

GARANTÍA DE LA DEFENSA EN PROFUNDIDAD MEDIANTE LOS ANÁLISIS DETERMINISTAS



SARA CARRASCO MANZANEDA

Responsable Revisión Seguridad – Licenciamiento y Seguridad
ANAV - ASOCIACIÓN NUCLEAR ASCÓ –
VANDELLÒS II, A. I. E.

INTRODUCCIÓN

La industria nuclear se distingue de cualquier otra actividad industrial por su elevado nivel de exigencia y responsabilidad frente a la protección de las personas y el medio ambiente contra los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes. La piedra angular de esta gestión es el concepto de defensa en profundidad, una estrategia basada en niveles de protección consecutivos diseñados para prevenir accidentes y, en caso de que ocurran, mitigar eficazmente sus consecuencias [ref. 1]. Dentro de este marco conceptual, los análisis deterministas de seguridad (ADS) operan como la herramienta analítica de validación fundamental. La metodología y el enfoque de los ADS se sustentan en la postulación de sucesos accidentales de diseño (accidentes base de diseño, ABD) bajo hipótesis estrictamente conservadoras, garantizando que las barreras físicas y los sistemas de salvaguardia protejan la integridad del núcleo del reactor y limiten el impacto radiológico potencial sobre el público.

El marco regulador español, junto con las guías de la Comisión de Regulación Nuclear (NRC) estadounidense y complementado por la normativa internacional liderada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), establece que los resultados de estos análisis deben formar parte constitutiva de las bases de licencia de la central. Todo este compendio se recoge formalmente en el Estudio de Seguridad, exigiéndose de manera explícita que su desarrollo se realice mediante metodologías conservadoras.

Para que la seguridad sea efectiva, se requiere un control y una vigilancia continuos en todas las actividades llevadas

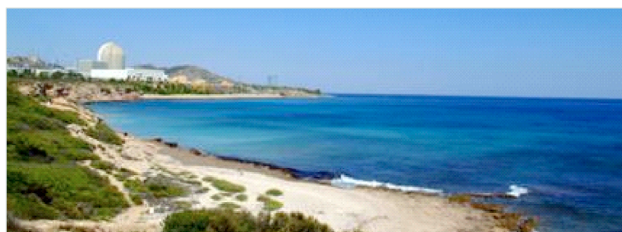


Figura 1. Fotografía de la Central Nuclear de Vandellòs II.
Fuente: ANAV.

a cabo en las centrales nucleares. Estos esfuerzos se fundamentan principalmente en el mantenimiento de los análisis de seguridad a través del seguimiento riguroso de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) y de los programas de vigilancia y mantenimiento preventivo. A su vez, se requiere que cualquier modificación física o lógica realizada en la instalación sea evaluada exhaustivamente, con el objetivo de mantener inalteradas las condiciones de explotación, las bases de licencia y, concretamente, la validez de los propios análisis de seguridad.

Los análisis deterministas de seguridad constituyen la frontera técnica infranqueable que garantiza la integridad física de la central. El mantenimiento riguroso de estos análisis y su constante actualización ante nuevos fenómenos físicos detectados a nivel internacional son aspectos esenciales para la sostenibilidad de la tecnología. La robustez del diseño, validada permanentemente por el rigor determinista, constituye la garantía definitiva de que la energía nuclear opera bajo un estándar de protección al público robusto y exigente.

LA DEFENSA EN PROFUNDIDAD Y EL ROL DE LOS ANÁLISIS DETERMINISTAS DE SEGURIDAD

El artículo 8 bis de la Directiva 2014/87/Euratom [ref. 1] establece, como objetivo primordial de seguridad de las instalaciones nucleares, que estas se diseñen, construyan, exploten y desmantelen con la premisa principal de prevenir accidentes y, en caso de producirse, atenuar sus consecuencias. Por un lado, se busca evitar dos escenarios críticos:

- Emisiones radiactivas tempranas que requirieran la aplicación de medidas de emergencia fuera del emplazamiento sin disponer del tiempo suficiente para su implantación efectiva [ref. 1].
- Grandes emisiones radiactivas que exigieran medidas de protección de la población que no pudieran estar limitadas de manera estricta en el tiempo o en el espacio.

Para asegurar el estricto cumplimiento de dicho objetivo de seguridad, se aplica, de forma sistemática, el concepto de defensa en profundidad, concebido como el medio principal para prevenir accidentes y mitigar sus consecuencias en los supuestos en que estos lleguen a materializarse. Las guías del OIEA [ref. 2] refuerzan de manera categórica la aplicación de este concepto en todas las actividades relacionadas con la seguridad y a todos los niveles organizativos, operativos, de comportamiento y de diseño, abarcando cualquier estado de potencia o parada en el que se encuentre la central nuclear. La defensa en profundidad se fundamenta en la implementación de niveles de protección independientes, estructurados de tal manera que el fallo potencial de un nivel sea cubierto por el nivel subsiguiente para asegurar la consecución de

los objetivos y principios de seguridad [ref. 2], tal y como se ilustra en la **Figura 2**.

El análisis determinista de la seguridad constituye un componente esencial e insustituible de la evaluación global de la seguridad de la instalación [ref. 2, 3, 4]. El objetivo prioritario de este análisis es confirmar fehacientemente que se pueden cumplir todas las funciones fundamentales de seguridad, verificando así la eficacia de los niveles de defensa en profundidad [ref. 2]. Asimismo, demuestra que las estructuras, sistemas y componentes necesarios, operando en combinación con las acciones previstas de los operadores, resultan plenamente eficaces para mantener las liberaciones de material radiactivo de la central por debajo de los límites legalmente aceptables.

MARCO REGULADOR NACIONAL E INTERNACIONAL

En aplicación directa de la Directiva 2014/87/Euratom del Consejo [ref. 1], resulta de obligado cumplimiento para todos los titulares de instalaciones nucleares la verificación continua de las medidas de prevención de accidentes y la atenuación de sus consecuencias. En el ámbito de los requisitos técnicos del OIEA asociados de forma directa a los análisis deterministas de seguridad, se dispone de dos referencias clave e internacionales:

- **Requisito SSR-2/1 [ref. 2]:** establece los criterios esenciales e imperativos para el diseño seguro de centrales nucleares. Este estándar clasifica de manera rigurosa los diferentes estados de la planta, delimitándolos en condiciones de operación normal, incidentes operacionales previstos, accidentes base de diseño (ABD) y condiciones de diseño extendidas (CDE).
- **Guía de seguridad SSG-2 [ref. 3]:** dedicada de forma específica al desarrollo y evaluación del análisis determinista

TABLE I. LEVELS OF DEFENCE IN DEPTH

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 detection of 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

Figura 2. Niveles de defensa en profundidad según INSAG-10.

de seguridad para centrales nucleares. Esta guía detalla los métodos analíticos aceptables para demostrar que las funciones fundamentales de seguridad (control de la reactividad, refrigeración a largo plazo del combustible y confinamiento seguro del material radiactivo) se cumplen frente a cualquier suceso iniciador postulado.

El marco regulador español relativo al análisis de accidentes base de diseño en centrales nucleares se concreta de forma específica en la instrucción IS-37 del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) [ref. 4]. Esta norma parte conceptualmente de los requerimientos técnicos y prácticas exigidas en el país de origen de la tecnología nuclear implementada en cada planta e integra las prácticas reguladoras de los organismos internacionales basadas en los requisitos del OIEA, así como los niveles de referencia de seguridad aplicables establecidos por la Asociación de Reguladores Nucleares de Europa Occidental (WENRA).

METODOLOGÍA DE LOS ANÁLISIS DETERMINISTAS DE SEGURIDAD

La verificación y validación sistemática del cumplimiento del principio de defensa en profundidad debe fundamentarse, entre otras actividades de ingeniería, en el análisis riguroso de la instalación frente a los accidentes previsibles y sus consecuencias asociadas. Estos sucesos son aquellos que, bien por su frecuencia de ocurrencia estimada o por su gravedad potencial intrínseca, deben ser cubiertos plenamente por el diseño original de la instalación, definiéndose técnicamente como accidentes base de diseño [ref. 4].

Para determinar con precisión qué sucesos o accidentes se consideran previsibles, se debe proceder, en primera instancia, a la identificación exhaustiva de los materiales radiactivos presentes en la instalación. Posteriormente, se delimitan las barreras físicas encargadas de contener la dispersión del material radiactivo o de proteger frente a las radiaciones ionizantes, analizando detalladamente los

mecanismos de fallo de dichas barreras y los escenarios específicos que puedan provocar su degradación. Este proceso permite identificar los sucesos iniciadores individuales y su correspondiente frecuencia de ocurrencia calculada. A partir de este análisis conceptual, los sucesos iniciadores postulados se clasifican estrictamente en cuatro categorías operativas según la IS-37 [ref. 4]:

- Categoría I (operación normal): comprende la operación ordinaria de la instalación y otros sucesos con una frecuencia de ocurrencia superior a 1/reactor-año. Estos eventos son acomodados de forma automática por los sistemas de control y limitación de la planta, complementados por las operaciones rutinarias de los operadores.
- Categoría II (sucesos operacionales previstos): incluye transitorios operativos con una frecuencia de ocurrencia estimada y comprendida estrictamente entre 1/reactor-año y 0,1/reactor-año.
- Categoría III (sucesos operacionales infrecuentes): engloba sucesos operacionales previstos con una frecuencia de ocurrencia comprendida entre un rango de 0,1/reactor-año y 0,01/reactor-año.
- Categoría IV (accidentes limitativos): modela accidentes que no son esperables durante la vida útil de la instalación, pero cuyas consecuencias potenciales podrían dar lugar a la liberación de cantidades significativas de material radiactivo. Debido a su severidad intrínseca, constituyen los sucesos límite a los que el diseño de las estructuras, sistemas y componentes (ESC) de la planta debe hacer frente de forma prioritaria.

A su vez, de la totalidad de los sucesos iniciadores postulados, se definen como sucesos base de diseño aquellos cuya combinación particular de hipótesis, condiciones iniciales y de contorno, para cada situación operativa concreta, den lugar a las condiciones más severas y exigentes para



Figura 3. Esquema funcionamiento de una central nuclear (PWR). Fuente: CSN

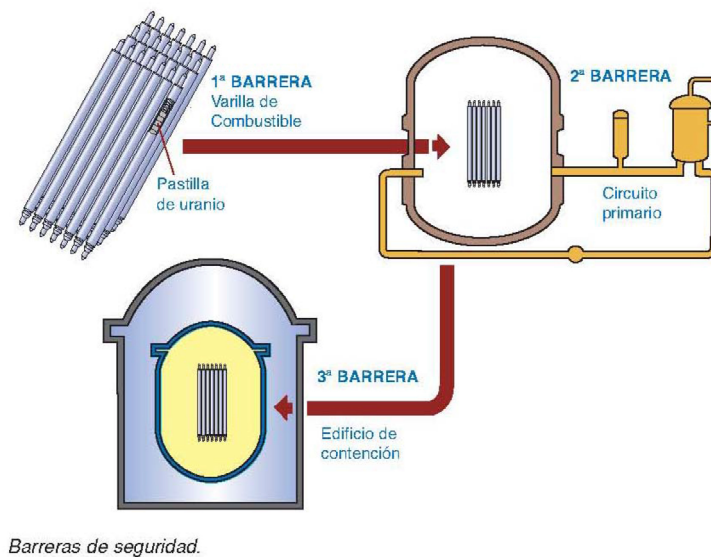


Figura 4. Barreras de seguridad. Fuente: CSN.

la planta. Estas condiciones límite determinan las cargas y requerimientos que deberán soportar las estructuras, sistemas y componentes de la instalación relacionados con la seguridad. Para asegurar la robustez del análisis, se asumen hipótesis de carácter estrictamente conservador, tales como:

- La no disponibilidad de aquellos equipos no clasificados formalmente como relacionados con la seguridad nuclear.
- La consideración obligatoria del criterio de fallo simple, aplicado de manera adicional al propio suceso iniciador, en los equipos de seguridad para garantizar de forma redundante el cumplimiento de la función de seguridad.
- La no postulación de ninguna acción correctora por parte del operador de la sala de control durante los primeros treinta minutos posteriores al suceso iniciado.
- La adopción de condiciones iniciales y parámetros de contorno de carácter envolvente respecto a la operación autorizada de la central.

Como se detalla en el esquema conceptual de la **Figura 4**, el análisis demuestra de manera inequívoca que, incluso ante el suceso más limitativo y severo, los sistemas de salvaguardia tecnológica actuarán de manera oportuna para mantener la integridad de las barreras físicas de confinamiento. Estas barreras esenciales corresponden, en orden consecutivo, a la vaina del combustible nuclear, la barrera de presión del circuito refrigerante primario y la estructura del edificio de contención.

La evaluación metodológica de dichos accidentes sigue un enfoque puramente determinista. Esto implica el establecimiento de unos criterios de aceptación rígidos (límites de seguridad de licencia) basados en el daño máximo asumible para el suceso postulado, adoptando hipótesis de cálculo marcadamente conservadoras en relación con la operabilidad de los sistemas y descartando consideraciones probabilistas. Asimismo, se evalúan las consecuencias

radiológicas potenciales asociadas, asegurando con margen que estas se mantengan sistemáticamente por debajo de los requisitos legales de protección radiológica aplicables a cada categoría de suceso. Es fundamental remarcar la importancia del cumplimiento estricto de los límites de seguridad establecidos, tanto desde la perspectiva nuclear como desde los parámetros radiológicos, prestando especial atención al mantenimiento de márgenes de seguridad adecuados entre el valor máximo calculado analíticamente y el límite legal de la licencia de explotación.

Es pertinente recordar en este punto la premisa fundacional de los análisis de seguridad deterministas: la validación práctica de la defensa en profundidad. Mediante la evaluación rigurosa de los sucesos postulados y la demostración fehaciente de la capacidad de la instalación para hacerles frente, se asegura con éxito el primer objetivo regulador, consistente en disponer de un diseño y un control operativo lo suficientemente robustos como para evitar la ocurrencia de dichos sucesos. Los análisis deterministas contribuyen de forma decisiva a identificar y optimizar aquellos aspectos de ingeniería que permiten minimizar la frecuencia de los accidentes postulados. En lo que respecta al segundo objetivo de la defensa en profundidad, ante el supuesto de la ocurrencia de un suceso accidental, estos análisis aseguran de manera cuantificable que las consecuencias se mantengan dentro de límites aceptables, garantizando que los titulares de la licencia mantengan en todo momento unos márgenes de seguridad técnica adecuados.

INTEGRACIÓN DE LOS ANÁLISIS DETERMINISTAS DE SEGURIDAD EN LA EXPLOTACIÓN DIARIA

Los análisis deterministas de seguridad no constituyen únicamente una evaluación técnica estática y documental, cuyo único fin es justificar la seguridad nuclear de una instalación mediante la delimitación conceptual de su diseño para mantener las funciones de seguridad en cualquier instante del tiempo. El alcance de los análisis deterministas

de seguridad es significativamente más amplio. Estos análisis constituyen la esencia y el origen de una instalación industrial compleja, pero, al mismo tiempo, representan la base dinámica sobre la cual se sustenta la explotación diaria y segura de la planta. Resulta complejo resumir en pocas palabras la profunda trascendencia que poseen los ADS en las operaciones cotidianas de una central nuclear, pero se puede afirmar con rigor que se encuentran plenamente integrados y visibilizados en la totalidad de las actividades ejecutadas en el emplazamiento, constituyendo un pilar fundamental de nuestra cultura de seguridad organizacional.

Llevando estas consideraciones al plano operativo real, para que las conclusiones y límites derivados de los análisis deterministas de seguridad resulten verdaderamente efectivos, se exige un control técnico y una vigilancia continua de todas las actividades operacionales desarrolladas en la planta. La herramienta documental que da soporte a esta exigencia es el Estudio de Seguridad. En este documento legal se recopila de manera pormenorizada la descripción detallada de toda la instalación, incluyendo la ingeniería de detalle de sus estructuras, sistemas y componentes; los criterios, requisitos y límites de diseño normativos y de seguridad aplicables; y los análisis de seguridad detallados de la instalación, demostrando que la planta ha sido diseñada, construida y probada de acuerdo con las condiciones fijadas en su licencia de explotación.

Las operaciones diarias de la central se ejecutan bajo una estricta y permanente supervisión técnica y administrativa a través de herramientas operativas específicas, las cuales garantizan el cumplimiento de las hipótesis de los análisis de seguridad en todo momento. Esta correspondencia y control bidireccional entre lo dictaminado por el análisis analítico de seguridad y lo que acontece realmente en los sistemas de la planta se articula de manera sólida a través de tres ejes operativos fundamentales:

A. Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF)

Las ETF representan el documento operativo de mayor rango legal y técnico derivado de forma directa de los análisis deterministas de seguridad. Mediante este documento, se identifican y controlan con rigor las condiciones mínimas obligatorias en lo relativo a la operabilidad, redundancia y capacidad funcional de las estructuras, sistemas y componentes de la planta, así como los rangos y bandas de valores permitidos para las variables de proceso y los parámetros operativos clave, asegurando que la instalación se explote exclusivamente dentro de la envolvente de operación segura.

B. Programas de vigilancia y mantenimiento preventivo

Los programas de vigilancia consisten en un conjunto estructurado de pruebas periódicas de carácter obligatorio, muchas de las cuales se derivan de manera directa de los requerimientos de las propias ETF. Estas pruebas tienen como finalidad certificar que, ante la eventualidad de una demanda real originada por un accidente postulable, los sistemas de seguridad responderían con los tiempos y capacidades analizados en los ADS. Por su parte, el mantenimiento preventivo y predictivo actúa

de forma proactiva para prevenir la degradación física y el envejecimiento de los equipos manteniendo su integridad y fiabilidad y asegurar que cumplirán las funciones de seguridad que tienen asignadas.

C. Gestión de modificaciones de diseño en la instalación

Las centrales nucleares no son infraestructuras estáticas, por esta razón, resulta de vital importancia que cualquier modificación en la instalación sea evaluada. En el marco regulador nacional, la instrucción IS-21 del Consejo de Seguridad Nuclear [ref. 5] regula de forma estricta el proceso de aceptación, evaluación y ejecución de modificaciones de diseño. El objetivo de este proceso es validar que ningún cambio introducido pueda invalidar, degradar o contradecir los supuestos básicos, las hipótesis de partida o las conclusiones finales de los análisis deterministas de seguridad vigentes.

CONCLUSIONES

La solidez de la industria nuclear y su incuestionable responsabilidad frente a la protección de la población y el medio ambiente descansan de manera inequívoca sobre la vigencia del principio de defensa en profundidad. A lo largo de este artículo, se ha demostrado que los análisis deterministas de seguridad (ADS) no constituyen meramente un ejercicio teórico aislado o una exigencia administrativa de carácter estático, sino que operan como la herramienta analítica esencial que valida de forma continua la integridad de las instalaciones nucleares. Mediante la postulación rigurosa de accidentes base de diseño bajo hipótesis estrictamente conservadoras, los ADS establecen una frontera técnica infranqueable que garantiza el control de la reactividad, la refrigeración eficiente del combustible y el confinamiento hermético del material radiactivo ante cualquier transitorio severo que pueda presentarse.

El marco regulador internacional junto con la regulación nacional plasmada en la instrucción IS-37 del Consejo de Seguridad Nuclear, forman el soporte normativo necesario para cohesionar estas metodologías. La clasificación metódica de los sucesos iniciadores y la imposición de criterios de aceptación exigentes demuestran que el diseño es intrínsecamente robusto y capaz de mitigar las consecuencias de los escenarios más limitativos.

No obstante, la eficacia real de los análisis deterministas de seguridad no reside de forma aislada en sus memorias de cálculo, sino en su capacidad para articular la explotación diaria de la planta. Como se ha expuesto, la transferencia directa de las hipótesis analíticas a la realidad operativa se consolida a través de tres ejes dinámicos interconectados: las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento, los programas de vigilancia y mantenimiento, y la gestión rigurosa de las modificaciones de diseño bajo la instrucción IS-21. Esta coordinación entre los análisis deterministas de seguridad y la gestión y control de operación de la planta garantiza que cada componente crítico responda con la fiabilidad requerida en el momento en que sea demandado.

Finalmente, ante un escenario de operación a largo plazo, la actualización continua de los análisis de seguridad es un imperativo técnico. La asimilación del análisis determinista en cada actividad del emplazamiento no solo preserva los

márgenes de seguridad y el cumplimiento de los límites de seguridad exigidos, sino que fortalece la cultura de seguridad de la organización. Es esta gestión técnica, rigurosa y exigente, la que permite reafirmar a la energía nuclear como una fuente de generación eléctrica de alta fiabilidad, operada bajo los más estrictos estándares de protección radiológica global.

REFERENCIAS

[1] Directiva 2014/87/Euratom del Consejo, de 8 de julio de 2014, por la que se modifica la Directiva 2009/71/Euratom por la que se establece un marco comunitario para la seguridad nuclear de las instalaciones nucleares. Diario Oficial de la Unión Europea, L 219/42 (25 de julio de 2014).

[2] Organismo Internacional de Energía Atómica. Safety of

Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Viena: OIEA; 2016.

[3] Organismo Internacional de Energía Atómica. Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-2 (Rev. 1). Viena: OIEA; 2019.

[4] Consejo de Seguridad Nuclear. Instrucción IS-37, de 21 de enero de 2015, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre el análisis de accidentes base de diseño en centrales nucleares. Boletín Oficial del Estado, n.º 62 (13 de marzo de 2015).

[5] Consejo de Seguridad Nuclear. Instrucción IS-21, de 28 de enero de 2009, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre los requisitos aplicables a las modificaciones en centrales nucleares. Boletín Oficial del Estado, n.º 43 (19 de febrero de 2009). ■