

# Optimización del mantenimiento del sistema de corte del reactor RP-10

Álvaro Aguirre<sup>(1)</sup> [aaguirre@ipen.gob.pe](mailto:aaguirre@ipen.gob.pe); Gerardo Lázaro<sup>(2)</sup> [glazaro@ipen.gob.pe](mailto:glazaro@ipen.gob.pe)

(1) IPEN, Dirección General de Seguridad Radiológica, Av. San Juan s/n Km 12 Carabayllo

(2) IPEN, Oficina Técnica de la Autoridad Nacional, Calle Sánchez Carrión No. 456  
Magdalena del Mar, Lima Perú

## Resumen

Este estudio examina el sistema de corte del reactor nuclear de investigación de 10 MW del IPEN con el fin de minimizar el costo total con respecto al tiempo entre pruebas. El costo total está compuesto por costo de las pruebas del sistema de corte y del costo de las fallas inseguras. El costo de las fallas inseguras es evaluado como el costo esperado de las consecuencias de una falla en espera del sistema de corte y de la ocurrencia de un evento iniciante representativo, el cual consiste en una inserción no controlada de reactividad positiva durante el arranque.

## 1. Introducción

Los sistemas de seguridad en espera de los reactores de investigación juegan un papel crítico durante las inserciones rápidas de reactividad, no obstante la frecuencia de mantenimiento preventivo no se deriva necesariamente de la optimización del respectivo costo total.

Las pruebas de los sistemas de seguridad son ejecutadas periódicamente para confirmar su operatividad y luego estos sistemas retornan a su estado de espera. Normalmente, el periodo de pruebas se determina solamente para minimizar la indisponibilidad sin tener en cuenta el costo de las pruebas.

El propósito de este artículo es determinar el tiempo entre pruebas óptimo para el sistema de corte del reactor RP-10, considerando no sólo el costo de indisponibilidad, sino también del costo de pruebas.

## 2. Descripción del sistema de corte del reactor reactor RP-10

El Instituto Peruano de Energía Nuclear IPEN es una institución pública dedicada a la investigación nuclear aplicada, así como a la producción de radioisótopos y a otras áreas de investigación afines.

El reactor nuclear de investigación RP-10 esta emplazado en el centro nuclear

RACSO, ubicado a 42km del centro de Lima en la dirección noreste. En este centro también se encuentran la Planta de Producción de Radioisótopos, la Planta de Gestión de Residuos Radiactivos, así como otros laboratorios y facilidades que sirven de soporte. El RP-10 es un reactor tipo piscina de 10MW para investigación y producción de radioisótopos. Este reactor usa agua liviana desmineralizada como moderador y refrigerante y su combustible es tipo MTR conteniendo uranio enriquecido al 20%.

El edificio del reactor consta de 2 secciones construidas cumpliendo todas las normas estructurales y antisísmicas aplicables. Una de estas secciones alberga al reactor y la otra a los sistemas auxiliares, laboratorios y otras facilidades.

El sistema de corte consiste de 5 barras de control y seguridad (aleación Ag – In- Cd) las cuales caen por gravedad al núcleo cuando 2 de las 3 señales de entrada a la lógica de corte, superan los niveles de disparo.

## 3. El modelo del costo total

Una expresión bien conocida de la indisponibilidad promedio por canal q del sistema de corte, [7] es:

$$q = q_d + \frac{\lambda_s T}{2} + \frac{T_T}{T} + \lambda_s T_R \quad (1)$$

Donde  $q_d$  = es la probabilidad de falla a la demanda;  $\lambda_s T/2$  = es la indisponibilidad promedio por falla en espera;  $\lambda_s$  = tasa de falla en espera y  $T$  = tiempo de entre pruebas;  $T_T/T$  = indisponibilidad por pruebas;  $T_T$  = tiempo de pruebas;  $\lambda_s T_R$  = indisponibilidad por reparación y  $T_R$  = tiempo de reparación.

Asumiendo que la probabilidad de falla a la demanda ( $q_d$ ) es igual a cero, y que  $T_T \ll T$  y  $\lambda_s T_R \ll 1$  los últimos 2 términos de (1) son pequeños, luego:

$$q = \frac{\lambda_s T}{2} \quad (2)$$

Asimismo, dado que no hubieron fallas de disparo del sistema de corte en los 15 de años de operación del RP10, es decir en aproximadamente 15063h, la tasa de falla en espera estimada de dicho sistema, según [3], es:

$$\lambda_s = \frac{\chi^2_{(0.5;2)}}{2T} = \frac{1,39}{2(15063h)} = 5,6 \times 10^{-5} h^{-1} \quad (3)$$

Donde  $\chi^2_{(0.5;2)}$  es el percentil 50% de la distribución Chi cuadrado con 2 grados de libertad.

Considerando que el sistema de corte del RP10 es un sistema redundante (2 de 3), la indisponibilidad  $Q$  total es evaluada a partir de la aproximación de segundo orden de la indisponibilidad de un sistema 2 de 3, [2]:

$$Q = 3q^2 + \frac{3\beta q}{2} \quad (4)$$

Donde  $\beta$  = es el factor beta de falla por causa común = 0.1, [6].

Por otro lado, la indisponibilidad del sistema de corte, puede causar la falla de al menos 2 elementos combustibles, si también ocurre una inserción rápida de reactividad.

Este evento propuesto consistiría en la inserción no controlada de una reactividad de \$1.5 en 300ms, a través del izaje accidental de un elemento combustible y su posterior caída durante el arranque, de acuerdo a [4].

Asumiendo que el evento iniciante propuesto ocurrirá al menos una vez durante el tiempo

de vida útil del reactor, la correspondiente frecuencia será:

$$p = \frac{1}{30 \text{ años}} = 0.033 \text{ años}^{-1} \quad (5)$$

De acuerdo a las simulaciones efectuadas en [4], la ocurrencia simultánea de la indisponibilidad del sistema de corte y del evento propuesto, ocasionará la falla de 2 elementos combustibles y la liberación de los productos de fisión, con los costos señalados en la Tabla 1, [1]:

**Tabla 1.** Costos de las consecuencias de los eventos propuestos.

Componente	Costo US\$
2 EECC nuevos	120 000
Transporte y almacenamiento de 2 EECC fallados (10 años)	4 000
Disposición final de 2 EECC fallados	10 000
Costos regulatorios	2 000
Pérdida de producción por parada	24 000
Cambio de resinas iónicas	40 000
<b>Costo total de las consecuencias (<math>C_c</math>)</b>	<b>200 000</b>

EECC: Elementos Combustibles

Asumiendo la independencia entre la indisponibilidad del sistema de corte por falla en espera ( $Q$ ) y el evento de inserción de reactividad postulado ( $p$ ), la probabilidad de ocurrencia de ambos eventos ( $r$ ), de (4) y (5) es:

$$r = p Q \quad (6)$$

Luego el costo de las fallas inseguras es evaluado como el costo esperado de las consecuencias del evento propuesto y de la indisponibilidad del sistema de corte; es decir del costo total de las consecuencias  $C_c$  y de (6):

$$C_{FALLA INSEGURA} = C_c r = C_c p Q \quad (7)$$

Por otro lado, las pruebas del sistema de corte consisten en la medición del tiempo de caída de las barras de control y seguridad, esto es, el tiempo transcurrido entre la señal de disparo y la señal de nivel inferior, cuando las barras están totalmente insertadas en el núcleo. Normalmente esta prueba se realiza cada vez que se cambia la configuración del núcleo ó cada 1000 h de operación a fin de prevenir las fallas inseguras, [5]. Entonces, el costo anual de las pruebas es:

$$C_{PRUEBA} = C_p \frac{N}{T} + C_B \quad (8)$$

Donde  $N / T$  = número de pruebas anuales;  $N$  = tiempo de operación anual;  $C_p$  = costo total por prueba; y  $C_B$  = costo anual de las pruebas por cambio de núcleo y es independiente de  $T$ .

Finalmente para hallar el tiempo entre pruebas óptimo, se define el costo total anual como la suma del costo anual de las pruebas y del costo anual de las fallas inseguras, es decir de (7) y (8) :

$$C_{TOTAL} = C_c p Q + C_p \frac{N}{T} + C_B \quad (9)$$

#### 4. Determinación del tiempo entre pruebas óptimo

Para determinar el costo total anual mínimo como una función del tiempo entre pruebas  $T$ , (4) es reemplazado en (9) y esta ecuación se deriva con respecto a  $T$  y luego se iguala a cero, con lo cual se obtiene:

$$(6C_c p \lambda_s^2) T_{op}^3 + (3C_c p \lambda_s \beta) T_{op}^2 - 4C_p N = 0 \quad (10)$$

Asimismo, para régimen actual de operación y mantenimiento del RP10 se tienen los siguientes datos presentados en [1]:

$$\begin{aligned} C_p &= 112 \text{ US\$} \\ N &= 1000 \text{ h / año} \\ C_c &= 200\,000 \text{ US\$} \\ p &= 0.033 / \text{año} \\ \lambda_s &= 5 \times 10^{-5} / \text{h} \\ \beta &= 0.1 \end{aligned}$$

Resolviendo analíticamente (10) se determina que el tiempo entre pruebas óptimo  $T_{op} = 1500\text{h}$ . También, se encuentra que tiempo entre pruebas óptimo  $T_{op}$  se halla entre 600h y 7000h con una probabilidad del 90%, y que es más sensible a las variaciones de la tasa de fallas en espera  $\lambda_s$ .

#### 5. Conclusiones

Asumiendo que el RP-10 opera 1000 h al año, se encuentra que el intervalo entre pruebas óptimo del sistema de corte es igual a 1500 h, es decir para un régimen de operación de 20 h por semana, el sistema de

corte debería ser probado cada 75 semanas para minimizar el costo total anual del sistema de corte. Aplicando esta recomendación se obtiene un ahorro anual de US\$ 13, el cual se traduce en un valor presente US\$ 85, suponiendo un periodo de 15 años a una tasa de interés del 12.5%. Es decir no amerita modificar el tiempo entre pruebas actual (1000h) puesto que el ahorro que se obtiene no es significativo.

#### Agradecimiento

A David J. Winfield, Deep River Ontario Canadá, por sus valiosos comentarios y sugerencias.

#### Bibliografía

1. Aguirre A. H., *Metodología para el aumento de la seguridad y disponibilidad de la operación del reactor nuclear de investigación RP-10 del IPEN*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 2004.
2. Fleming K. N., Kalinowski A.M. *An extension of the beta factor method with high levels of redundancy*, PLG – 0289, Pickard Lowe and Garrick, 1983.
3. IAEA, *Manual on Reliability Data collection for Research Reactor PSA*, TECDOC 636 1992 p.32-33.
4. Lázaro G., *Análisis de accidente por inserción de reactividad 1.5\$ / 300ms del núcleo 25 del reactor RP10 y máxima reactividad por experimentos*, Reporte Técnico DRE CASME 0791 IPEN, Lima 2003.
5. Ovalle E., Canaza D., Urcia A., Castro J., Arrieta R., *Tiempo de caída libre de las barras de seguridad y control en el reactor nuclear RP10*, Reporte Técnico No. 08/99 IPEN, Lima 1999.
6. Stewart M., Melchers R., *Probabilistic risk assessment of engineering system*, London Chapman & Hall, 1997, p. 178-179.
7. Vaurio J.K., *Availability of redundant safety systems with common mode and undetected failures*, Nuclear Engineering and Design. 58 1980, p. 415-424.