

El Análisis Probabilístico de Seguridad como Método para Evaluar el Diseño de Sistemas Instrumentados de Seguridad de un Irradiador de Cobalto- 60 (Categoría IV)

Montaluisa, Diego¹  ; Villacis, William² 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito - Ecuador

²Departamento de Ciencias Nucleares, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador

Resumen: El Departamento de Ciencias Nucleares de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador cuenta en sus instalaciones con un Irradiador de Cobalto-60. Este irradiador de categoría IV se instaló en el año 1975 y desde su inicio esta instalación cuenta con rigurosos protocolos de operación, seguridad radiológica y mantenimiento. Debido a los antiguos sistemas de control, el personal del departamento ha desarrollado nuevos diseños para los sistemas de instrumentos de seguridad. La evaluación del diseño de estos se realizó con la metodología de análisis probabilístico de seguridad. Esta evaluación incluyó algunos sistemas instrumentados de seguridad para determinar si los diseños desarrollados cumplen con los requisitos de seguridad radiológica establecidos por organismos internacionales como el Organismo Internacional de Energía Atómica y el Consejo Internacional de Protección Radiológica. El presente estudio ha considerado el proyecto de recarga del irradiador Cobalt-60 hasta una actividad de 50 000 Ci. Adicionalmente, en este estudio se ha priorizado los sistemas instrumentados de seguridad relacionados con el evento inicial la pérdida de blindaje húmedo (pérdida de agua en la piscina), que puede derivar en una sobreexposición del POE. Además, para la evaluación del punto de exposición, se ha optado por uno cercano al blindaje húmedo con un escenario hipotético de que ocurrió una pérdida total de agua; esta situación podría suceder durante un terremoto moderado. Al considerar el evento mencionado, se ha evaluado esta condición por medio de la metodología APS y se logró obtener como resultado que la probabilidad de ocurrencia anual para una sobreexposición superior a 2000 mSv para el POE es de $9,91E-8$, este resultado se encuentra por debajo del límite establecido por la Comisión Internacional de Protección Radiológica para estos eventos.

Palabras clave: Sistemas Instrumentados de Seguridad, Análisis Probabilístico de Seguridad, Irradiador de Cobalto-60.

Probabilistic Safety Analysis as Method for Design Assessment of Safety Instrumented Systems of a Cobalt-60 Irradiator (Category IV)

Abstract: The Department of Nuclear Sciences of Escuela Politécnica Nacional of Ecuador has in its facilities a Cobalt-60 Irradiator. This category IV irradiator has been installed in 1975 and since its beginning, this facility has worked with rigorous protocols of operation, radiologic safety and maintenance. Due to old control systems, the department staff has developed new designs for safety instrumented systems. The design assessment of this one was carried out with the probabilistic safety analysis methodology. The assessment included some safety instrumented systems for determining if the designs developed comply the requirements of radiological safety set by international organizations as the International Energy Atomic Agency and the International Council Radiological Protection. The present study has considered the recharge project of Cobalt-60 irradiator until an activity of 50 000 Ci. Additionally, this study has prioritized the safety instrumented systems related to initial event: the loss wet shielding (water loss in the pool), that can derive in an overexposure of the POE. Further, for the evaluation of the exposition point, one close to the wet shield has been chosen with a hypothetical scenario that a total loss of water occurred, this situation could happen during a moderate earthquake. Considering the mentioned event, this situation has been assessed by the PSA methodology and obtaining as a result that the annual occurrence probability of an overexposure higher to 2 000 mSv for the POE is $9,91E-8$, this result is under the limit established by the International Council Radiological Protection for these events.

Keyword: Safety Instrumented Systems, Probabilistic Safety Analysis, Cobalt-60 Irradiator.

1. INTRODUCCIÓN

El irradiador de Co-60 que posee la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador es una instalación de irradiación

categoría IV, lo que quiere decir que es un irradiador panorámico con almacenamiento húmedo para fuentes selladas (IAEA, 2010), esta categorización se basa en el diseño de la facilidad, accesibilidad y blindaje de la fuente radiactiva.

*diego.montaluisa@epn.edu.ec
Recibido: 31/03/2021
Aceptado: 22/02/2022
Publicado en línea: 23/03/2022
10.33333/rp.vol49n2.03
CC 4.0

El irradiador de Co-60 es una instalación con acceso controlado para el público en el cual, la fuente radiactiva es almacenada y completamente blindada por una piscina de agua (blindaje húmedo) cuando la fuente no está en uso. Este irradiador posee dos tipos de blindajes: el blindaje seco (búnker), compuesto por un cuarto con paredes de hormigón reforzado de 1,5m de espesor y un blindaje húmedo, compuesto por una piscina de agua de 4,5 m de profundidad (Villacis, 2019).

Para garantizar la seguridad del personal, la instalación del irradiador de Co-60 trabaja con estrictos protocolos con relación a la protección radiológica, estos se basan en los tres principios que son: distancia, tiempo de exposición y blindaje. Todos estos procedimientos se encuentran dentro de su sistema integrado de gestión del Centro de Irradiación (CIR) y a cargo del personal de la instalación. Además, el irradiador posee varios sistemas de seguridad que intervienen en el control de los posibles eventos iniciantes para minimizar los efectos producidos por una sobreexposición potencial que puedan recibir el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) o público en general debido a la probabilidad de ocurrencia de incidentes y accidentes que se pueda presentar en la instalación.

En este estudio, se dará prioridad al análisis de los sistemas que intervienen con un escenario específico relacionado a la pérdida del blindaje húmedo y los sistemas instrumentados de seguridad (SIS) que intervienen en el control de ese evento para evitar una posible sobreexposición del POE. Para esto, se realizará una evaluación de los SIS diseñados por medio de la metodología del análisis probabilístico de seguridad (APS) recomendada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés) para instalaciones nucleares sin reactor. La metodología APS cuantitativa requiere de otras metodologías adicionales como son el análisis de árbol de fallo (FTA), análisis de árbol de evento (ETA), análisis de confiabilidad y una metodología para la estimación de dosis efectiva. Cabe recalcar que, en este estudio, se concentra el análisis en los SIS sin considerar todos los protocolos y procedimientos de protección radiológica que son parte del sistema integrado de gestión del CIR, con el objetivo de determinar si los diseños de los SIS se encuentran dentro de los objetivos de seguridad propuestos por organismos internacionales como son la IAEA y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés).

2. MARCO TEÓRICO/METODOLOGÍA

2.1 Sistemas instrumentados de seguridad

Los SIS son aquellos que tienen una función de seguridad activa. El irradiador de Co-60 tiene varios SIS diseñados para evitar y controlar eventos no deseados durante los procesos de irradiación. Estos sistemas fueron diseñados de forma centralizada y son administrados por un controlador lógico programable con nivel integrado de seguridad 1 (PLC – SIL 1 por sus siglas en inglés), según las especificaciones del fabricante de Siemens, este PLC de seguridad cumple con la normativa IEC61508 y la tasa de falla por hora definida por esta normativa para la categoría SIL 1 es de $1,00E-5$. El suministro de energía de todo el irradiador es respaldado por

una unidad ininterrumpida de poder (UPS) con una tasa de falla por hora de $4,10E-7$, lo que permite que el componente general de la fuente de alimentación de 110/220 (SG2) tenga una probabilidad de falla (PF) considerablemente bajo. Con estos antecedentes, se realiza una revisión rápida de los SIS diseñados para minimizar las consecuencias del evento no deseado de sobreexposición relacionados con la disminución del nivel del blindaje húmedo, estos SIS son los siguientes (Montaluisa, 2021):

- Sistema de detección de radiación exterior (SS4)
- Sistema de control de nivel de blindaje húmedo (SS5)
- Sistema de alarmas interiores (SS8)

2.1.1 Sistema de detección de radiación exterior-SS4

La función de este sistema es detectar niveles de radiación sobre los niveles permitidos en el área restringida (sobre la piscina). La Figura 1 ilustra el diagrama funcional del sistema de detección de radiación exterior diseñado.

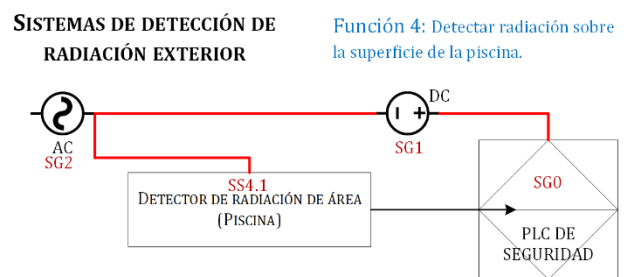


Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de detección de radiación exterior

El diseño propuesto está conformado por un elemento principal que es el detector de radiación de área, este componente tiene una interfaz de comunicación digital hacia el PLC de seguridad y por medio de un cable industrial con conectores DB9, envía permanentemente la medición de la radiación detectada en el búnker.

A continuación, se enlistan los componentes básicos que se consideraron para el análisis del sistema SS4 por medio de la metodología FTA (el resultado de este análisis se muestra más adelante).

- **SS4.1a:** Detector de radiación de área.
- **SS4.1b:** Cable de comunicación (conector rack panel DB9).
- **SG0:** Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad.
- **SG1:** Fuente de alimentación de 24Vdc
- **SG2:** Fuente de alimentación de 110/220Vac con UPS regulado.

Se debe considerar que los componentes SG2, SG1 y SG0 son generales para todos los otros sistemas.

2.1.2 Sistema de control del nivel de blindaje húmedo – SS5

La función de este sistema es la de mantener el nivel del blindaje húmedo lo suficientemente alto para contener los niveles de radiación debajo de los límites permitidos, la Figura

2 ilustra en forma de bloques el funcionamiento del sistema de control de nivel de blindaje húmedo diseñado.

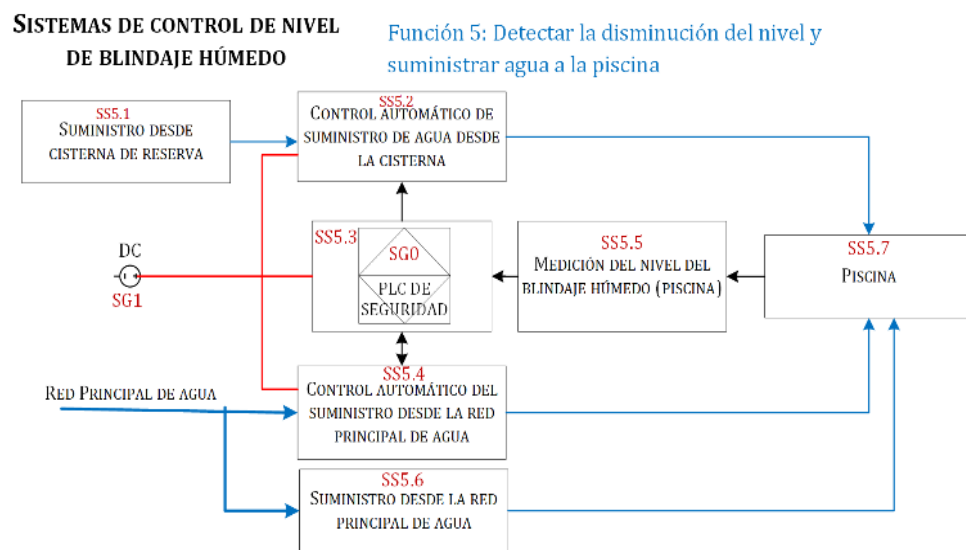


Figura 2. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control de blindaje húmedo

Este SIS está conformado por tres suministros de agua hacia el reservorio del blindaje húmedo (piscina). El primer suministro es el proporcionado por una cisterna de reserva y que por medio de un control automático restablece el nivel de agua evaporada en la piscina. El segundo suministro proviene de la red principal de agua, al igual que el anterior, este tiene un sistema de control automático que restablece el nivel de agua. Si este ha disminuido anormalmente o si el nivel ha disminuido en 30 cm desde la superficie de la piscina, para tener más control, este sistema tiene un censo de flujo que permite determinar si existe algún problema con el suministro desde la red principal de agua para enviar alguna alerta al sistema. El tercer modo de suministro es netamente mecánico y es por medio de una válvula de boya que se abre cuando el nivel de la piscina ha descendido más de 50 cm, esta válvula envía una señal de activación al PLC de seguridad para que este gestione las alarmas correspondientes. Adicionalmente, este sistema cuenta con un sensor de nivel continuo con un transmisor de corriente que permite detectar permanentemente el nivel de agua en la piscina y la activación de la válvula de boya trabaja como otro sensor de nivel discreto que trabajaría en forma paralela al sensor continuo para casos excepcionales.

A continuación, se enlistan los componentes básicos que se consideraron en el análisis del sistema SS5 con la metodología FTA (el resultado de este análisis se muestra más adelante):

- **SS5.1a:** Cisterna de reserva
- **SS5.2a:** Tuberías menor a 1"
- **SS5.2b:** Electroválvula 1"
- **SS5.2c:** Solenoide electroválvula
- **SS5.2d:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.4a:** Tuberías menores a 3"
- **SS5.4b:** Válvula principal de paso - Válvula manual
- **SS5.4c:** Electroválvula 2"
- **SS5.4d:** Sensor de flujo
- **SS5.4e:** Transmisor de flujo

- **SS5.4f:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.4g:** Solenoide electroválvula
- **SS5.4h:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.5a:** Sensor de nivel
- **SS5.5b:** Transmisor de nivel
- **SS5.5c:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.5d:** Relé general
- **SS5.5e:** Cableado de control Bornera (4 conexiones-crimp termination)
- **SS5.6a:** Válvula de bola (boya) 2"
- **SS5.6b:** Tuberías menores a 3"
- **SS5.6c:** Válvula principal de paso - Válvula manual
- **SG0:** Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad
- **SG1:** Fuente de alimentación de 24Vdc

2.1.3 Sistema de alarmas interiores – SS8

La función de este sistema es la de advertir al personal POE y público en general de niveles anormales de radiación en el área restringida del irradiador de Co-60, la Figura 3 ilustra en forma de bloques, el funcionamiento del sistema de alarmas interiores diseñado.

Este sistema está conformado por tres componentes que permiten advertir al personal POE de la ocurrencia de algún evento no deseado. Las balizas ubicadas en las paredes del búnker, permiten tener una alerta visual y audible para el personal presente en las instalaciones del irradiador. El módulo GSM y el Módulo de servidor web están dentro del PLC de seguridad y tienen la misión de enviar una alerta al demás personal relevante que no se encuentre en la instalación del irradiador.

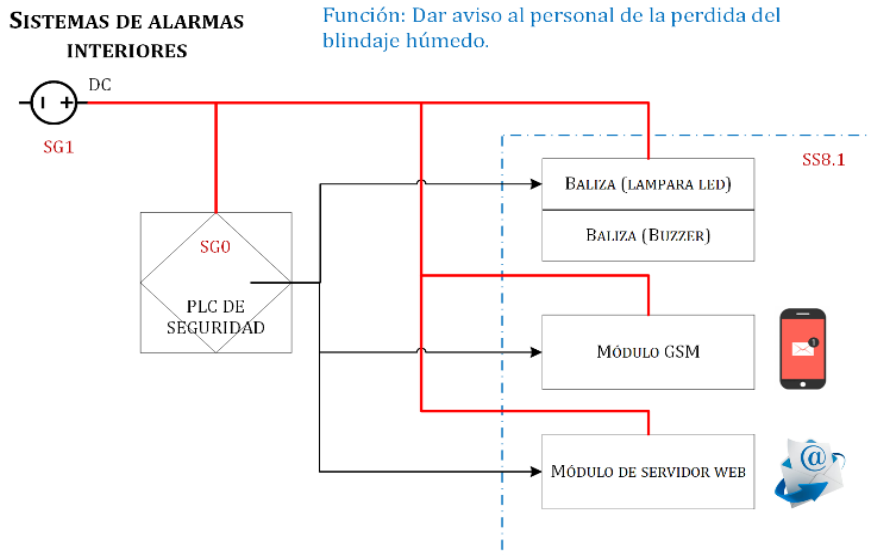


Figura 3. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de alarmas interiores

A continuación, se enlistan los componentes básicos considerados en el análisis del sistema SS8 por medio de la metodología FTA (el resultado de este análisis se muestra más adelante):

- **SS8.1a:** Lámpara LED
- **SS8.1b:** Buzzer (anunciador)
- **SS8.1c:** Cable de comunicación (circular 6 pines)
- **SS8.1d:** Módulo GSM
- **SS8.1e:** Relé general
- **SG0:** Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad
- **SG1:** Fuente de alimentación de 24Vdc
- **SG1.a:** Rectificador estático

2.2. Determinación de confiabilidad de componentes básicos

La confiabilidad de los componentes básicos permite realizar una evaluación cuantitativa de lo SIS, la probabilidad de fallo se puede obtener a partir de la teoría de la confiabilidad de componentes, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$R(t) = e^{-\mu t} \quad (1)$$

Donde:

- R: Confiabilidad de un sistema/componente/equipo
 μ : Tasa de fallo del sistema/componente/equipo
 t: Tiempo o periodo de evaluación de la confiabilidad

$$P(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (2)$$

Donde:

- P: Probabilidad de falla de un sistema/ componente /equipos
 R: Confiabilidad de un sistema/componente/equipo
 μ : Tasa de fallo del sistema/componente/equipo
 t: Tiempo o periodo de evaluación de la confiabilidad

Entonces, para determinar la probabilidad de fallo de los componentes se requiere como información previa la tasa de fallo y el periodo de tiempo de evaluación de la confiabilidad.

La tasa de fallo se puede obtener a partir de: parámetros evaluados durante los procesos de mantenimiento, datos del fabricante o a partir de bibliografía especializada, por ejemplo:

- IAEA – TECDOC 930: Generic component reliability data for research reactor PSA, International Agency Energy Atomic.
- Military Handbook: Reliability prediction of electronic equipment, Department of Defense of UU.SS.

El periodo de evaluación utilizado para determinar la probabilidad de fallo se basa en las horas laborables del personal de la instalación del irradiador, ya que, una de las políticas de la instalación es la operación supervisada del mismo, por tal motivo, se considera las horas laborales del POE al año que son 2 000 h.

2.3 Metodología de evaluación de los SIS

Para la evaluación de los sistemas instrumentados de seguridad diseñados para el irradiador de Co-60 se utilizó la metodología APS facilitado por el IAEA en el documento técnico IAEA – TECDOC – 1267. Además, se consideró un estudio previo en el que se realiza un APS cualitativo del Irradiador de Co-60 (Villacis, 2019), como punto de partida para realizar el presente estudio.

Una dificultad que radica en esta metodología es la de obtener datos reales de la confiabilidad de los componentes y sistemas relacionados con la seguridad radiológica. Sin embargo, una gran ventaja de esta metodología es el alto grado de conocimiento que se adquiere de la instalación estudiada (Alderete & Elechosa, 2006).

Para el desarrollo de esta metodología, se requirió la intervención de funcionarios del irradiador de Co-60, entre estos estuvieron: el Coordinador del CIR, el Oficial de Seguridad Radiológica (OSR), el Operador del irradiador de Co-60 y demás personas involucradas en los procesos relacionados como son: dosimetría, mantenimiento y servicios generales. Además, se recurrió a la investigación bibliográfica con relación a la práctica de irradiación industrial.

Para el desarrollo adecuado del APS, es necesario caracterizar o especificar ciertas condiciones de la instalación como son:

- Fuentes exposición de radiación
- Eventos no deseados
- Eventos iniciantes
- Definición del escenario de evaluación

Fuente de exposición de radiación: Para el presente estudio, se considera como la fuente de exposición de radiación a los lápices de Co-60 que tienen una actividad nominal estimada en su conjunto de 50 000 Ci. Se considera este valor en función de la información recopilada referente al proyecto de repotenciación del irradiador de Co-60.

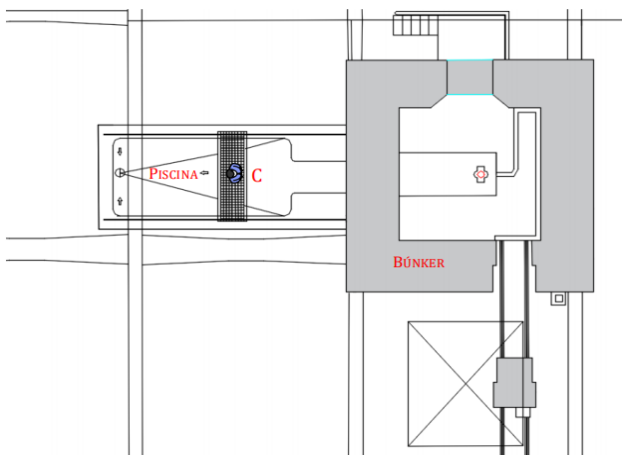
Eventos no deseados: El evento no deseado considerado en este estudio es el referente a la sobreexposición del personal POE, debido a que este es uno de los eventos más relevante en cuanto a gravedad, que podría ocurrir en un irradiador con fuentes selladas.

Eventos iniciantes: Los eventos iniciantes que se considera en este estudio están definidos en un estudio preliminar (Villacis, 2019) y se realizaron ciertas precisiones para poder realizar un análisis más específico. La descripción del evento iniciante es el siguiente:

Evento iniciante (EVI6): *Disminución del nivel del blindaje húmedo donde reposa la fuente de Co-60 debido a una falla de la integridad de la piscina:* Durante un evento natural (terremoto de magnitud entre 7 y 7,9 M_L) la estructura de la piscina colapsa, por lo que, el nivel del blindaje húmedo baja rápidamente, esto sucede cuando no hay personal en el área del irradiador de Co-60 (Montaluisa, 2021).

Definición del escenario de evaluación

Se considera el siguiente escenario, para determinar la dosis efectiva recibida. El operador se acerca a la piscina y tarda aproximadamente 1 minuto en darse cuenta del nivel bajo de la piscina. Por lo que se considera como el peor de los casos que la persona se encuentra sobre la piscina (punto C) a una distancia de 4,5 metros de la fuente de cobalto 60.



Distancia Punto C: 4,5 metros

Figura 4. Escenario del punto de evaluación para la estimación de dosis (punto C a 4,5 m de distancia de la fuente de cobalto 60)

2.3.1 Modelamiento del escenario

Para realizar el modelamiento del escenario dentro del APS se requieren otras metodologías adicionales como son:

- Análisis de árbol de fallo
- Análisis de árbol de evento

Análisis de árbol de fallo

Esta es una técnica para identificar y analizar factores que pueden contribuir a un evento especificado no deseado (denominado el evento superior o principal). Los efectos causales se identifican deductivamente, se organizan de una manera lógica y se representan gráficamente mediante un diagrama de árbol que describe los factores causales y sus relaciones lógicas con respecto al evento superior (Figura 5).

El análisis FTA que se utilizó en este estudio es cuantitativo y para el desarrollo del mismo, se empleó la teoría de confiabilidad explicado en el punto 2.2 para determinar las probabilidades de fallas anuales de los componentes básicos de los sistemas. De esta manera, se puede determinar la PF anual de cada uno de los SIS que intervienen en el control del evento iniciantes EVI6. Adicional a esta teoría, los operadores básicos más utilizados de la metodología FTA son: OR y AND y se definen de la siguiente forma (Crowl & Louvar, 2011):

OR:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (3)$$

Donde:
P: Probabilidad de falla

AND:

$$P = \prod_{i=1}^n (P_i) \quad (4)$$

Donde:
P: Probabilidad de falla

Análisis de árbol de evento

Esta es una técnica gráfica para la representación de secuencias mutuamente exclusivas de eventos que siguen a un evento iniciador de acuerdo con el funcionamiento/no funcionamiento de los diversos sistemas diseñados para mitigar sus consecuencias. Este análisis se puede aplicar cualitativa y cuantitativamente. Para determinar cuantitativamente la frecuencia de ocurrencia de un evento no deseado por medio de la metodología ETA, es necesario el resultado de PF obtenido de los diagramas FTA y a través de un operador AND se evalúa el diagrama ETA desarrollado, para esto se utilizó la Ecuación (4) definida anteriormente.

2.3.2 Evaluación de datos.

En este paso del APS, se realiza la evaluación de las consecuencias de los estados finales no deseados, todos los pasos anteriores a este podrían generar modelos que pueden ser evaluados y analizados de forma cualitativa y cuantitativamente. En este estudio, se realizó un análisis profundo sobre las consecuencias que puede sufrir el personal que labora en las facilidades y las personas que se encuentran alrededor en caso de sobreexposición de radiación, esto se

logra por medio de la estimación de dosis que puede recibir el POE en el interior de la facilidad.

Estimación de dosis efectiva

Para la estimación de dosis efectiva recibida por el POE se trabaja con el procedimiento E1 del documento técnico IAEA-TECDOC-1162 y se considera el tiempo de exposición de 1 minuto a una distancia de 4,5 m. La ecuación utilizada es la siguiente (IAEA, 2000):

$$E_{ext} = \frac{A \times CF_6 \times T_e \times (0,5)^{\frac{d}{d_{1/2}}}}{X^2} \quad (5)$$

Donde:

E_{ext} : Dosis efectiva desde una fuente puntual [mSv]

A: Actividad de la fuente = **50 000 Ci**

- En [kBq] si se utiliza el factor CF_6 en [mSv/h]/[kBq]
- **En [Ci] si se utiliza el factor CF_6 en [mSv/h]/[Ci]**

T_e : Duración de la exposición [h] = **0,016 h**

CF_6 : Factor de conversión para el Co-60

- 2,5E-07 [mSv/h]/[kBq]
- **9,5E+00 [mSv/h]/[Ci]**

X: Distancia desde la fuente puntual [m] = **4,5 m**

$d_{1/2}$: Valor medio de la capa para el Co-60 [cm]

- Agua: 10,99
- Concreto: 5,2
- **Aire: 9,42E+3**

d: Espesor del blindaje [cm]

Nota: Si se desea realizar el cálculo sin blindaje, se debe establecer el espesor del blindaje $d = 0$

Además, para realizar un análisis cuantitativo se requiere establecer los límites de las probabilidades de ocurrencia al año de eventos no deseados y la dosis efectiva recibida por el POE en el punto de evaluación, para esto, se referenció el presente estudio con los límites máximos establecidos por organismos internacionales como con el ICRP y el IAEA.

Tabla 1. Rango de Probabilidades de ocurrencias de eventos en un año y límites de dosis efectiva máxima

Categorización de eventos	Probabilidad de ocurrencia del evento en el año	Dosis efectiva máxima (mSv)
Secuencia de eventos que conducen a dosis tratadas como parte de la exposición normal	10^{-1} a 10^{-2}	< 50
Secuencia de eventos que conducen a efectos estocásticos solamente, pero sobre los límites de dosis	10^{-2} a 10^{-5}	1 - 500
Secuencia de eventos que conducen a dosis donde algunos efectos de la radiación son determinísticos	10^{-5} a 10^{-6}	200 – 5000
Secuencia de eventos que conducen a dosis donde la muerte es el resultado más probable.	$< 10^{-6}$	> 2 000

(ICRP, 1993), (IAEA, 2002)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se discutirán los resultados parciales y finales obtenidos durante el desarrollo del presente estudio.

Los resultados de la PF anual de los SIS que intervienen en el control del evento iniciante EVI6 se los obtuvo con la metodología FTA y con la teoría de confiabilidad de componentes. En la Figura 5, se ilustra a modo de ejemplo, el desarrollo de la metodología FTA del sistema de control de nivel de blindaje húmedo – SS5. La aplicación de la metodología FTA también se realizó a los SIS SS4 y SS8, el detalle de este estudio se encuentra en la referencia Montaluisa (2021).

Además, el uso de la metodología FTA cuantitativa permite identificar los componentes críticos de cada uno de los SIS por medio de una un análisis de Pareto, como se ilustra en la Figura 6.

A partir del análisis de Pareto del sistema de control de nivel de blindaje húmedo - SS5 se puede inferir que los componentes básicos que más influyen en la falla del SS5 son el sensor de flujo (SS5.4d) y el transmisor de flujo (SS5.4e).

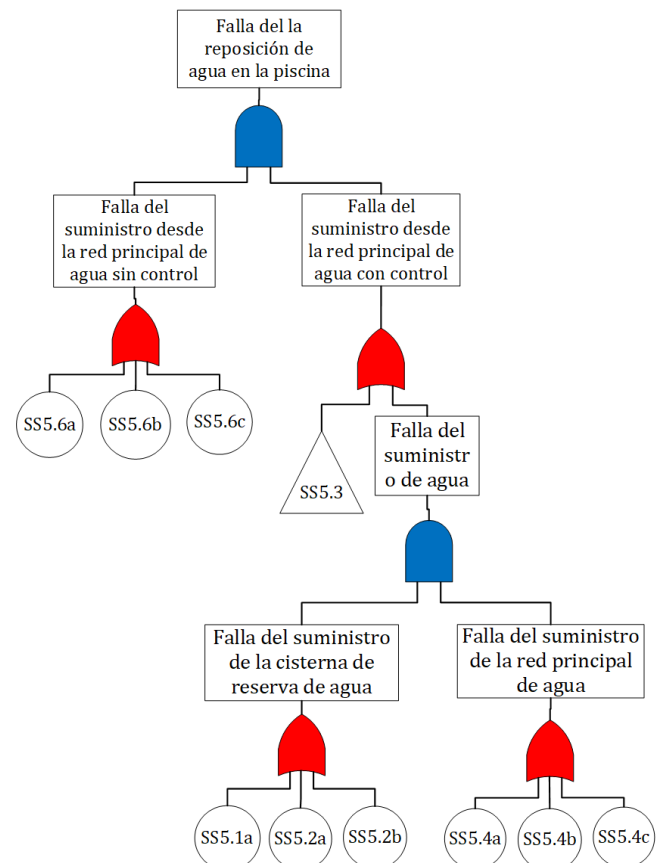


Figura 5. Diagrama FTA del sistema de control de nivel de agua del blindaje húmedo

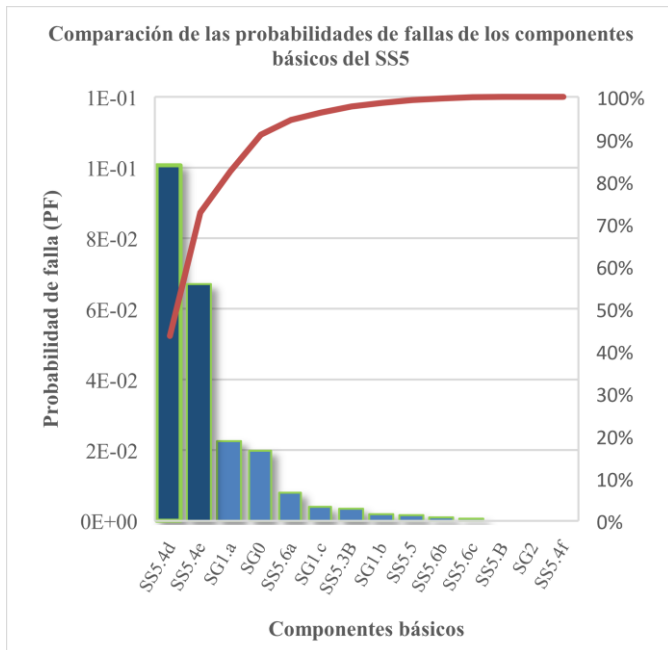


Figura 6. Análisis de Pareto de las probabilidades de falla de los componentes básicos del SS5

El análisis de Pareto se aplicó a los demás resultados obtenidos por la metodología FTA para los SIS SS4 y SS8 respectivamente y se logró determinar los componentes básicos que más influyen en todos los SIS que intervienen con el EVI6. A continuación, se resumen los componentes más influyentes de los SIS respectivamente (Montaluisa, 2021):

- Sistema de detección de radiación exterior (SS4).
 - SG4.1a: Detector de radiación de área
- Sistema de control de nivel de blindaje húmedo (SS5).
 - SS5.4d: Sensor de flujo

- SS5.4e: Transmisor de flujo
- Sistema de alarmas interiores (SS8).
 - SG1.a: Rectificador estático
 - SG0: Controlador Lógico Programable (PLC) de seguridad

Al desarrollar la metodología FTA indicada en el punto 2.3.1 a los SIS SS4, SS5 y SS8, se obtuvieron los siguientes resultados de PF (Montaluisa, 2021):

- PF anual del SS4: 1,07E-1
- PF anual del SS5: 1,95E-3
- PF anual del SS8: 4,75E-2

A partir de estos resultados de PF de los SIS, se aplica la metodología ETA para determinar la probabilidad anual de la ocurrencia del evento no deseado (sobreexposición del POE). Para determinar este parámetro, es necesario establecer los factores que intervienen y la probabilidad de ocurrencia que provocarían el evento iniciante, para esto se consideró referencias bibliográficas que permitan determinar la probabilidad de ocurrencia de un terremoto y de una falla estructural de la piscina, estos dos factores son los que aportan a la ocurrencia del evento iniciante. Para el primer factor, la probabilidad de ocurrencia en el mundo de un sismo de gran magnitud 7,0 a 7,9 M_L es de 10 al año (Mannan, 2005). En cuanto al segundo factor se consideró la tasa de fallo (colapso) de una estructura de ingeniería en 1,00E-3 (Melchers & Beck, 2018).

En la Figura 7, se ilustra el diagrama ETA con todos los resultados obtenidos por la metodología FTA y el resultado final de la probabilidad anual de ocurrencia de una sobreexposición del POE derivada del evento iniciante EVI6, la cual es de 9,91E-8.

SIS que intervienen para evitar el evento iniciante			
EVENTO INICIANTE DISMINUCIÓN DEL NIVEL DE AGUA EN LA PISCINA	SS5 CONTROL DE NIVEL DE BLINDAJE HÚMEDO Éxito: Controlar el nivel del blindaje húmedo (no baje más de 50 cm)	SS4 SISTEMA DE DETECCIÓN DE RADIACIÓN EXTERIOR Éxito: Detectar radiación sobre la superficie de la piscina.	SS8 SISTEMA DE ALARMAS INTERIORES Éxito: Dar aviso al personal del CIR de la pérdida de blindaje húmedo

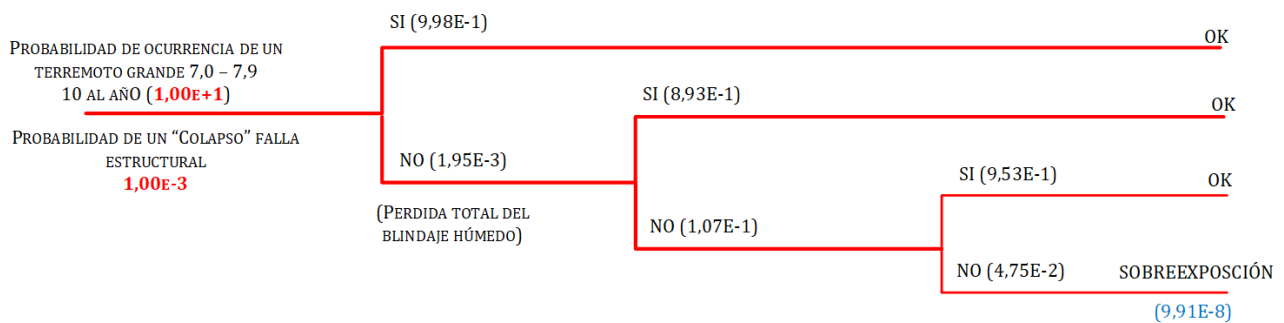


Figura 7. Diagrama ETA del evento iniciante EVI6

Para el cálculo de la estimación de la dosis recibida en el punto C (a 4,5 m de distancia de la fuente de Co-60), se aplica la Ecuación 5. Además, para este cálculo se consideró el escenario planteado en la Figura 4, con una fuente de Co-60 de actividad nominal de 50 000 Ci y un tiempo máximo de exposición del POE de 1 minuto.

Tabla 2. Estimación de dosis efectiva y probabilidad anual en el punto de evaluación C para 50 000 Ci con los diseños desarrollados

	Probabilidad Anual	Dosis efectiva (mSv)
Punto C'' (50 000 Ci)	9,91E-08	381,66

Nota:(tiempo de exposición para la dosis efectiva: 1 minuto)
(distancia a la fuente de Co-60: 4,5 m)

Con los resultados de la probabilidad de ocurrencia anual del evento no deseado y con la dosis efectiva estimada, se puede

determinar si los diseños de los SIS desarrollados cumplen con los objetivos de seguridad requeridos por las normativas internacionales indicadas en la Tabla 1.

En la Figura 8, se puede observar que el punto de evaluación se encuentra dentro de los límites de seguridad radiológica. Esto quiere decir que, con los SIS diseñados, existe una probabilidad anual de $9,91E-08$ de que ocurra una sobreexposición del POE a una dosis efectiva estimada de 381,66 mSv si el POE se expondría 1 minuto al escenario planteado en el presente estudio. Esta probabilidad está muy por debajo del límite requerido lo que garantizaría la operación de la instalación con lo que respecta a este evento iniciante. Además, es necesario considerar que existen protocolos y procedimientos entorno a la protección radiológica que disminuirían esta probabilidad de ocurrencia.

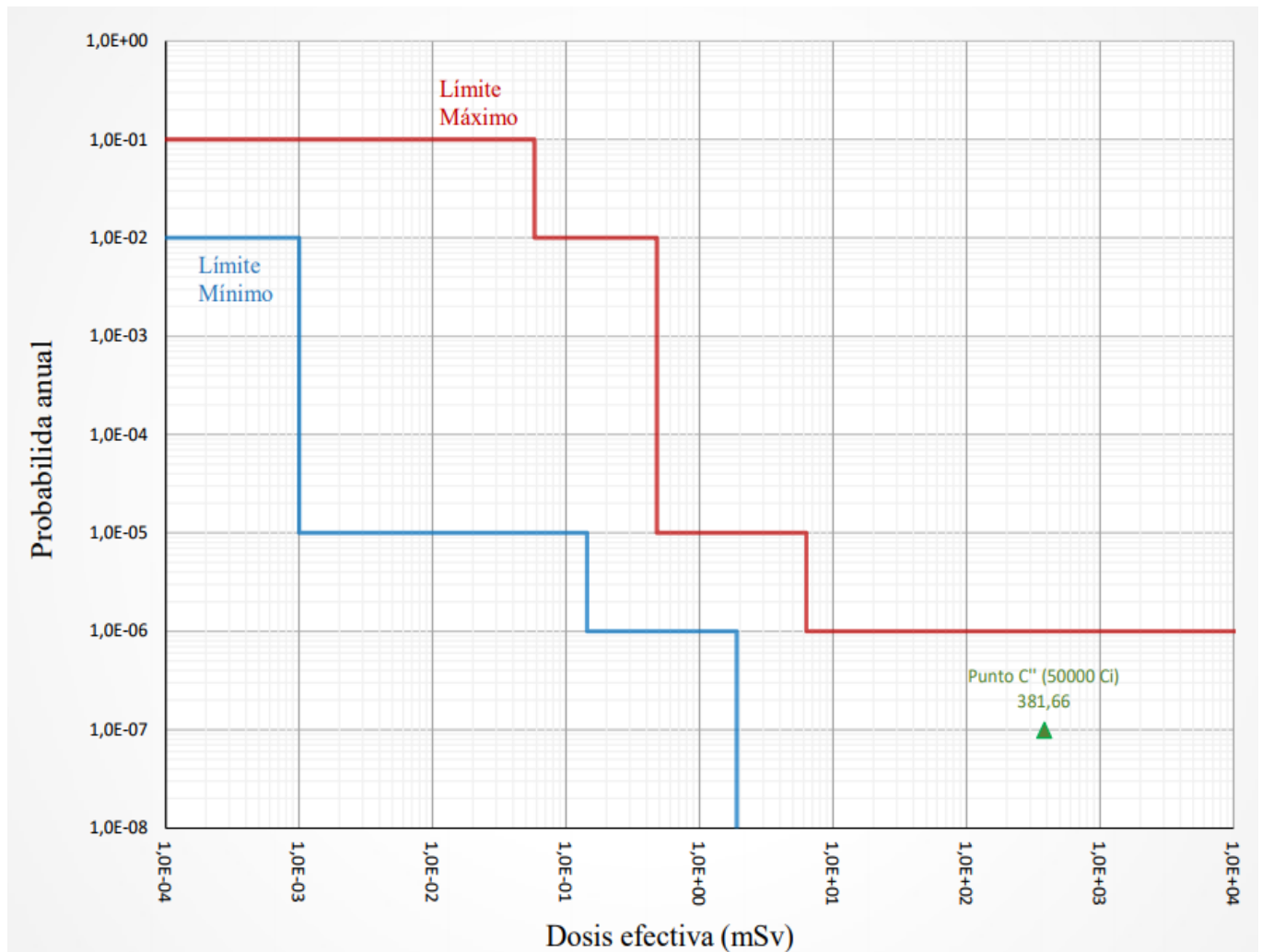


Figura 8. Ilustración del cumplimiento del escenario planteado dentro de los objetivos de seguridad de la evaluación realizada

4. CONCLUSIONES

El uso de la herramienta metodológica APS, permitió comprobar que los diseños de los sistemas instrumentados de seguridad desarrollados para el irradiador de Co-60 con

relación al evento iniciante de la pérdida total del blindaje húmedo cumplen con los límites de seguridad radiológica (para exposiciones mayores a 2 000 mSv, la probabilidad de ocurrencia anual debe ser menor al $1,00E-6$) establecidos por el Consejo Internacional de Protección Radiológica, ya que la

probabilidad de ocurrencia anual estimada para este evento fue de $9,91E-8$, muy por debajo del límite establecido.

La metodología FTA cuantitativa en combinación con la teoría de confiabilidad de componentes y por medio de un análisis de Pareto se logró establecer los componentes críticos dentro de los SIS, lo que permitió determinar que más del 50% de la probabilidad de las fallas reside en 1 o dos componentes básicos de cada sistema y de esta manera, poner un énfasis importante durante la selección e implementación de estos componentes.

La metodología APS es una herramienta que permite que el personal del Irradiador de Co-60 involucrado en el estudio, obtuviera un mayor conocimiento acerca de sus sistemas de seguridad tanto preventivos como de control, lo que mejoró el nivel de conciencia de los requerimientos de seguridad de las instalaciones y su intervención en el desarrollo de estos.

El resultado de toda esta evaluación fue basado exclusivamente en los sistemas instrumentados de seguridad del irradiador, por lo que, si consideramos que el CIR posee protocolos y procedimientos especiales en casos de emergencia, la probabilidad de ocurrencia anual de este evento disminuiría aún más, sin embargo, el hecho de que el SIS ya garantice una probabilidad por debajo del límite da una seguridad a la operación del irradiador de Co-60 y su futura repotenciación con 50 000 Ci.

REFERENCIAS

- Alderete, F., & Elechosa, C. (2006). Análisis Probabilístico de seguridad en Plantas Industriales de Irradiación. *Primer Congreso Americano del IRPA 2006* (pág. 9). México: Autoridad Regulatoria Nuclear - Argentina.
- Department of Defense. (1991). *MIL-HDBK-217F: Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*. Washington DC.: Department of Defense United States of America.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2011). *Chemical Process Safety, Fundamentals with applications* (Third ed.). Boston: Prentice Hall.
- Gruhn, P., & Cheddie, H. (2006). *Safety Instrumented System: Design, Analysis and Justification* (Segunda ed.). North Carolina, United States of America: ISA - the Instrumentation, System and Automation Society.
- IAEA. (2000). *IAEA - TECDOC - 1162 Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2002). *IAEA-TECDOC-1267 Procedures for conducting probabilistic safety assessment for non-reactor nuclear facilities*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2010). *Specific Safety Guide No. SSG-8: Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities*. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA).
- ICRP. (1993). *Protection from Potential Exposure: A conceptual framework - ICRP Publication 64*. Tarrytown: International Commission on Radiological Protection (ICRP).
- Mannan, S. (2005). *Lee's Loss Prevention in the Process Industries* (Third ed., Vol. 1). Burlington: Elsevier Butterworth Heinemann.

Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability Analysis and Prediction*. Hoboken: Wiley & Sons Ltd.

Montaluisa, D. F. (2021). Propuesta de mejoramiento del sistema de seguridad del irradiador de cobalto 60 del Centro de Irradiación de la EPN con enfoque en seguridad funcional (IEC61508). [Tesis Maestría]. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Villacis, W. (2019). Análisis Probabilístico de seguridad en una planta semi-industrial de irradiación que tiene una fuente de Co60 de 50000 Ci. UBA-FIUBA/ARN.

BIOGRAFÍAS



Diego Fernando Montaluisa Ipiales, nació en Quito el 11 de marzo de 1984. Ingeniero en Electrónica y Control por la Escuela Politécnica Nacional en el 2012, Master en Seguridad Industrial Mención en Prevención de Riesgos Laborales por la Escuela Politécnica Nacional en el 2021, labora como Especialista en el

Departamento de Ciencias Nucleares de la Escuela Politécnica Nacional desde el 2014 con las funciones principales de operación y mantenimiento del Acelerador de Electrones y el irradiador de Co-60 que son instalaciones propias del Departamento de Ciencias Nucleares.



William Villacis Oñate, Doctorado de la Universidad de Buenos Aires área Ingeniería (en curso). Especialista en Seguridad Nuclear por la Universidad de Buenos Aires (2019). Especialista en Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación por la Universidad de Buenos Aires (2017). Magíster en Seguridad Industrial y Salud Ocupacional por la Escuela

Politécnica Nacional (2013). Ingeniero Químico por la Escuela Politécnica Nacional (2004). Se desempeña como docente universitario en las áreas de Higiene Industrial 2 y Fundamentos de Prevención de Riesgos Laborales para posgrado y Seguridad Industrial y Salud Ocupacional para pregrado. En la actualidad trabaja como Docente, Oficial de Seguridad Radiológica, Presidente Suplente del Comité de Seguridad e Higiene del Trabajo por parte del empleador en la Escuela Politécnica Nacional.

