



## EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN EL RIESGO DE LA INCERTIDUMBRE EN LA FIABILIDAD HUMANA

Isabel Martón<sup>(1)</sup>, Matilde Saiz<sup>(1)</sup>, Ana I. Sánchez<sup>(2)</sup>, Sebastián Martorell<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Química y Nuclear

<sup>(2)</sup> Departamento de Estadística, Investigación Operativa Aplicadas y Calidad  
Universitat Politècnica de València

### RESUMEN

*El Análisis Probabilista de Riesgos (APR) es una técnica eficiente de análisis de riesgos de sistemas tecnológicos complejos, que permite el modelado de escenarios accidentales y el análisis cualitativo y el cuantitativo del riesgo de dichos sistemas. Su utilización está fuertemente arraigada para el estudio de la seguridad en la operación de las centrales nucleares (CCNN).*

*No obstante, los resultados de su aplicación se pueden ver cuestionados por la incertidumbre de los modelos y datos utilizados en su desarrollo, por lo que junto a dichos desarrollos del APR se requieren estudios específicos de análisis del efecto de las incertidumbres.*

*El error humano es uno de los factores principales que mayor contribución tienen sobre el nivel de riesgo, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo.*

*En esta ponencia se presenta una metodología para el tratamiento y análisis del efecto de las incertidumbres de modelo y parámetro asociadas a la representación de la fiabilidad humana dentro del APR. Se muestra un caso de aplicación centrado en la actuación del sistema de extracción del calor residual (RHR).*

### 1. INTRODUCCIÓN

El riesgo de accidente de una central nuclear se calcula mediante una técnica ampliamente extendida que se denomina "Análisis Probabilista de Seguridad" (APS). El APS es una técnica analítica de carácter probabilista que permite la integración de los aspectos de diseño y operación para evaluar el riesgo de la central.

La realización de los APS conlleva un estudio detallado de los sistemas que intervienen en la ocurrencia y mitigación de accidentes. Partiendo de la extensa familiarización con la planta, se llevan a cabo las tareas de selección de los sucesos iniciadores que deben considerarse, la evolución de los mismos (delineación de secuencias) y la determinación de los equipos y acciones de los operadores necesarios para su gestión, dando lugar al análisis de sistemas y al análisis de fiabilidad humana, respectivamente.

Los APS cuantifican el riesgo de la instalación en cuanto a la frecuencia anual de daño al núcleo (FDN) (nivel 1) y la frecuencia de excedencia de cada categoría de liberación (nivel 2). Sin embargo, el resultado del APS no es sólo la frecuencia de daño al núcleo global o por secuencias, sino una lista detallada de combinaciones de fallos de equipos (en demanda o en operación),



indisponibilidades por pruebas o mantenimiento y errores humanos que provocan el daño al núcleo.

Los errores humanos modelados en un APS incluyen errores que reducen la disponibilidad de sistemas, que tienen como resultado un suceso iniciador, que no impiden la progresión de un accidente o que empeoran la progresión de un accidente.

Se supone que los errores humanos pueden ocurrir antes de un suceso iniciador (pre-iniciadores), pueden causar el suceso iniciador (iniciadores) o pueden ocurrir después del suceso iniciador (post-iniciadores), mientras el personal de la planta está tratando de mitigar las consecuencias de un accidente.

El objetivo de esta ponencia es mostrar la metodología de evaluación del impacto en el riesgo teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a la fiabilidad humana. La incertidumbre aparece como consecuencia de la necesidad considerar el tiempo de actuación humana y su fiabilidad, de la que depende la recuperación de las funciones de seguridad alternativas previstas en el modelado de las nuevas funciones de seguridad necesarias. La actuación humana está contemplada en el Procedimiento de operación de emergencia aplicable a las secuencias accidentales estudiadas y que han sido consideradas en el APS de la central nuclear. Para su estudio, se ha tenido que caracterizar el error humano en el arranque del tren alternativo del RHR según los diferentes tiempos de actuación disponibles, que en algunos casos son bastante estrictos en función de tiempo de ocurrencia del suceso iniciador, y modelar su probabilidad. Los tiempos disponibles se han obtenido del análisis termo-hidráulico de las secuencias consideradas. Además se presenta un caso de aplicación centrado en la actuación del sistema de extracción del calor residual (RHR).

## 2. FIABILIDAD HUMANA. TIPOS Y CUANTIFICACIÓN

Una de las tareas asociadas a los Análisis Probabilistas de Seguridad consiste en el estudio de la influencia de fallos en las actuaciones de los operadores en la mitigación de los accidentes, y la cuantificación de la probabilidad de que esos fallos ocurran.

Las acciones que realizan los operadores se dividen en cinco categorías:

- **Categoría A:** Acciones que tienen lugar antes del suceso iniciador. Los errores asociados con estas acciones producen que equipos en espera no estén disponibles para realizar su función tal y como se espera tras la ocurrencia del suceso iniciador.
- **Categoría B:** Actuaciones humanas que inician un escenario, también denominados como sucesos iniciadores inducidos por humanos.
- **Categoría C1:** Son acciones realizadas por el operador de planta tras un suceso iniciador. Los operadores realizan el seguimiento de acciones que estas procedimentadas.
- **Categoría C2:** Se trata de acciones agravantes, en los que es necesario el diagnóstico de la situación
- **Categoría C3:** Son acciones de recuperación no procedimentada, acciones improvisadas de recuperación/reparación.

Las acciones de Tipo A normalmente afectan a equipos y/o componentes y por este motivo deben de analizarse detenidamente en el modelo de fiabilidad de los sistemas para obtener así todas las dependencias de actuaciones humanas posibles. Su contribución a la probabilidad de fallo está incluida en la probabilidad de fallo del componente y normalmente no se encuentran entre los contribuyentes al riesgo.

Ocurre algo parecido con las acciones de tipo B, ya que normalmente el efecto del error humano está incluido en la frecuencia de ocurrencia del suceso iniciador.

Las acciones de la categoría C representan el mayor reto en la cuantificación, acaparando toda la atención las acciones procedimentadas, las de la categoría C3, ya que normalmente aparecen en las secuencias de accidente que contribuyen en la cuantificación del riesgo de la planta. Por esta razón, en este trabajo se estudia, cuantifica y analiza más detalladamente el tipo de acciones de la categoría C3. En este caso, probabilidad de fallo en la actuación humana de un suceso básico se estima mediante el uso de árboles de error utilizando la metodología THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) de Swain y Guttman (1983), la cual sigue constituyendo una referencia fundamental para la obtención de las Probabilidades de Error Humano (PEH) para este tipo de acciones.

Para el caso que nos ocupa, las actuaciones dinámicas pertenecientes a la Categoría C, la disponibilidad de datos es muy limitada, pudiéndose considerar datos obtenidos de los registros de operaciones reales de emergencia así como en sesiones de entrenamiento, datos del entorno de trabajo por observación directa de las operaciones llevadas a cabo durante operación normal o mediante entrevistas y cuestionarios en todos los niveles de la organización y mediante bases de datos de reportes de accidentes, incidentes y sucesos operacionales.

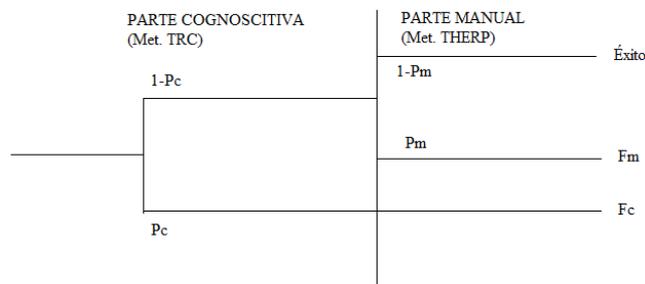
Cabe decir que existen en la bibliografía un conjunto muy amplio de metodologías disponibles actualmente para analizar y calcular la fiabilidad humana (NUREG/CR-1278, 2011) y en general la aplicación de los mismos se realiza desde enfoques mixtos en función del tipo de actuación considerada (Dougherty, E. et al, 1987). En el caso de las acciones humanas de la categoría C3, gracias a la fusión de las metodologías anteriormente señaladas, se puede tratar la dependencia temporal y transfórmala en probabilidad de error humano para poder evaluar el riesgo tanto de una secuencia como de daño al núcleo.

A continuación se describe como se realiza la cuantificación de la PEH en el análisis de la fiabilidad humana, haciendo uso mixto de las metodologías THERP y TRC (Time reliability correlation).

Las acciones humanas de categoría C se componen de una parte cognoscitiva y una parte manual. La parte cognoscitiva evalúa la probabilidad de error de no realizar la acción o de no hacerla en el tiempo disponible,  $P_c$ . La parte manual representa la probabilidad de error humano en la realización física de la acción,  $P_m$ . La cuantificación de la probabilidad de error se realiza mediante la metodología TRC, para la parte cognoscitiva, y la metodología THERP para la manual.

La metodología TRC se basa en suponer que la disponibilidad de tiempo de entendimiento y toma de decisiones es el factor fundamental del éxito en el

inicio de la respuesta adecuada por parte del operador ante una situación anormal o de emergencia.

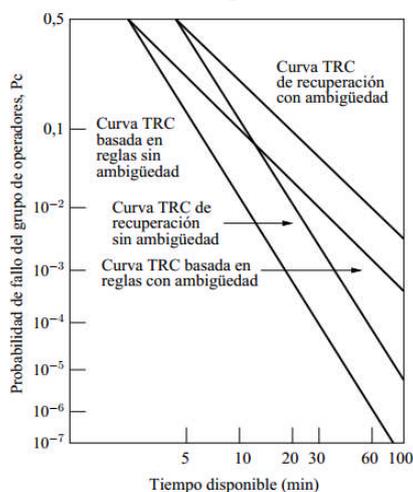


**Figura 1. Cálculo PEH de acción de categoría C**

Para la estimación de  $P_c$ , en la metodología TRC existen dos pares de curvas:

- Un par se aplica a los errores basados en reglas y la otra cuando la toma de decisiones se realiza bajo dudas. Este tipo de acciones se corresponden con los Tipos 3 y 4.
- El segundo par de curvas se utiliza cuando la diagnosis se realiza con ausencia de reglas, este es el caso de acciones de recuperación que se realizan después de un incidente y que además no están procedimentadas. Las acciones consideradas son las clasificadas como Tipo 5.

Una vez estimado el tiempo disponible para la acción, se puede calcular el valor de  $P_c$  a partir de las curvas de la Figura 2.



**Figura 2. Curvas de cálculo de la PEH empleadas en la metodología TRC**

El método TRC usa el Índice de Probabilidad de Éxito (SLI, Success Likelihood Index) que viene determinado principalmente por el Factor de Forma de Rendimiento (PSF, Performance Shaping Factor). Este PSF es algo que puede afectar a la habilidad de la persona para que continúe con la tarea y, para la aplicación del TRC, está caracterizado por el límite de tiempo, el diagnóstico, la toma de decisiones, el mando o control y la psicología.

Para la parte manual, el valor de  $P_m$  se obtiene aplicando la metodología THERP de Swain y Guttman (1983). El objetivo del método THERP es predecir

las probabilidades de error humano y evaluar el deterioro de un sistema individuo-máquina causado por los errores humanos.

Finalmente, la probabilidad de error humana vendrá dada por la siguiente expresión:

$$PEH = P_C + (1 - P_C) \cdot P_m \quad (1)$$

### 3. CASO DE APLICACIÓN

El caso de aplicación se centra en la secuencia del APS Pérdida del Tren RHR en Servicio en Modo 4 y Modo 5. El árbol de fallos de la secuencia accidental considerada se muestra en la Figura 3. La descripción de los cabeceros en los que se centra este caso de aplicación se muestra a continuación.

#### Cabecero W2

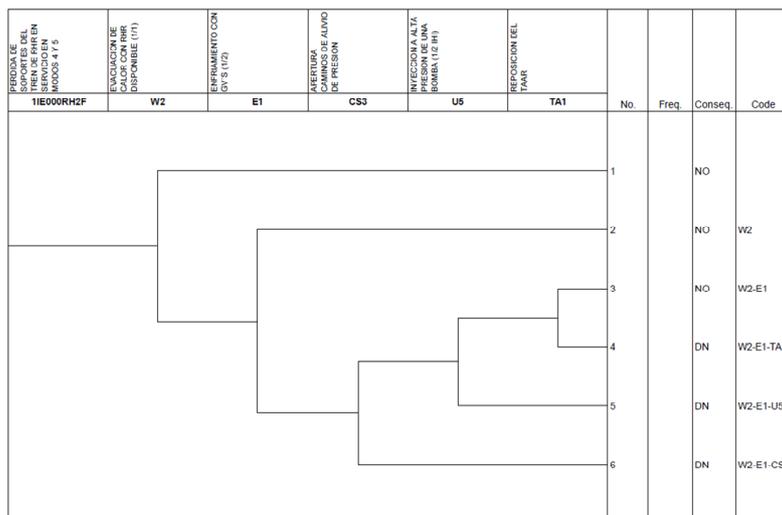
Ante una pérdida del tren de RHR en servicio, se originará baja presión en la descarga de la bomba afectada así como bajo caudal en la descarga del tren afectado. A continuación se pondrán en funcionamiento un conjunto de alarmas que harán presagiar que el RHR no funciona correctamente.

Ante dichas circunstancias, se producirá la apertura de las válvulas de recirculación de las bombas de RHR y la apertura de las válvulas de by-pass de los intercambiadores de calor. La pérdida del tren de RHR en servicio requiere la restitución de la función mediante la puesta en marcha del otro tren de RHR en reserva. Dado que cuando se establece la función RHR, quedan alineados ambos lazos del RHR, la restitución de la función exigirá la puesta en servicio del otro tren de RHR que estaba en reserva siguiendo el procedimiento de su puesta en servicio.

#### Cabecero E1

En caso de restablecimiento de la función mediante el tren en reserva, antes de que se superen las condiciones (presión y temperatura del SRR) de puesta en servicio del RHR, la planta se encontrará en situación estable, ya que para este escenario no se producen cambios significativos en el nivel del Sistema Refrigerante del Reactor (SRR). En caso de fallo de la restitución de la evacuación de calor mediante el tren de RHR en reserva, la función podrá recuperarse mediante la evacuación de calor a través del secundario con el inventario inicial existente en los generadores de vapor (GVs) (en conservación húmeda) y reposición del mismo (antes del secado de los GVs) mediante agua de alimentación auxiliar y control de enfriamiento con las válvulas de alivio de los mismos o mediante la posibilidad de recuperación del sistema RHR, si tras el enfriamiento mediante los GVs, se vuelven a dar las condiciones óptimas de temperatura y presión para tal caso.

Se ha tenido que caracterizar el error humano en el arranque del tren alternativo del RHR tras el suceso iniciador. Este error humano afectará tanto al cabero W2 como al cabecero E1, ya que el re arranque alternativo del tren RHR en reserva puede darse en los dos.



**Figura 3. Árbol de eventos Pérdida del Tren RHR en servicio**

La incertidumbre asociada al problema vendrá dada de dos fuentes totalmente diferenciadas, por un lado se abordará la incertidumbre de parámetro asociada a los datos temporales obtenidos gracias a la modelización de la secuencia termohidráulica, y por otro, se tratarán todos aquellos aspectos influyentes en la incertidumbre de parámetro relacionados con la utilización de metodologías de fiabilidad humana.

Siguiendo el método descrito en el apartado 2, a continuación se explican los pasos seguidos para la obtención de la PEH. El primer paso es la obtención de los tiempos disponibles de actuación antes de que se den las condiciones de presión y temperatura para que se pueda dar el arranque del tren RHR en reserva. Estos tiempos se obtienen de la simulación termo hidráulica de este escenario. Una vez se han obtenido las ventanas temporales se transforman estos tiempos en PEH según la metodología propuesta en el apartado 2.

En el presente estudio se han considerado tres ventanas temporales:

- TH1: tiempo para la puesta en servicio del RHR en reserva, es decir, la ventana de tiempo desde el inicio del Modo 4 hasta que se hayan superado las condiciones de presión y temperatura en el primario para su puesta en funcionamiento.

En la ventana temporal TH1 se ha introducido una partición en el tiempo, y por tanto, también en los valores de PEH referentes a cada partición temporal del propio TH1.

Las particiones temporales de TH1 que se consideran son las siguientes:

- Evaluación para TH1 < 6 min.
- Evaluación para TH1 > 6 min.
- TH2: El intervalo temporal disponible para la puesta en funcionamiento de los GVs y la reposición de los mismos mediante la triple AAA para llevar a la planta a condiciones estables.
- TH3: Esta ventana temporal se solapa con la ventana temporal TH2 y aparece cuando debido al enfriamiento con los GVs, se vuelven a dar en el primario las condiciones necesarias de presión y temperatura para la puesta en marcha del tren RHR en reserva.

Así, por tanto, la ventana temporal que evalúa el tiempo posible para la extracción de calor del primario mediante las válvulas de alivio de los

generadores de vapor en conjunto con la inyección mediante la bomba AAA sería finalmente TH2+TH3.

Una vez obtenidas las distintas ventanas temporales a partir de la simulación termohidráulica, éstas deben de ser transformadas en PEH según se establece en el apartado 2. Los resultados obtenidos para la PEH según la ventana temporal considerada para cada uno de las particiones anteriormente comentadas, se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. PEH obtenida para cada ventana temporal considerada**

Ventana Temporal	Media	Desviación Típica	95%	5%
<b>Distribución Log-normal</b>				
<b>TH1 &lt; 6min</b>	0.617	3.389	0.135	5.228·10 <sup>-3</sup>
<b>6min &gt; TH1</b>	0.131	14.030	0.186	7.96·10 <sup>-6</sup>
<b>TH2</b>	3.884·10 <sup>-5</sup>	0.233	1.045·10 <sup>-4</sup>	6.63·10 <sup>-12</sup>
<b>TH2+TH3</b>	6.642·10 <sup>-4</sup>	0.484	3.57·10 <sup>-4</sup>	2.322·10 <sup>-9</sup>

Las características principales de cada una de las ventanas temporales, así como a que cabecero y sistema afectan, se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Descripción de las ventanas temporales**

Ventana Temporal	Descripción	Cabecero	Sistema
<b>TH1</b>	Fallo del operador reposición sistema RHR	W2	RHR
<b>TH2</b>	Fallo del operador reposición sistema RHR	E1	RHR
<b>TH2+TH3</b>	Fallo del operador en arranque AAA	E1	AAA

Una vez obtenidas las PEH para cada una de las actuaciones humanas consideradas en la secuencia accidental considerada, se van a estudiar 3 casos diferenciados. El objetivo de este estudio radica en observar las diferencias en la frecuencia de daño al núcleo (FDN) que tiene tanto la secuencia considerada como la FDN total en función que se considere un caso u otro. Los casos considerados son los siguientes:

- Caso 1: Es posible la recuperación del tren RHR en reserva con una probabilidad de error humano media dada en el APS original.
- Caso 2: A consecuencia de la pérdida del tren de RHR en servicio, se requiere la sustitución de la función mediante la puesta en marcha del otro tren de RHR en reserva, considerándose la NO posible recuperación de este. En este caso se considerada que las PEH provenientes de las ventanas temporales TH1 y TH2 son igual a la unidad, es decir se considera fallo seguro del operador.
- Caso 3: Es posible la recuperación del tren RHR en reserva con una probabilidad de error humano modelada a partir del modelo de PEH mostrado en el apartado 2 utilizando los tiempos disponibles del termo hidráulico y cuyos resultados se muestran en la Tabla 1.

Los resultados de FDN para cada uno de los casos se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Resultados obtenidos**

	CASO 1	CASO 2	CASO 3
FDN <sub>SECUENCIA</sub>	3,84E-08	6,24E-06	3,68E-06
FDN <sub>TOTAL</sub>	1,63E-05	1,50E-03	2,04E-05

El caso 1, muestra los resultados obtenidos en el APS base sin introducir ningún cambio. Se ha evaluado la frecuencia de daño al núcleo aportada por la secuencia considerada y la total para la posterior comparación con los siguientes casos.

En el caso 2, la evaluación de la frecuencia de daño al núcleo se ha calculado considerando que la extracción de calor a través del RHR no pueda darse durante el cabecero W2 y el posterior re arranque en el cabecero E1. Los resultados de la Tabla 3 muestran que los valores de la FDN son mayores que para el caso base, siendo este un modelo más conservador. Este incremento de las FDN hace presagiar que la decisión de indisponibilidad del tren RHR en reserva debido al fallo debido a la acción humana en el cabecero W2 tiene un peso importante en el análisis.

Los valores de la FDN para el caso 3 son inferiores a los obtenidos para el caso 2, pero mayores que el caso 1. Este sería el caso más realista que se podría estudiar el cual hace necesario, aunque se eleve la complejidad del análisis, el incluir un estudio detallado de la fiabilidad humana en el APS teniendo en cuenta tiempos obtenidos de simulaciones termohidráulicas.

#### **4. CONCLUSIONES**

En la presente ponencia se presenta una metodología para el tratamiento y análisis de las incertidumbres de parámetro y modelo asociadas a la fiabilidad humana dentro del APS. También se muestra un caso de aplicación de esta metodología centrado en la actuación del sistema RHR. De los resultados obtenidos en este análisis se desprende la necesidad de estudiar y analizar en detalle la fiabilidad humana dentro del APS ya que las acciones humanas son una causa considerable en el aumento de la FDN tanto de una secuencia accidental como de la planta.

#### **5. BIBLIOGRAFIA**

NUREG/CR-1278 [2011] "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on NPP's Applications.

NUREG/CR-3010 [1982] "Post Event Human Decision Errors: Operator Action Tree/Time Reliability Correlation.

Swain A.D. and Guttman, H.E. [1983] Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications (NUREG/CR-1278, SAND800 200, RX, AN), Sandia National Laboratories.

Dougherty, E. and J. Fragola [1987] Human Reliability Analysis: A Systems Engineering Approach with Nuclear Power Plant Applications, Canada: John Wiley & Sons Ltd.

#### **AGRADECIMIENTOS**

El trabajo presentado forma parte del Proyecto de Investigación ENE2010-17449 dentro del Programa de Energía del Programa Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación.