

## **EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE SISTEMAS DE SEGURIDAD**

**Sebatión Martorell <sup>(1)</sup>, Isabel Martón <sup>(1)</sup>, Ana Isabel Sánchez <sup>(2)</sup>**

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

<sup>(2)</sup> Departamento de Estadística, Investigación Operativa Aplicadas y Calidad  
Universidad Politécnica de Valencia

### **RESUMEN**

*El APS (Análisis Probabilista de Seguridad) es una técnica eficiente de análisis de riesgos de sistemas que permite una evaluación cuantitativa del riesgo de operación de las centrales nucleares (CCNN). Actualmente, la mayoría de APS no tienen en consideración el envejecimiento de los equipos, sin embargo, como consecuencia de la edad actual de las plantas, resulta necesario incluir el efecto de la degradación de los Sistemas, Estructuras y Componentes en la cuantificación del riesgo con el objetivo de asegurar una operación segura de las CCNN. Así, en los últimos años, se han realizado diferentes estudios que se centran en como incluir el efecto del envejecimiento en el APS y su aplicación en la toma de decisiones informada en el riesgo.*

*En este contexto, el objetivo de la ponencia se centra en el desarrollo de modelos dependientes del tiempo que permitan considerar tanto el efecto del envejecimiento como de la mantenibilidad en la fiabilidad de los equipos y su impacto en la indisponibilidad. Dichos modelos permitirán evaluar el incremento en la Frecuencia de Daño al Núcleo (FDN) debido al envejecimiento de los componentes y proponer intervalos óptimos de pruebas de vigilancia y de mantenimiento preventivo.*

### **1. INTRODUCCIÓN**

El Análisis Probabilista de Seguridad (APS) es una técnica eficiente de análisis de riesgos de sistemas que permite una evaluación cuantitativa del riesgo de operación de las centrales nucleares (CCNN). En la actualidad el APS ha alcanzado un nivel suficiente de credibilidad para proporcionar información importante para aplicaciones tales como, por ejemplo, el análisis de especificaciones técnicas o la extensión de vida. No obstante, el APS cuenta con una serie de limitaciones relacionadas con las características del modelado, limitaciones en la modelización, fenómenos desconocidos que deben ser cuidadosamente tenidos en cuenta en la interpretación de los resultados obtenidos. Por otro lado, y puesto que la calidad del APS es importante para su uso en las diferentes aplicaciones resulta importante la actualización periódica del mismo para garantizar que el riesgo se mantiene en un nivel aceptable.

Actualmente, en las plantas se realizan actividades relacionados con la evaluación del envejecimiento en el marco de los programas de: Revisión periódica de seguridad, gestión de vida y extensión de vida. Los efectos del envejecimiento son variados [1]. Así, por ejemplo, a nivel de sistema el envejecimiento puede afectar a la indisponibilidad del mismo, podría incrementar la probabilidad de fallos de causas comunes o modificar la importancia de los componentes en la indisponibilidad. A nivel de planta, el envejecimiento puede modificar la probabilidad de sucesos iniciadores, la probabilidad de mitigación de sucesos no deseados como consecuencia de la indisponibilidad de sistemas de seguridad y las secuencias dominantes. Resulta, por tanto, necesario incluir en los modelos de fiabilidad y disponibilidad del APS el efecto del envejecimiento para garantizar el cumplimiento de los objetivos de seguridad durante la vida de las CCNN incluyendo la etapa de extensión de vida.

En este contexto, el objetivo de la ponencia se centra en el desarrollo de modelos de fiabilidad y disponibilidad los cuales incluyan tanto el efecto del envejecimiento como el asociado a la realización de prácticas de mantenimiento orientadas a mitigar y controlar dicho envejecimiento.

## **2. MODELO DE FIABILIDAD**

En el Análisis Probabilista de Seguridad (APS) la tasa de fallos  $\lambda(t)$  se asume que es constante de forma que  $\lambda(t) = \lambda_0$ . Para incluir, a nivel de componente, el efecto del envejecimiento en los modelos de APS la indisponibilidad debe ser evaluada a partir de modelos de fiabilidad con dependencia temporal, es decir, en función de la edad del componente. Diferentes modelos de fiabilidad con dependencia temporal han sido propuestos en la literatura. La selección del modelo más adecuado es función de aspectos tales como el tipo de componente, su modo de operación, los mecanismos de envejecimiento considerados o el mantenimiento que se le aplica. Por otro lado, la edad del componente es función de las actividades de mantenimiento que se realizan al mismo durante su vida. Por tanto, resulta necesario que los modelos incluyan el efecto que el mantenimiento tiene sobre la edad del componente y la fiabilidad.

Con el objetivo de incluir el efecto del mantenimiento en la edad del componente se ha adoptado un modelo de mantenimiento imperfecto. Los modelos de mantenimiento imperfecto se basan en la idea de que el mantenimiento mejora la edad del componente en función de la efectividad ( $\varepsilon$ ) del mismo para reducir el envejecimiento del equipo. Entre los diferentes modelos de mantenimiento imperfecto que existen se ha seleccionado el modelo "Proportional Age Reduction" (PAR), propuesto por [2].

Asumiendo que el tiempo durante el cual un componente está fuera de servicio como consecuencia de una actividad de mantenimiento es

despreciable comparado con el tiempo entre dos mantenimientos consecutivos, la edad del componente en el periodo  $m+1$  entre los mantenimientos  $m$  y  $m+1$  viene dada por:

$$w_{m+1}(t, \varepsilon) = w_m^+ + (t - t_m) \quad (1)$$

Donde  $w_m^+$  es la edad después del mantenimiento  $m$ ,  $t$  es el tiempo cronológico y  $t_m$  el tiempo en el cual se realizó la actividad de mantenimiento  $m$ -ésima. Asumiendo un modelo PAR la edad del equipo después del mantenimiento  $m-1$  viene dada por:

$$w_m^+ = (t - \varepsilon \cdot t_m) \quad (2)$$

En la literatura se han propuesto diferentes modelos de envejecimiento siendo los más comúnmente utilizados el modelo lineal, exponencial, Weibull. El modelo de envejecimiento lineal asume que la tasa de fallos se incrementa linealmente con el tiempo. La tasa de fallos viene dada por:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha \cdot t \quad (3)$$

Siendo  $\alpha$  la tasa de envejecimiento lineal. Sustituyendo en la Ecuación (3) el tiempo cronológico por la edad es posible incluir el efecto del mantenimiento en el modelo de tasa de fallos obteniendo

$$\lambda(w(t, \varepsilon)) = \lambda_0 + \alpha \cdot w(t, \varepsilon) \quad (4)$$

Sustituyendo (2) en (4) se obtiene la tasa de fallo inducida después del mantenimiento  $m$  como:

$$\lambda_{m+1}(w(t, \varepsilon)) = \lambda_0 + \alpha \cdot [w_m^+ + (t - t_m)] \quad (5)$$

Finalmente, a partir de la expresión correspondiente a  $w_m^+$ , dada por la ecuación (1) se obtiene:

$$\lambda_{m+1}(t) = \lambda_0 + \alpha \cdot (t - \varepsilon \cdot t_{m-1}) \quad (6)$$

La ecuación (6) presenta un modelo de tasa de fallos que incluye el efecto del envejecimiento, a partir de un modelo lineal, y el efecto del mantenimiento preventivo realizado al componente, el cual ha sido modelizado como un modelo PAR.

### **3. MODELO DE INDISPONIBILIDAD DEPENDIENTE DE LA EDAD**

La indisponibilidad es la probabilidad de que un componente esté indisponible. En el caso de componentes de seguridad, los cuales están

normalmente en espera, el componente está indisponible debido a fallos entre actividades o durante la realización de actividades de pruebas o mantenimientos. La indisponibilidad debida a fallos, es decir, la probabilidad que el componente falle entre actividades, es la expresión fundamental del modelo.

El modelo de indisponibilidad dependiente del tiempo para cada componente considera que el componente se encuentra normalmente en espera, es por ello que la probabilidad de que un componente falle mientras está en espera aumenta con el paso del tiempo desde la última prueba, como una función de su tasa de fallos en espera. Esta contribución es restaurada a cero, a excepción de la contribución por demanda, después de la ejecución de la prueba. En el caso de una actividad de mantenimiento preventivo se asume que el componente es sometido a una prueba funcional con lo que la indisponibilidad después de la realización del mismo es también restaurada a cero. Durante la ejecución de la prueba y/o mantenimiento el componente se encuentra indisponible.

Asumiendo que  $\lambda < 0.1$  el modelo de indisponibilidad viene dado por [3]:

$$u(w_m, w) = \rho_0 + \int_{w_m}^w \lambda(w_m, w') dw' \quad (7)$$

A partir de la Ecuación anterior sustituyendo la expresión correspondiente a la tasa de fallos dada en la sección 2 e integrando se obtiene:

$$u(w_m, w) = \rho_0 + \lambda_0(w - w_m) + \frac{1}{2}(w^2 - w_m^2) \quad (8)$$

Expresión que permite modelizar la indisponibilidad de un componente sometido a pruebas de vigilancia y/o mantenimiento preventivo por tiempo. Las expresiones correspondientes a la edad se obtienen a partir de las Ecuaciones (1) y (2).

A partir de la Ecuación (8) es posible obtener la indisponibilidad media debida a fallos entre dos actividades consecutivas como:

$$u(t_m) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t_m, t) dt \quad (9)$$

Donde  $u(t_m, t)$  se obtiene a partir de la Ecuación (8) y las expresiones correspondientes a la edad dadas por las Ecuaciones (1) y (2). Finalmente, es posible obtener un valor de la indisponibilidad media promediando sobre la vida del componente:

$$u_{media} = \frac{1}{L-T} \int_0^{L-T} u(t_m) dt_m \quad (9)$$

## 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN

En esta sección se presentan ejemplos de aplicación del modelo presentado a una motoválvula perteneciente a un sistema de seguridad de una CN cuyos parámetros de fiabilidad e indisponibilidad junto a los intervalos de pruebas y mantenimiento se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Parámetros de indisponibilidad y fiabilidad**

$\rho$	$\lambda_0$ ( $h^{-1}$ )	$\alpha$ ( $h^{-1}a^{-1}$ )	T (h)	M (h)	$\varepsilon$
1E-4	5.83e-6	1.1E-6	2184	4320	0.65

El valor de la tasa de envejecimiento  $\alpha$  se ha obtenido desde la base de datos de NUREG/CR-5248, conocida como TIRGALEX [4]. Las tasas de envejecimiento que se presentan en esta base de datos son tasas genéricas. Considerando el TIRGALEX el valor correspondiente a  $\alpha$  para motoválvulas es igual a  $10^{-6} h^{-1}años^{-1}$ .

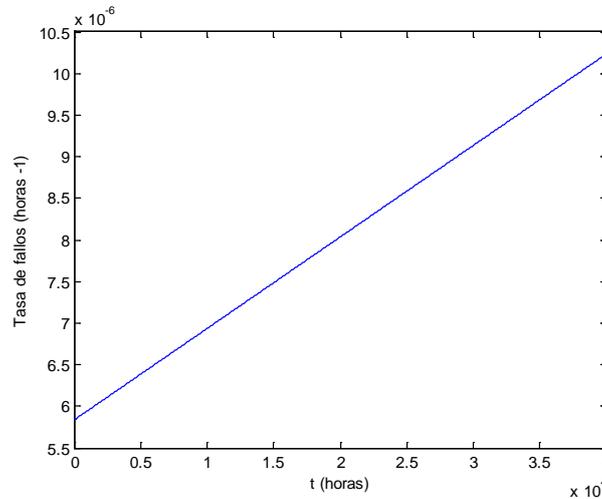
Se han considerado dos estrategias diferentes de pruebas de vigilancia y mantenimiento del componente. La primera estrategia asume que únicamente se realizan pruebas de vigilancia sobre el componente. El componente se encuentra en espera y periódicamente se realizan pruebas de vigilancia. Si se detecta un fallo durante la realización de la prueba se realiza un mantenimiento correctivo el cual deja la edad del componente en un estado “Bad As Old”.

La segunda estrategia asume que el componente se encuentra sometido durante su vida operacional a pruebas operacionales y mantenimiento preventivo. Si durante la prueba se observa que el componente está fallado se realiza un mantenimiento correctivo asumiendo, igual que en el caso anterior, que el componente queda tras la realización de la actividad en una situación BAO. Adicionalmente, se considera que después de la realización del mantenimiento preventivo se realiza una prueba funcional.

Si se considera la primera estrategia, en la cual el componente se encuentra sometido a pruebas de vigilancia con una periodicidad T, y teniendo en cuenta que la realización de una prueba de vigilancia no afecta a la evolución de la tasa de fallos  $\lambda(t)$  durante la vida del componente, se obtiene que la evolución de la tasa de fallos con el tiempo, asumiendo un modelo lineal, se reduce a:

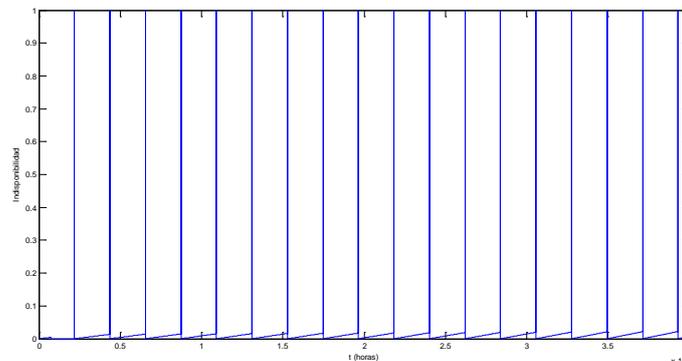
$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha \cdot t$$

En la figura 1 se muestra el comportamiento de la tasa de fallos.



**Figura 1. Evolución de la tasa de fallos con el tiempo considerando una estrategia de pruebas**

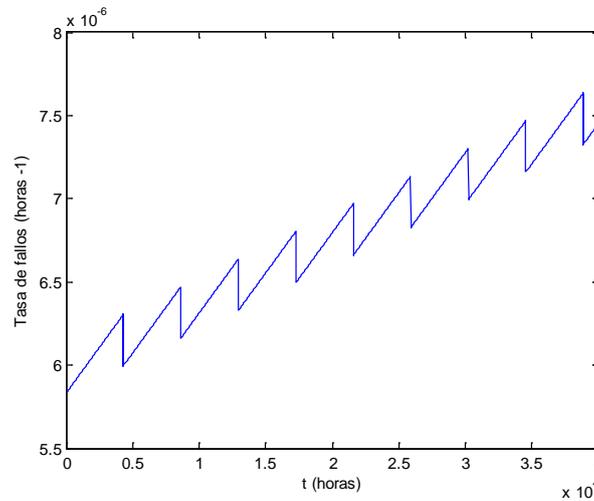
A partir de la evolución de la tasa de fallos y asumiendo que el componente se prueba con una periodicidad trimestral (2184 horas) se obtiene la evolución de la indisponibilidad con el tiempo cronológico. La figura 2 muestra dicha evolución.



**Figura 2. Evolución temporal de la indisponibilidad de la tasa de fallos con el tiempo considerando una estrategia de pruebas**

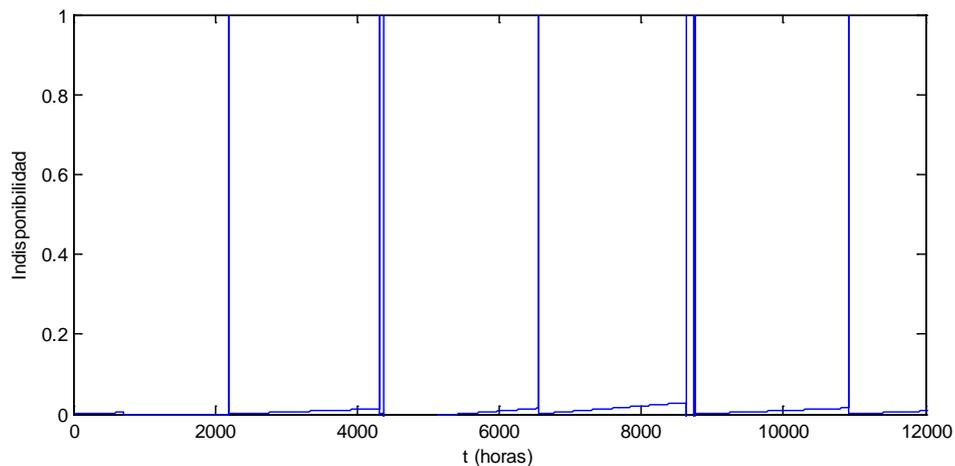
Cuando se considera la segunda estrategia, se realiza sobre el componente pruebas de vigilancia con una periodicidad trimestral (2184 horas) y mantenimiento preventivo por tiempo con una periodicidad semestral (4320 horas). La realización de las pruebas no afecta al envejecimiento del componente, sin embargo, la realización del mantenimiento preventivo reduce la edad del componente en función de su efectividad y, por tanto, la tasa de fallos asociada. Tras la ejecución del mantenimiento preventivo se realiza una prueba funcional, por tanto, la indisponibilidad, es restaurada a cero a excepción de la contribución por demanda. En la Figura 3 se muestra la evolución de la tasa de

fallos con el tiempo asumiendo un modelo de mantenimiento imperfecto PAR y una efectividad igual a 0.65.



**Figura 3. Evolución temporal de la tasa de fallos con el tiempo considerando una estrategia de pruebas y mantenimiento preventivo.**

En la Figura 4 se muestra la evolución de la indisponibilidad con el tiempo cronológico para el segundo caso analizado.



**Figura 4. Evolución temporal de la indisponibilidad con el tiempo considerando una estrategia de pruebas y mantenimiento preventivo.**

## 6. CONCLUSIONES

Actualmente en las plantas se realizan actividades relacionados con la evaluación del envejecimiento en el marco de los programas tales como, por ejemplo, la gestión de vida o la extensión de vida. El APS ha alcanzado un nivel suficiente de credibilidad para proporcionar información importante para estas aplicaciones. Sin embargo, tradicionalmente, el APS no incluye el efecto del envejecimiento de los componentes. El objetivo de la ponencia se



centra en presentar un modelo analítico de indisponibilidad a nivel de componente que permita incluir en el APS el efecto tanto del envejecimiento de los componentes como del mantenimiento preventivo que se realice sobre los mismos.

### **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.

### **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Ageing probabilistic safety assessment network e Recent developments. M. Nitoi, A. Rodionov. Progress in Nuclear Energy. 56 pp 71-78 (2012).
- [2] Martorell, S., Sanchez, A. Serradell V. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. Reliability Engineering and System Safety 64 (1999) 19–31.
- [3] Kancev D. & Cepin M. Evaluation of risk and cost using an age-dependent unavailability modeling of test and maintenance for standby components. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24 (2011) 146-155.
- [4] Levy, I. S., Wreathall, J., DeMoss, G., Wolford, A. J., Collins, E. P., & Jarrell, D. B. (1988). Prioritization of TIRGALEX recommended components for further aging research, NUREG/CR-5248. Washington, DC: US NRC.