

UN NUEVO ENFOQUE DE LA SEGURIDAD NUCLEAR EN JUZBADO



JORGE CONTONENTE ECHEVARRÍA
Técnico de Operación y Control
de la Criticidad
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS



ENRIQUE ESCANDÓN ORTIZ
Técnico de Operación y Control
de la Criticidad
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS



GREGORIO MATEOS REY
Técnico de Operación y Control
de la Criticidad
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS



ÓSCAR ZURRÓN CIFUENTES
Jefe de Operación y Control
de la Criticidad
ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS

INTRODUCCIÓN

En una instalación de fabricación de combustible nuclear, el control de la criticidad no es un requisito más dentro del conjunto de disciplinas de seguridad; constituye la barrera frente al accidente con peores consecuencias en este tipo de instalaciones. La criticidad accidental, aunque altamente improbable en un diseño y operación adecuados, tiene consecuencias muy graves por la liberación de grandes cantidades de energía en forma de radiación así como de productos de fisión radiactivos. Por ello, la filosofía de seguridad aplicada al control de la criticidad se basa en mantener la subcriticidad con márgenes suficientes en todas las condiciones razonablemente previsibles, incluyendo desviaciones operativas y escenarios de accidentes.

Este artículo aborda la evolución del control de criticidad desde un esquema clásico —apoyado principalmente en el Estudio de Criticidad y en su traslación a diversos documentos y prácticas— hacia su integración en las Especificaciones de Funcionamiento Mejoradas (EFM), entendidas como documento oficial de explotación que unifica los requisitos esenciales para operar de forma segura. El caso descrito se enmarca en la Fábrica de Elementos Combustibles de Juzbado, donde la actualización del marco documental ha impulsado un salto cualitativo: pasar de una lógica de requisitos dispersos a un sistema integrado, trazable y auditable en un único documento de explotación, reforzando el control de parámetros clave y el papel de barreras ingenieriles críticas.

ENFOQUE TRADICIONAL: EL ESTUDIO DE CRITICIDAD COMO COLUMNA VERTEBRAL

Finalidad y metodología general

El Estudio de Criticidad ha sido históricamente el instrumento técnico de referencia para demostrar que los procesos productivos, los equipos y las configuraciones de almacenamiento mantienen condiciones subcríticas. En dicho estudio se analizan, de manera sistemática, las variables que gobiernan la reactividad: masa, enriquecimiento, geometría, moderación, interacción entre unidades, densidad o presencia de reflectores entre otros. El resultado se expresa en términos de cumplimiento de un margen subcrítico frente a un valor aceptado del factor de multiplicación efectiva keff.

La característica distintiva del modelo tradicional es que el Estudio de Criticidad constituye el “origen” técnico de los límites, pero la consulta y uso de esos límites se despliega a través de múltiples piezas documentales: requisitos de diseño, especificaciones de equipos, instrucciones de operación, hojas de seguridad y normas administrativas.

Derivación de requisitos y transferencia a la operación

Una vez evaluados los escenarios relevantes, el Estudio de Criticidad llega a conclusiones operativas: límites máximos de masa por unidad, restricciones geométricas (altura o apilamiento), condiciones de separación, límites de moderación (por ejemplo, control de humedad) ... Esos resultados se

han empleado tradicionalmente para:

- **Imponer características de diseño** (dimensiones de contenedores, geometría de equipos, disposición de estanterías, etc.).
- **Establecer controles administrativos** (procedimientos, autorizaciones, reglas de operación).

- **Definir condiciones de almacenamiento y movimiento** (ubicaciones permitidas, criterios de separación, limitación de inventarios).

Este enfoque ha permitido una operación segura y eficaz durante décadas, apoyándose en la combinación de controles ingenieriles y administrativos.

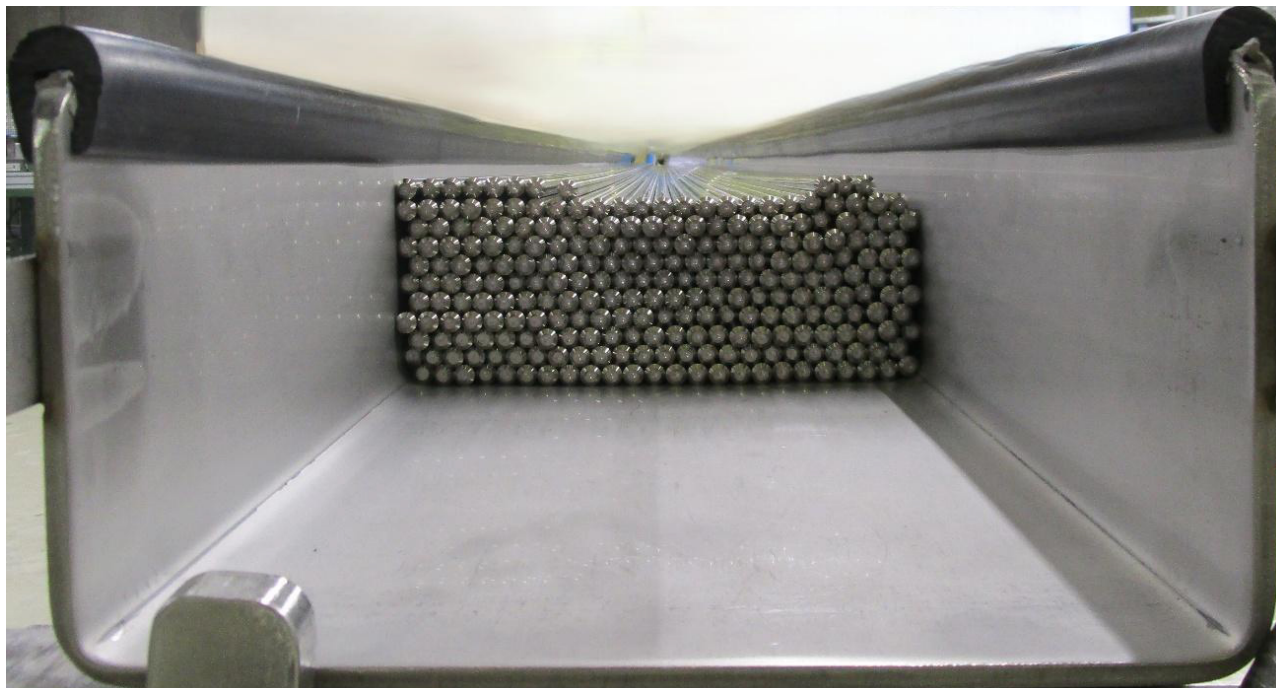


Figura 1. Acumulación de barras de combustible en una bandeja. Control del parámetro de geometría.



Figura 2. Acumulación de pastillas de UO_2 sinterizadas. Control del parámetro de geometría.

MOTIVACIÓN DEL CAMBIO: DE LA DISPERSIÓN DOCUMENTAL A LA INTEGRACIÓN NORMATIVA

La necesidad de una jerarquía documental clara

La madurez de la operación y el aumento de exigencias regulatorias tienden a favorecer modelos donde los requisitos que afectan a la seguridad estén recogidos en documentos de máximo nivel, con estructura sistemática, trazabilidad y mecanismos explícitos de vigilancia y actuación. En el enfoque tradicional, parte del control dependía de que el operador “reconstruyera” el conjunto de requisitos a partir de fuentes diversas, lo cual introduce riesgos organizativos: inconsistencias entre documentos, dificultades de actualización coordinada y complejidad para auditorías internas y externas.

En el enfoque anterior, la información de control de criticidad se encontraba dispersa, lo que dificultaba su integración en una jerarquía normativa clara y hacía que una parte de la robustez dependiera de medidas administrativas susceptibles de variabilidad.

De controles “implícitos” a controles “explícitos y verificables”

El cambio de paradigma no implica abandonar el Estudio de Criticidad; al contrario, lo reconoce como base técnica. Lo que cambia es el modo en que los resultados se convierten en obligaciones operativas: pasan a articularse dentro de un documento oficial de explotación, con límites claros, acciones ante desviaciones y un programa de vigilancia definido, orientado a asegurar cumplimiento continuo y demostrable.

Este giro responde también a una concepción moderna de la seguridad: los controles deben ser medibles, auditables, y preferentemente sostenidos por barreras ingenieriles, sin que ello reste importancia a la disciplina operativa y a la cultura de seguridad.

LAS ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO MEJORADAS (EFM) COMO INSTRUMENTO INTEGRADOR

El límite global de seguridad: $k_{eff} < 0,98$

Una decisión especialmente relevante en la implantación de las EFM es la adopción de un **límite de seguridad explícito para toda la fábrica**, estableciendo que el factor de multiplicación efectiva debe mantenerse por debajo de **0,98** en todas las condiciones. Este valor conservador, coherente con criterios de buenas prácticas, se convierte en el referente para definir parámetros operativos y condiciones de diseño.

Más allá del valor numérico, el cambio conceptual es importante: el límite deja de ser una conclusión “implícita” del estudio técnico y pasa a ser un criterio explícito que vertebra el conjunto de requisitos operacionales.

Un capítulo específico de control de criticidad

Las EFM incorporan un **capítulo específico dedicado al Control de la Criticidad**, integrando en un único lugar los aspectos asociados a límites operativos, acciones ante incumplimientos, requisitos de vigilancia y la gestión de Elementos Básicos de Seguridad (EBS).

Desde una perspectiva funcional, esto significa que el ope-

rario dispone de una “fuente única” para los requisitos críticos de criticidad: qué condiciones deben cumplirse, cómo se verifica su cumplimiento, y qué respuesta ejecutar ante desviaciones. La estructura sigue un patrón común:

1. **Condiciones Límite de Operación (CLO)**
2. **Ámbito de Aplicación de cada CLO**
3. **Acciones** en caso de desviación
4. **Requisitos de Vigilancia** (qué se verifica y con qué frecuencia)

Este esquema es característico de documentos de explotación con vocación normativa, porque facilita el uso operativo y el aseguramiento del cumplimiento.

Relación entre EFM, Estudio de Criticidad y diseño

Las EFM no sustituyen al Estudio de Criticidad: lo conectan de manera más directa con la operación. De hecho, el capítulo de “Características de diseño” mantiene la referencias explícitas a los análisis del Estudio de Criticidad vigente para los distintos procesos y áreas, enlazando con informes específicos asociados a cada bloque del proceso productivo.

Este punto es esencial: la integración normativa se logra sin perder la trazabilidad hacia el análisis técnico de base. En términos de sistema de gestión, se refuerza el triángulo **análisis-diseño-operación**, con una documentación coherente y jerarquizada.

De la administración a la vigilancia sistemática: el valor operativo de las EFM

Una de las contribuciones más relevantes del nuevo enfoque es que desplaza parte del peso del control desde “lo que se sabe” (porque está en un estudio o en un procedimiento) hacia “lo que se verifica” de forma periódica y trazable en explotación. Es decir, la seguridad no se apoya solo en que los límites estén definidos, sino en que exista un mecanismo formal para confirmar que se mantienen.

Este principio se materializa en los **Requisitos de Vigilancia**, que establecen controles periódicos o previos a determinadas operaciones, permitiendo:

- detectar desviaciones antes de que se acumulen,
- sostener la configuración subcrítica a lo largo del tiempo,
- y aportar evidencia objetiva para auditorías y supervisión regulatoria.

Al hablar de control de la criticidad estamos hablando de base en controlar la interacción neutrónica entre distintas unidades con material nuclear de tal forma que ante cualquier excursión neutrónica las reacciones de fisión en cadena tiendan a autoextinguirse. La realidad operativa es mucho más sencilla, ya que los controles se realizan sobre parámetros que afectan a la dispersión neutrónica y a las probabilidades de generar nuevas fisiones. Los controles sobre los parámetros se establecen siguiendo el Principio de Doble Contingencia, lo que asegura que en cualquier proceso se controlen al menos dos parámetros diferentes o en su defecto, se controle mediante dos formas distintas el mismo parámetro. Se incluyen a continuación algunos ejemplos representativos, por ser útiles para ilustrar cómo el control se “operacionaliza” en las EFM.

EJEMPLOS REPRESENTATIVOS DE CONTROL DE CRITICIDAD A TRAVÉS DE REQUISITOS EFM

Ejemplo 1: Control combinado masa-geometría ante una desviación

Un ejemplo característico del enfoque EFM es el tratamiento de desviaciones mediante verificación cruzada de barreras. En el control de masa, se establece en determinados almacenes y estanterías un límite de **60 kg de UO_2** por bidón, y se definen acciones escalonadas si se supera. Entre ellas, se contempla verificar de inmediato si se mantiene la condición de geometría aplicable. Si este segundo parámetro de control de la criticidad se mantiene, es decir, si las unidades conservan la geometría segura, se podrá dividir el contenido del bidón para recuperar el límite de masa que se excedió, sin haber supuesto la superación del límite de seguridad de keff. Si por el contrario, se ha perdido la geometría hablaríamos de una violación de dos controles de dos parámetros independientes, teniendo por tanto que detener el movimiento de material nuclear al afectar simultáneamente a más de una condición límite.

Desde el punto de vista de la seguridad, este mecanismo refleja una lógica de defensa en profundidad: aun cuando una barrera (masa) se vea comprometida, se evalúa inmediatamente si otras barreras (geometría, moderación) mantienen la configuración en un estado seguro y, si no, se ejecutan acciones más restrictivas (parada y recuperación rápida).

Además, el control no queda “en el aire”: se acompaña de **requisitos de vigilancia** que, en este caso, incluyen verificaciones periódicas sobre el cumplimiento del límite de masa en bidones en áreas específicas.



Figura 3. Bidones de UO_2 en el Almacén de Cuarentena, manteniendo una configuración geométrica segura gracias al diseño del almacén.



Figura 4. Bidones de UO_2 que cumplen el parámetro de moderación almacenados en estanterías. La restricción geométrica es mucho menor.

Ejemplo 2: Control de moderación mediante un parámetro operativo simple (H/U)

La moderación es un factor crucial en fábricas de combustible nuclear, porque variaciones en la presencia de hidrógeno (agua, aditivos o cualquier material hidrogenado) pueden incrementar la población de neutrones térmicos y, con ello, la reactividad. Para recoger el control de este fenómeno de forma operativa, las EFM incluyen límites sobre la relación **H/U** (hidrógeno/uranio) en determinadas condiciones, y establecen acciones si se supera el valor límite, incluyendo traslado a áreas de cuarentena o detención del movimiento de material nuclear cuando la desviación se combina con otras condiciones (por ejemplo, masa).

Lo relevante del ejemplo no es solo el parámetro elegido, sino su traducción a explotación: un indicador cuantitativo permite transformar un fenómeno físico (moderación) en una condición verificable, y su vigilancia periódica refuerza la garantía de mantenimiento de la subcriticidad a lo largo del tiempo.

Ejemplo 3: Vigilancia “previa a operación” en condiciones potencialmente más exigentes

El enfoque EFM también incorpora vigilancias vinculadas a operaciones concretas, especialmente cuando la combinación de condiciones de proceso podría acercar más la configuración al límite de seguridad. Un ejemplo es la existencia de verificaciones **antes de ejecutar**



Figura 5. Algunas operaciones necesitan la confirmación previa de que el material está aceptado por control de moderación mediante técnicas de laboratorio.

determinadas etapas, de modo que el cumplimiento del límite se comprueba “justo a tiempo”, reduciendo la probabilidad de iniciar una operación fuera de especificación. Este patrón aparece en varios controles (masa, densidad, enriquecimiento, etc.) mediante vigilancias “antes de” una operación o un traslado relevante.

En términos prácticos, este tipo de vigilancia refuerza el principio de “no iniciar si no se cumple”, limitando la exposición temporal a estados no conformes.

INTEGRACIÓN DE ELEMENTOS BÁSICOS DE SEGURIDAD (EBS): DEL ANÁLISIS INTEGRADO AL CONTROL DE CRITICIDAD

Los EBS como barreras ingenieriles en la defensa en profundidad

Un elemento diferencial del nuevo modelo es la integración explícita de los **Elementos Básicos de Seguridad (EBS)** dentro del capítulo de criticidad. Estos EBS, identificados en el marco del Análisis Integrado de Seguridad, se asocian a secuencias de accidente de riesgo moderado o inaceptable y actúan como barreras preventivas frente a desviaciones que conducen al accidente de criticidad.

Las EFM distinguen entre controles ingenieriles activos y pasivos, e incluyen, entre otros, sistemas vinculados a la dosificación de aditivos moderadores en etapas del proceso y elementos pasivos relacionados con el control de entrada de agua o el control de configuraciones geométricas en operaciones específicas (por ejemplo, el pozo de lavado).

Ejemplo de EBS pasivo: control de entrada de

moderador (impermeabilización y “tejadillos”)

En una fábrica de combustible, una fuente clásica de incremento de moderación es la entrada no prevista de agua (por lluvia, fugas o acumulaciones). Por ello, dentro de los EBS aparecen sistemas pasivos de aislamiento e impermeabilización y elementos de protección física (como tejadillos) cuyo objetivo es reducir la probabilidad de que el material nuclear quede expuesto a aportes de moderador.

Lo importante es que las EFM no se limitan a “listar” estos elementos: establecen acciones ante averías (incluyendo comprobaciones inmediatas y, si procede, detenciones de movimiento de material nuclear) y fijan vigilancias periódicas de integridad para asegurar su operabilidad continuada.

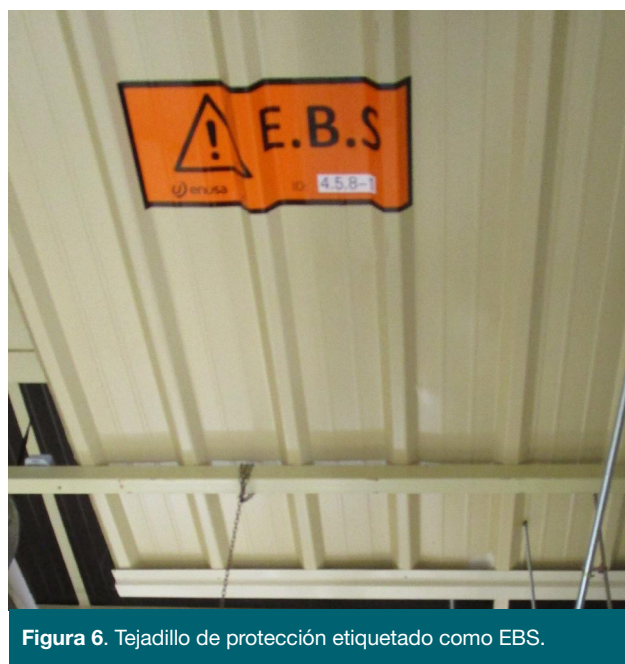


Figura 6. Tejadillo de protección etiquetado como EBS.

Ejemplo de EBS activo: sistemas asociados a dosificación

En etapas donde se incorporan aditivos o se controla la composición del material, los sistemas de dosificación constituyen controles activos relevantes para limitar estados no deseados, incluyendo escenarios que podrían afectar a la moderación o a la homogeneidad. Las EFM exigen que estos EBS estén operables en los modos de operación aplicables y definen actuaciones ante avería, incluyendo la detención inmediata de la operación y la evaluación del impacto en las condiciones de moderación interna del material potencialmente afectado.

Este enfoque conecta directamente con una idea central de la seguridad moderna: **las funciones de seguridad deben estar respaldadas por requisitos de operabilidad, vigilancia y respuesta**, no solo por un diseño inicial.

Beneficios del modelo integrado: robustez, trazabilidad y supervisión

La integración del control de criticidad en las EFM aporta



Figura 7. Sistema de dosificación de aditivos moderadores etiquetado como EBS.

mejoras sustanciales que pueden agruparse en cuatro ejes.

Robustez operativa y reducción de dependencia administrativa

Al consolidar límites, acciones y vigilancias en un documento normativo de explotación, se reduce la dependencia de controles administrativos dispersos. Esto no elimina el papel de los procedimientos, pero sí los “ancla” a un marco superior, más estable y verificable.

Trazabilidad técnica: del criterio de keff a la condición operativa

El establecimiento de un límite global ($k_{eff} < 0,98$) y su conexión con condiciones operativas y de diseño permite una trazabilidad conceptual clara: del criterio de seguridad al conjunto de barreras y controles que lo sostienen.

Facilitación de auditorías y supervisión regulatoria

La presencia de un capítulo específico de criticidad, con estructura homogénea y requisitos de vigilancia, facilita la evaluación del cumplimiento, la inspección regulatoria y las auditorías internas. La evidencia ya no depende solo de “haber definido el requisito”, sino de “demostrar que se verifica”.

Refuerzo de la cultura de seguridad

Finalmente, la integración en un documento de explotación de máximo nivel incrementa la visibilidad del control de criticidad en la operación diaria. La claridad sobre qué es un

límite, qué ocurre si se supera y qué debe vigilarse contribuye a una cultura de seguridad más consistente, al reducir ambigüedades y mejorar el alineamiento entre ingeniería, operación y supervisión.

DISCUSIÓN

Continuidad con el Estudio de Criticidad y mejora del “cierre del ciclo” documental

Puede surgir la pregunta de si este cambio implica una “sustitución” del Estudio de Criticidad por las EFM. La respuesta



Figura 8. Elementos Combustibles listos para embalar y generar energía limpia y segura.

es no: el Estudio de Criticidad continúa siendo la base analítica que justifica los límites y condiciones, mientras que las EFM actúan como mecanismo de implantación normativa y operativa de esos requisitos.

De hecho, el propio marco de diseño reflejado en las EFM mantiene la vinculación explícita con el Estudio de Criticidad vigente para múltiples procesos y áreas, lo que refuerza el ciclo completo:

1. Análisis (escenarios y demostración subcrítica)

2. Derivación de requisitos (condiciones límite, restricciones, barreras)

3. Implementación (diseño, operación y procedimientos)

4. Verificación continuada (vigilancias, operabilidad EBS, acciones)

La mejora introducida por el modelo EFM es, por tanto, el “cierre del ciclo” con una implantación más ordenada y verificable, evitando que la seguridad dependa de la dispersión documental.

CONCLUSIONES

La evolución del control de criticidad descrita en este artículo refleja una tendencia coherente con la modernización de los marcos de explotación en el sector nuclear: **pasar**

de una seguridad demostrada principalmente en estudios y trasladada de forma distribuida, a una seguridad integrada en un documento normativo de operación que unifica requisitos, vigilancia y respuesta.

En la Fábrica de Elementos Combustibles de Juzbado, la implantación de las Especificaciones de Funcionamiento Mejoradas supondrá:

- La adopción de un **criterio explícito de subcriticidad** para la instalación ($k_{eff} < 0,98$), que actúa como referencia global.
- La consolidación en un **capítulo específico de criticidad** de límites operativos, acciones ante desviaciones y requisitos de vigilancia.
- La integración de los **Elementos Básicos de Seguridad** como barreras ingenieriles cuya operabilidad, vigilancia y respuesta quedan formalizadas dentro del control de criticidad.

El resultado es un sistema más robusto, trazable y auditable, que facilita la supervisión y refuerza la cultura de seguridad, al tiempo que mantiene la continuidad técnica con el Estudio de Criticidad como soporte analítico de base. En conjunto, este enfoque representa un avance estructural significativo al alinear análisis, diseño y operación bajo una misma arquitectura documental de seguridad. ■