

CONCEPTO DE LA DEFENSA EN PROFUNDIDAD Y EJEMPLO ESPECÍFICO DE APLICACIÓN EN LAS CENTRALES NUCLEARES ESPAÑOLAS

El desarrollo de la seguridad nuclear se remonta al primer uso de la energía nuclear. Los medios para garantizar la seguridad en los usos pacíficos de la energía nuclear han evolucionado desde los primeros métodos simples y conceptos hacia una sólida metodología basada en la experiencia. El continuo crecimiento en el conocimiento, el desarrollo de conceptos de seguridad y la experiencia que se obtiene al operar centrales nucleares en condiciones normales, anormales y en caso de accidentes, han llevado a enfoques de seguridad más completos y sistemáticos.

INTRODUCCIÓN

Hace ya más de un siglo, durante la Primera Guerra Mundial, se desarrolló una estrategia militar defensiva a la que se le llamó "defensa en profundidad". Su objetivo era prevenir la penetración y avance del enemigo a través de las distintas "líneas de defensa" del ejército, mediante un elaborado sistema de trincheras interconectadas y puntos fortificados.

Durante los años 50, el sector nuclear norteamericano lo utilizó como analogía para la protección del público frente a las radiaciones ionizantes y las consecuencias de un accidente en un reactor nuclear, habiéndose aplicado ya en el diseño del primer reactor realizado por Enrico Fermi y su equipo en 1942.

La defensa en profundidad aplicada a la seguridad de las centrales nucleares es un concepto clave que se aplica al diseño, a la operación de las mismas y en la preparación de emergencias, teniendo por objetivo evitar aquellos sucesos que puedan desencadenar accidentes y, en el caso de que estos ocurran, mitigar las consecuencias de los mismos. La clave de este concepto es la creación de múltiples capas independientes y redundantes (líneas de defensa) para compensar potenciales fallos humanos o técnicos, de forma que no se confíe únicamente en una capa (nivel) de defensa, independientemente de lo robusto que esta sea.

El concepto de colocar múltiples barreras entre los materiales radiactivos y el medioambiente se fue desarrollando gradualmente. En las primeras etapas se llega a la categorización de las "líneas de defensa" como "funciones de seguridad" basándose inicialmente en: características de diseño del reactor para que sea intrínsecamente seguro, barreras físicas tales como contenciones, para prevenir la liberación de productos de fisión, y sistemas activos para la parada del reactor y su refrigeración en cualquier circunstancia. En consecuencia, el concepto de defensa en profundidad se fue refinando para constituir un enfoque cada vez más eficaz que combina la prevención de una amplia gama de incidentes y accidentes postulados y la mitigación de sus consecuencias.

Posteriormente, el concepto de defensa en profundidad fue evolucionando y se redefinió para incluir consideraciones de amenazas externas, de garantía de calidad, de automatización de procesos, de seguimiento de actividades y de herramientas de diagnóstico. Además, se consideraron accidentes severos adicionales en estudios y análisis probabilísticos de seguridad.

De las lecciones aprendidas del accidente en Three Mile Island, la aplicación de la experiencia operativa ayudó a fortalecer cada nivel de defensa en profundidad y a identificar las debilidades en el diseño, construcción, operación y pruebas



MANEL CAMBOY

Director de Seguridad Nuclear
ENDESA



RODRIGO CUESTA

Responsable de Regulación Nuclear
ENDESA



MIGUEL BARREIRO

Regulación Nuclear
ENDESA

DEFENCE-IN-DEPTH AND SPECIFIC EXAMPLE OF ITS APPLICATION IN SPANISH NUCLEAR POWER PLANTS

Development of nuclear safety goes back to the first use of nuclear energy. The means to guarantee safety in the peaceful uses of nuclear energy have progressed from simple methods and concepts towards a solid methodology based on experience. The continuous growth in knowledge, the development of safety concepts and the experience gained from operating nuclear power plants in normal and abnormal conditions and in the event of accidents have led to more complete and systematic safety approach in nuclear power plants.



de equipos, así como en los análisis relacionados a los mismos. El accidente de Chernóbil en 1986 demostró las posibles consecuencias de una inadecuada defensa en profundidad, así como la importancia de cuestiones organizativas, la necesidad de una estructura de regulación efectiva y de una cultura de seguridad fuertemente implantada en la organización. El accidente de 2011 en la central japonesa de Fukushima provocó un nuevo cuestionamiento acerca de la seguridad nuclear y las herramientas utilizadas en las centrales, incluyendo la efectividad del concepto de defensa en profundidad, pero también proporcionó la oportunidad de revisar este concepto y mejorar su implementación efectiva. Este accidente puso de manifiesto, particularmente, cómo un evento externo puede actuar como un iniciador de modo común, provocando el fallo de las provisiones de seguridad en varios niveles de la defensa en profundidad.

En resumen, el desarrollo histórico del concepto de defensa en profundidad ha conducido a una estructura general de cuatro barreras físicas y cinco niveles sucesivos, que se explican a continuación.

DEFINICIÓN DEL CONCEPTO: ESTRATEGIAS Y OBJETIVOS

La estrategia de la defensa en profundidad es doble: primero, la prevención de accidentes y, segundo, si la prevención falla, limitar sus posibles consecuencias y evitar cualquier evolución a condiciones más graves. La defensa en profundidad consiste en un despliegue jerárquico de diferentes niveles de equipos y procedimientos enfocados a mantener la efectividad de las barreras físicas colocadas entre los materiales radiactivos y los trabajadores, el público o el medioambiente durante el funcionamiento normal de una central nuclear y en transitorios operables o en situaciones de accidente.

El objetivo general de la defensa en profundidad es garantizar que un fallo, ya sea de equipo o humano, en un determinado nivel de defensa e incluso combinaciones de fallos en más de un nivel de defensa, no se propague poniendo en peligro la defensa en profundidad en niveles posteriores (Figura 1).

NIVELES DE DEFENSA

La defensa en profundidad generalmente se estructura en cinco niveles. Si un nivel falla, el nivel siguiente

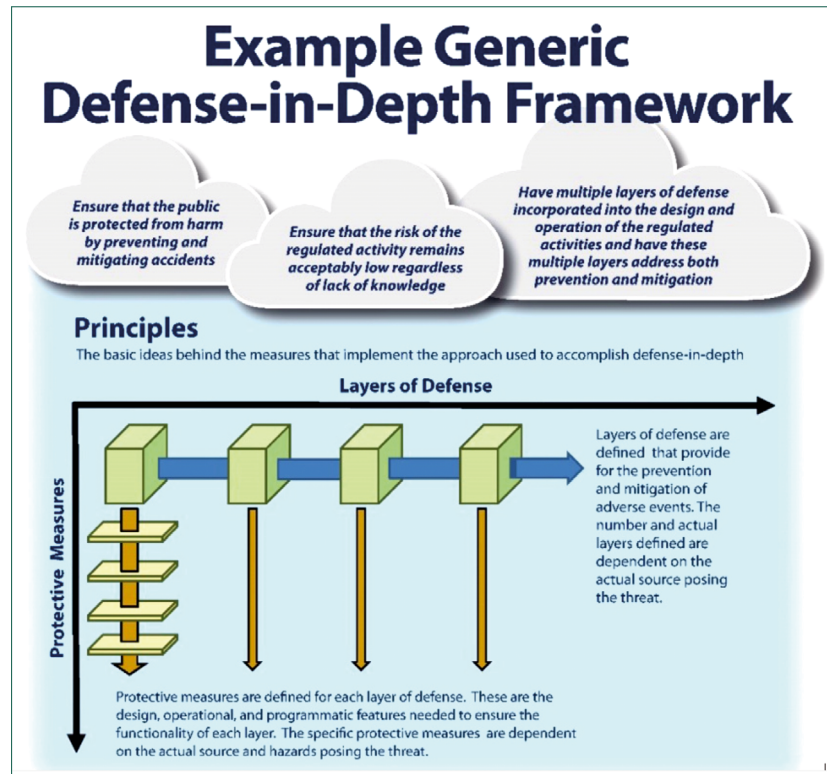


Figura 1. Esquema del concepto "Defensa en Profundidad". Fuente: NRC.

entra en juego. El objetivo del primer nivel de protección es prevenir el funcionamiento anormal y fallo de sistemas. Si el primer nivel falla, la operación anormal de la instalación es controlada, o los posibles fallos son detectados por el segundo nivel de protección. Si falla el segundo nivel, el tercer nivel garantiza que las funciones de seguridad necesarias se realicen activando sistemas de seguridad específicos y otras características de seguridad. Si el tercer nivel falla, el cuarto nivel limita la progresión del accidente a través de la gestión de accidentes, a fin de prevenir o mitigar la ocurrencia de accidentes severos con liberaciones externas de materiales radiactivos. El último objetivo (quinto nivel de protección) es la mitigación de las consecuencias radiológicas de liberaciones externas significativas, a través de la respuesta de emergencia fuera del emplazamiento (Tabla 1).

Para la implementación efectiva de la defensa en profundidad, una serie de requisitos previos básicos se aplican a todas las medidas en los Niveles 1 a 5. Estos requisitos previos, que están interrelacionados y se cumplen como parte de la política de diseño y operación seguros son garantía de calidad, cultura de seguridad apropiada y diseño conservador.

BARRERAS

En general, se colocan varias barreras físicas sucesivas para el confinamiento del material radiactivo. Su diseño específico puede variar dependiendo de la actividad del material y de las posibles desviaciones de la operación normal que podrían resultar en el fallo de algunas barreras. Para los reactores en operación a potencia, las barreras que limitan los productos de fisión son típicamente:

- la matriz de combustible
- el revestimiento de combustible
- el límite del sistema de refrigeración del reactor
- la contención

El concepto de defensa en profundidad se aplica a la protección de la integridad de estas barreras contra eventos internos y externos que pudieran comprometerla. Existen ciertos riesgos como incendios, inundaciones o terremotos que potencialmente podrían afectar a varios niveles de defensa. Para estos eventos, se aplican medidas específicas sobre prevención, detección y mitigación.

HERRAMIENTAS

Las herramientas normalmente utilizadas para la implementación del concepto de Defensa en profundidad en las centrales nucleares son las siguientes (fuente INSAG-10 del OIEA):



Levels of defence in depth	Objective	Essential means
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures.	Conservative design and high quality in construction and operation.
Level 2	Control of abnormal operation and failures.	Control, limiting and protection systems and other surveillance features.
Level 3	Control of accidents within the design basis.	Engineered safety features and accident procedures.
Level 4	Control of severe plant conditions, including prevention of accident progression and mitigation of the consequences of severe accidents.	Complementary measures and accident management.
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials.	Off-site emergency response.

Tabla 1. Niveles del concepto de Defensa en profundidad. Fuente: INSAG-10 (OIEA).

- **Diseño Determinista.** En la práctica se aplican tres principios para el diseño y la operación de los sistemas y componentes de seguridad: redundancia (más de un componente realiza la misma función), independencia (estos componentes múltiples utilizan medios distintos y separados para su funcionamiento: suministro eléctrico, tuberías...) y diversidad (estos componentes múltiples utilizan distintas características de diseño para su funcionamiento: motobombas, turbobombas...)
- **APS.** El Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) es una herramienta eficaz para mejorar la comprensión de las vulnerabilidades de la planta, incluidas las situaciones complejas que se pueden producir debido al fallo de equipos o a fallos humanos.
- **Medios para la seguridad operacional.** Las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento, procedimientos operativos, el factor humano, el mantenimiento y la supervisión de ESC y, por último, la Cultura de Seguridad.
- **Refuerzo de la seguridad.** A través de la experiencia operativa y las lecciones aprendidas en ella y los análisis de impacto de la seguridad en las modificaciones de diseño acometidas.
- **Control y gestión de accidentes.**
- **Respuesta a Emergencias.**
- **Evaluación de seguridad y verificación de la defensa en profundidad.**
- **Papel del regulador en materia de seguridad.** El regulador juega un papel importante a la hora de establecer los objetivos de seguridad y de llevar a cabo las inspecciones independientes sobre las medidas de seguridad adoptadas por la organización.
- **Peer reviews internacionales.**

APLICACIÓN ESPECÍFICA DEL CONCEPTO DE DEFENSA EN PROFUNDIDAD EN LA SEGURIDAD NUCLEAR

Un ejemplo específico de aplicación del concepto de defensa en profundidad en una central nuclear es el control de la seguridad en las condiciones asociadas a una parada de recarga. Este caso sirve para ilustrar aquellas situaciones puntuales en las que voluntariamente se abren una o más barreras, lo que supone prestar una atención especial y la aplicación de acciones compensatorias adecuadas.

La aplicación de estos criterios, basada en el contenido de la guía de la industria de referencia NUMARC-96-01, tiene como objetivos básicos los siguientes:

- Establecer una organización integrada para la mejora de la seguridad en las paradas de recarga.
- Definir los criterios generales de seguridad para el desarrollo de las diversas actividades en la programación de las paradas.
- Establecer los medios necesarios para asegurar la defensa en profundidad.
- Identificar los planes de contingencias necesarios.
- Definir el programa de entrenamiento.
- Establecer los mecanismos para la revisión del programa de actividades de las paradas.

La definición de los criterios generales de seguridad para la programación de las diversas actividades en las paradas se basa, en primer lugar, en la identificación de las Funciones de Seguridad (*) que deben

(*) Una función de seguridad se define como aquella que se lleva a cabo mediante actuaciones encaminadas a evitar el daño al combustible, prevenir el fallo de la contención o minimizar las liberaciones radiactivas.

controlarse y, en segundo lugar, en la determinación de los sistemas, tanto los necesarios para cumplir los requisitos mínimos indicados en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento u otros documentos, como de todos los que también pueden ser utilizados para garantizar que se cubren adecuadamente dichas funciones.

De forma genérica, las funciones de seguridad a controlar son las siguientes:

- Control de la Reactividad.
- Extracción del Calor Residual.
- Fuentes de Corriente Alterna.
- Integridad de la Contención Secundaria.
- Inventario de Refrigerante.

Para cada función, se analiza qué sistemas de la instalación pueden satisfacerla y, a cada uno de estos sistemas, se le asigna una puntuación atendiendo a criterios relacionados con el APS entre otros.

El resultado de la aplicación de los criterios de calificación mostrará una puntuación para cada función, basada en los sistemas o medios disponibles para llevar a cabo dicha función de seguridad.

De esa forma se establecen tres situaciones:

- Aquellas en las que se dispone de sistemas o medios equivalentes a los indicados en los requisitos aplicables para llevar a cabo la función de seguridad.
- Aquellas en las que se dispone de más sistemas o medios equivalentes a los indicados en los requisitos para llevar a cabo la función de seguridad (objetivo a alcanzar en la programación de las actividades de recarga).
- Aquellas en las que se dispone de menos sistemas o medios equivalentes que los indicados en los requisitos aplicables, para llevar a cabo la función de seguridad (condición no admisible).

El objetivo común a todas las paradas será el de no estar nunca en una configuración de sistemas inferior a la requerida. Asimismo, para aquellas actividades de recarga con posibilidad de afectar a las funciones de seguridad se establecerán unos objetivos en relación con los tiempos máximos de duración cuando el número de sistemas disponibles es igual al requerido, no admitiéndose configuraciones de sistemas inferiores a las requeridas.

La aplicación de la guía NUMARC 91-06 tiene en cuenta estos nuevos criterios para preservar la defensa



en profundidad con requerimientos que van más allá de las Específicas Técnicas de Funcionamiento.

CONCLUSIONES

La defensa en profundidad parte de un concepto defensivo clásico aplicado en diversas tecnologías, entre ellas la nuclear.

Tras los distintos avances realizados en el modelo, derivados de la experiencia en la operación de las centrales y de las lecciones aprendidas de accidentes como el de Fukushima, existe una opinión ampliamente compartida de que el refuerzo de la defensa en profundidad es clave para la mejora de la seguridad de las centrales en operación y de los diseños futuros, especialmente en la efectividad, en la prevención y en la mitigación, de las barreras de los distintos niveles

(con especial relevancia los fallos de modo o causa común).

El diseño original de las centrales nucleares responde a criterios deterministas, tanto en las provisiones para asegurar que los ESC sean capaces de cumplir sus funciones de seguridad y mitigar las liberaciones de radiactividad, como en la selección de los accidentes base de diseño considerados como significativos por sus consecuencias. Sin embargo, el desarrollo tras el accidente de Three Mile Island de herramientas como el APS (que permiten una visión integrada del riesgo) y unido a las consideraciones de los escenarios de daño extenso desarrolladas tras Fukushima, permiten incorporar aspectos (tanto probabilísticos como de incertidumbres en el origen y evolución de posibles sucesos) al concepto de defensa en profundidad, lo que supone un

incremento en la seguridad de las centrales nucleares.

Por último, la defensa en profundidad debe verse como un concepto que integra todos los aspectos que pueden afectar a la seguridad nuclear, no solo al propio diseño y sus análisis, sino también y, en particular, a los factores humanos y organizativos. ■

- [1]. INSAG-10 – "Defence in depth in Nuclear Safety" – OIEA.
- [2]. NUREG/KM-0009 "Historical Review and Observations of Defense-in-depth" – NRC.
- [3]. NUMARC 91-06 "Guidelines for Industry Actions to assess shut-down management". - Nuclear Management and Resources Council (NEI).
- [4]. Safety of new NPP designs – WENRA report.

REFERENCIAS