	Descripción	Distribución	Rango	Observaciones
FKLOS (13)	CHAN	Coef. de pérdidas de forma a la salida canal	Exponencial truncada decreciente (ME) $\mu(f_{FKLOSS}) = 1$	[0.67, 1.5]	Factor Multiplicador
FKLOS (14)	CHAN	Coef. de pérdidas de forma a la entrada del canal	Exponencial truncada decreciente (ME) $\mu(f_{FKLOSS}) = 1$	[0.67, 1.5]	Factor Multiplicador
FKLOS (15)	CHAN	Coef. de pérdidas de forma en los espaciadores	Exponencial truncada decreciente (ME) $\mu(f_k) = 1$	[0.67, 1.5]	Factor Multiplicador

4. RESULTADOS DEL ATWS Y DISCUSIÓN

Entonces con UNTHERCO V1 efectuamos el muestreo por MONTECARLO y generamos 79 conjuntos de valores de los parámetros seleccionados. Este número se obtiene con la

fórmula de Wilks para un parámetro crítico de seguridad con un 96% de cubrimiento y un nivel de confianza del 96%, y un intervalo de tolerancia de un lado. A continuación ejecutamos el código TRAC-BF1 79 veces cambiando las entradas y los parámetros de los modelos por los valores de los correspondientes parámetros previamente obtenidos mediante muestreo por MONTECARLO con el código UNTHERCO. A continuación para cada conjunto de valores de los parámetros, ejecutamos un transitorio nulo con objeto de obtener las condiciones de estado estacionario para cada uno de dichos conjuntos de valores. Desde este estado inicial, que es diferente para cada uno de estos 79 conjuntos de valores de los parámetros ejecutamos el ATWS con las condiciones de contorno seleccionadas y guardamos la evolución del parámetro crítico de seguridad (PCS). Graficamos a continuación el valor del PCS en función del tiempo para los distintos casos obtenidos y el resultado se muestra en la figura 2. También se graficó en la figura 3 el incremento de temperatura que experimenta la piscina de supresión en función del tiempo para los distintos casos.

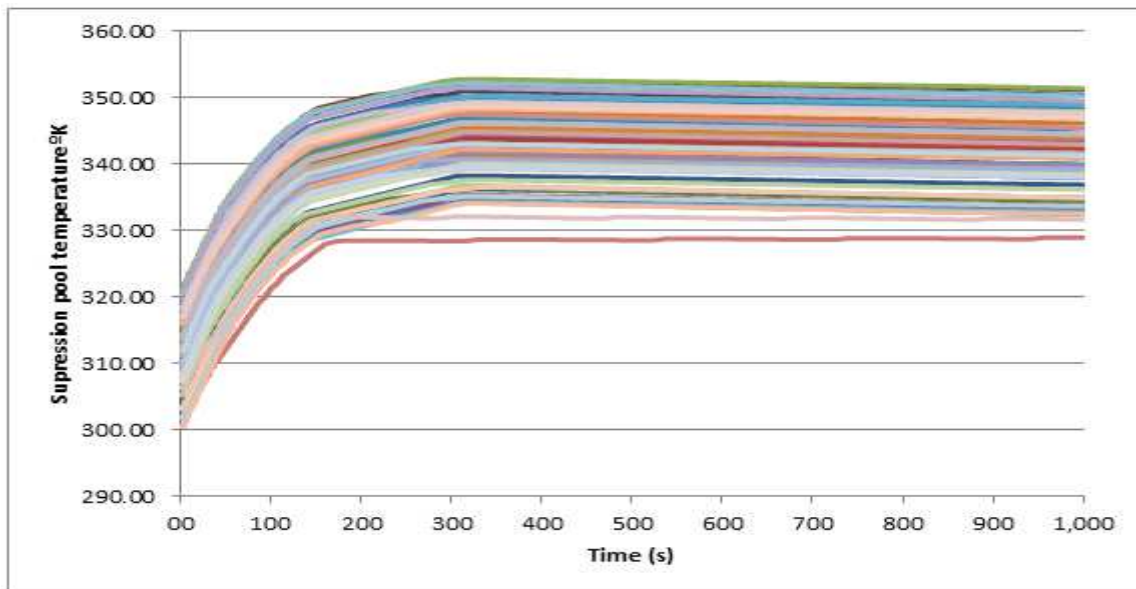


Figure 2 Evolución de la temperatura de la piscina de supresión durante un ATWS para los distintos valores de los parámetros de entrada muestreados por MONTECARLO.

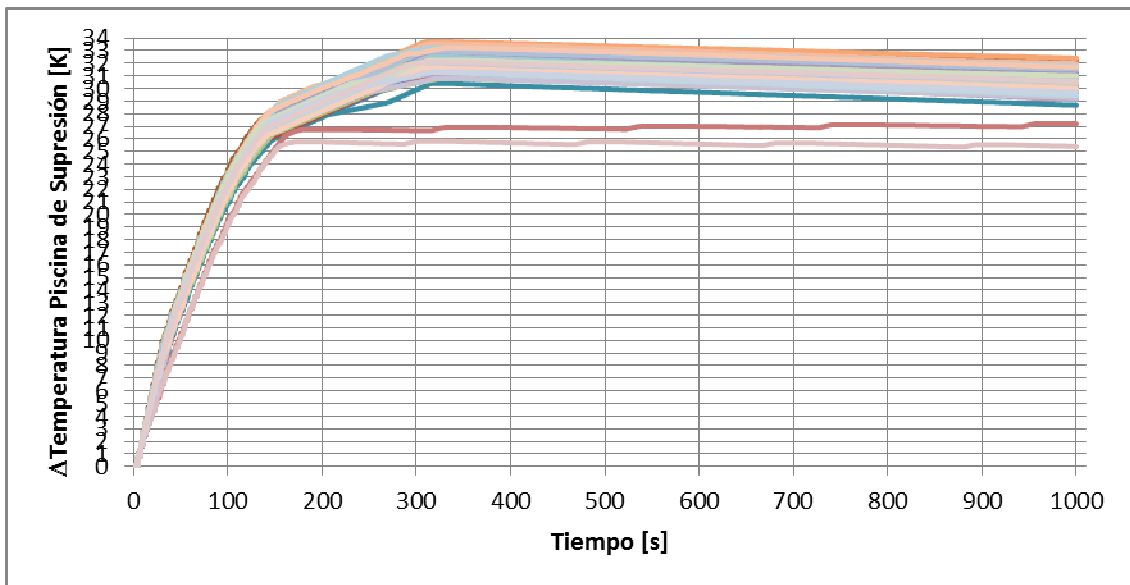


Figura 3. Evolución del incremento de temperatura ΔT de la piscina de supresión con el tiempo durante un ATWS, para el caso base y los distintos casos obtenidos mediante muestreo por MONTECARLO mediante el programa UNTHERCO V1.

Por último la temperatura máxima en la piscina de supresión se alcanza en el instante 312 segundos, poco después del comienzo de la inyección de boro y su valor es de 352,8 °K (79,65 °C), dicho valor cubre conservadoramente más del 95% de los casos con un nivel de confianza superior al 95%. Por lo tanto no se alcanza la temperatura de cavitación de las bombas del sistema de inyección de seguridad que está fijada en 85 °C.

5 CONCLUSIONES

El primer asunto importante discutido en esta ponencia fue la selección de los parámetros de entrada y de los modelos que más influyen en la temperatura de la piscina de supresión, que es el PCS para el caso de un ATWS. Esta selección de los parámetros se efectuó de la siguiente manera, primero se realizó un PIRT y se consideraron los fenómenos más importantes desde el punto de vista del PCS durante las tres fases del transitorio. El siguiente paso fue seleccionar en el código TRAC-BF1 los parámetros de entrada y de los modelos que mejor representan los fenómenos relevantes, de esta forma se obtuvo una primera lista de parámetros relevantes para el ATWS, estos parámetros fueron valorados según su importancia para el parámetro crítico de seguridad (PCS).

La siguiente etapa fue realizar un análisis de sensibilidad con los parámetros seleccionados previamente. El intervalo de variación de los parámetros seleccionado para realizar el análisis de sensibilidad, se seleccionó de forma que se cubrieran conservadoramente las incertidumbres en los valores de los parámetros deducidas a partir de experimentos de efectos separados e integrales, la literatura abierta y la información suministrada por las utilidades y organismos reguladores. Cuando el cambio en la temperatura de la piscina de supresión producido por el cambio de un determinado parámetro era menor de 0.4°C consideramos que la sensibilidad a este parámetro era pequeña y este parámetro no se tuvo en cuenta para la siguiente etapa. El número final de parámetros seleccionados fue de 21, dándose un listado de los mismos en la tabla 2.

La siguiente etapa consistió en tratar de obtener la función de distribución de probabilidad que sigue cada parámetro. Con este objetivo se realizó un estudio exhaustivo para cada parámetro seleccionado, usando en este estudio toda la información disponible sobre cada parámetro. La información que se usó provenía de las siguientes fuentes: i) experimentos de efectos separados, ii) literatura abierta, iii) información de suministradores y compañías eléctricas, iv) información proveniente de informes de laboratorios nacionales, v) Información proveniente de informes de organismos reguladores.

A continuación si se disponía de suficiente información sobre un determinado parámetro, y utilizando esta información podíamos deducir utilizando GEDIPA la FDP del parámetro en cuestión, entonces se podía suministrar al programa que realiza el muestreo (UNTHERCO), toda la información relevante sobre la función de distribución que sigue el parámetro. Si la información disponible sobre el parámetro era parcial y conocíamos únicamente algunos de los momentos de su FDP, y el intervalo soporte de su función de distribución de probabilidad entonces se podía aplicar el principio de ME o el de MER, con el fin de obtener su FDP en el primer caso o actualizar la FDP en el segundo.

Este análisis lo llevamos a cabo para cada uno de los 21 parámetros seleccionados, como resultado de este análisis obtuvimos un conjunto de tablas conteniendo toda la información relevante sobre cada parámetro y su FDP deducida a partir de los datos o utilizando el principio de ME.

Por lo tanto los principales logros y conclusiones de esta ponencia ha sido el desarrollo de dos herramientas auxiliares basadas en métodos estadísticos y de teoría de la información para ayudar en el cálculo de las FDP que siguen los parámetros seleccionados y que mas influyen en el PCS. Estas herramientas también permiten actualizar la FDP, cuando se dispone de nueva información sobre un determinado parámetro. En este caso debe aplicarse el principio de máxima entropía relativa MER.

La aplicación de los métodos de la estadística del orden se aplicó al caso de un ATWS con un nivel de cubrimiento y confianza del 96/96, siendo el número de casos ejecutados de 79. El muestreo por Monte-Carlo se efectuó con el programa UNTHERCO y se efectuó un análisis de correlación de Pearson para saber si había alguna correlación espúrea entre los parámetros muestreados. Al final se obtuvo que la máxima temperatura en la piscina de supresión durante un ATWS se alcanza a los 312 segundos del inicio de transitorio, unos segundos después de inicio de la inyección de boro, y el máximo valor alcanzado fue de 352.8°K (79.65°C), este valor cubre el 96% de los casos, con un nivel de confianza del 96%. Por lo tanto no se alcanza la temperatura de cavitación de las bombas fijada en 85°C.

REFERENCIAS

- A. Escrivá, M.D. Bovea, G. Verdú, J. L. Muñoz-Cobo, F. Castrillo, “cofrentes NPP ATWS Analysis with TRAC-BF1”, Report NUREG IA-0178, 2000.
- H. Glaeser, et al., “GRS Analysis for CSNI Uncertainty Methods Study”, Report of the Uncertainty Methods Study for Advanced Best Estimate Thermal Hydraulic Code Applications, Feb. 1998
- H. Glaeser H, “BEMUSE phase VI”, Report NEA/CSNI/R (2011).

- A. Guba, M. Makai, M., L. Pal, "Statistical Aspects of BE Methods"; Reliability Engineering and System Safety, Volume 80, pp 217-232, (2003)
- R.P. Martin, L.D. O'Dell, "AREVA realistic large break LOCA analysis methodology", Nuclear Engineering and Design 235, pp 1713-1725, 2005.
- R.P.Martin, W.T.Nutt, "Perspectives on the application of order statistics in BEPU nuclear safety analysis". Nucl. Eng. And Des. Vol 241, pp 274-285, 2011.
- J.L. Muñoz-Cobo, D. Mollá, D., Documento CSAU-II/E 2.1 "Análisis de Incertidumbres en los parámetros de Entrada y en los parámetros internos de los códigos termo-hidráulicos". Documento GTIN-10/03. Octubre 2010
- J.L. Muñoz-Cobo, D. Mollá, Documento CSAU-II/E2.2 "Evaluación de Incertidumbres en Códigos Termo-Hidráulicos". Documento GTIN-10/04. Octubre 2010.
- J.L. Muñoz-Cobo, D. Mollá, Documento CSAU-II/E-2.3.1, "Fundamentos y Manual del Programa UNTHERCO V1: Unthertainty in Thermal-Hdraulic Codes". 2011
- J.L. Muñoz-Cobo, D. Mollá, Documento CSAU-II/E-2.3.2 "Fundamentos y Manual del Programa GEDIPA V1: Un Código para el Análisis de Parámetros y sus Incertidumbres". 2011
- A. Wald, Ann. Math Stat Vol 14, pag 45 (1943), Vol 17 pp 41 (1946)
- S.S. Wilks, Ann. Math Stat Vol 12 pag 41 (1941), Vol 13 pp 400 (1942)
- Muñoz-Cobo, J.L., Mollá, D., Documento CSAU-II/E 2.1 "Análisis de Incertidumbres en los parámetros de Entrada y en los parámetros internos de los códigos termo-hidráulicos". Documento GTIN-10/03. Octubre 2010
- Muñoz-Cobo, J.L., Mollá, D., Documento CSAU-II/E2.2 "Evaluación de Incertidumbres en Códigos Termo-Hidráulicos". Documento GTIN-10/04. Octubre 2010.
- Muñoz-Cobo, J.L., Mollá, D., Documento CSAU-II/E-2.3.1, "Fundamentos y Manual del Programa UNTHERCO V1: Unthertainty in Thermal-Hdraulic Codes". 2011
- Muñoz-Cobo, J.L., Mollá, D., Documento CSAU-II/E-2.3.2 "Fundamentos y Manual del Programa GEDIPA V1: Un Código para el Análisis de Parámetros y sus Incertidumbres". 2011
- Mollá, D., Escrivá, A., CSAU-II/E-2.4, "Análisis de Sensibilidad de los Parámetros de Entrada y de los Modelos". Informe GTIN-12/01. 2012.
- Pourgol, M., Mosleh, A., Modarres, M., "Integrated Methodology for Thermal-Hydraulic Code Uncertainty Analysis". CRR Report 2007-M3 (2007)
- Pourgol, M., "Integrated Methodology for Thermal-Hydraulics Uncertainty Analysis". Tesis Doctoral Universidad de Maryland (2007).