

COATI. CARGA OPTIMIZADA DE CONTENEDORES Y PLANIFICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE UN ATI



SARA PÉREZ AVELLEIRA

Departamento de Ingeniería Nuclear
INGECID



JAVIER ALONSO SANZ

Responsable del Dpto. de Ingeniería Nuclear
INGECID



JORGE PEÑA GUTIÉRREZ

Departamento de Ingeniería Nuclear
INGECID



BEATRIZ LAMELA PASCUA

Servicio Técnico Nuclear: Combustible gastado
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR



SUSANA GUTIÉRREZ MARTÍNEZ

Servicio Técnico Nuclear: Combustible Gastado
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR



FERNANDO PÉREZ PLA

Departamento Ingeniería de Software
INGECID



MIGUEL CUARTAS

Responsable del Departamento Ingeniería
de Software
INGECID

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, está suspendida la construcción del Almacén Temporal Centralizado (ATC) en España. La posible saturación de las piscinas de combustible gastado de las centrales nucleares (CCNN) de cara a garantizar la operación de las mismas, y la necesidad de su vaciado en caso de desmantelamiento, ha llevado al desarrollo y construcción de Instalaciones Independientes de Almacenamiento en seco de Combustible Gastado (ATI) en los emplazamientos de las CCNN.

El combustible gastado a cargar en los sistemas de almacenamiento adoptado para cada ATI tiene que cumplir con los criterios de aceptación establecidos en el Estudio de Seguridad (ES) de los contenedores. Las instalaciones de almacenamiento deben cumplir a su vez con los requisitos establecidos en la Instrucción de Seguridad IS-29 del Consejo de Seguridad Nuclear para instalaciones de almacenamiento temporal de combustible gastado y residuos radiactivos de alta actividad [1].

Sobre la base de esta situación, se ha desarrollado una nueva herramienta, llamada COATI, de apoyo a la gestión del com-

bustible gastado. Esta herramienta permite diseñar planes de carga optimizados, configurar las ubicaciones de los contenedores en los ATI y calcular tasas de dosis en puntos de interés en fechas determinadas de manera prácticamente instantánea, lo que permite verificar el cumplimiento con los criterios radiológicos adaptándose a las condiciones específicas de cualquier contenedor y de cualquier ATI.

ESTRUCTURA

COATI está desarrollado dentro de la plataforma Vircore [2] desarrollada por INGENECID, y cuenta con una estructura modular que hace posible:

- Gestionar el inventario de combustible gastado.
- Diseñar esquemas óptimos de carga de los elementos combustibles gastados en los contenedores de acuerdo con varios criterios radiológicos establecidos previamente por el usuario.
- Realizar cálculos de tasas de dosis, aproximados e inmediatos, en puntos de interés alrededor de las zonas de

almacenamiento del ATI, como podría ser el vallado de protección radiológica o el límite del área controlada en la que se establece la limitación de dosis anual de $250 \mu\text{Sv/año}$ durante la operación normal en la IS-29 [1].

- Realizar una simulación de cargas de contenedores en un ATI en distintos periodos de tiempo, pudiendo verificar si es posible el vaciado de las piscinas de combustible y cuándo podría tener lugar este vaciado, e identificándose cuántos contenedores son necesarios y qué elementos combustibles pueden ser cargados en cada fecha.

Ciertos datos requeridos por los módulos de COATI, como la evolución de la intensidad de los neutrones y fotones y del calor residual con el tiempo de enfriamiento de los elementos combustibles para un inventario determinado, se deben obtener fuera de la herramienta. Por ejemplo, mediante el código ORIGEN del paquete SCALE 6.2 [3]. Posteriormente, han de ser introducidos por el usuario como datos de entrada para COATI.

Del mismo modo, los factores de respuesta (o factores de paso a dosis) deben ser determinados previamente mediante un código adecuado, como el código MCNP o MAVRIC del paquete SCALE 6.2 [3], en función del tipo de contenedor, el diseño del ATI y la localización del punto de interés. Al igual que los datos anteriores, deben ser cargados en la herramienta por el usuario siendo datos de partida para COATI.

La Figura 1 representa la estructura del sistema.

DATOS BÁSICOS

COATI necesita disponer de los siguientes datos básicos, que han de ser cargados por el usuario:

- Inventario de elementos combustibles gastados incluyendo, entre otros, los siguientes datos: identificación del elemento, tipo o diseño del elemento combustible, fecha de descarga del núcleo, quemado acumulado en la descarga (MWd/TU), enriquecimiento inicial (% U-235) e integridad física, lo que permite caracterizarlo como normal, pendiente, dañado o desecho. Adicionalmente, se indica-

rá si está canalizado o si presenta alguna característica a considerar en la carga como puede ser la presencia de CILC (*Copper Induced Localized Corrosion*).

- Datos de los contenedores: diseños, dimensiones, capacidad de almacenamiento y regionalización, si aplica. Incluye la identificación de las posiciones del bastidor.
- Patrones de carga autorizados para cada diseño de contenedor, que pueden estar definidos como una combinación del máximo quemado alcanzado, mínimo tiempo de enfriamiento requerido, mínimo enriquecimiento inicial de U-235 y tipo/diseño del elemento combustible.
- Datos del emplazamiento: características del ATI con su topografía y la localización del área controlada y de otros puntos de interés.
- Factores de respuesta de neutrones y gamma en las posiciones del bastidor. Estos factores representan la tasa de dosis por partícula de la fuente en el punto o zona de interés y, como ya se ha indicado, se calculan externamente a COATI para una localización concreta mediante una metodología propia basada en el flujo adjunto calculado con Denovo y MAVRIC del sistema SCALE 6.2 [3].

GESTIÓN DEL INVENTARIO DE COMBUSTIBLE GASTADO

Al cargar los datos relativos al inventario de combustible gastado por el usuario, bien de forma manual o importándolos de manera masiva mediante ficheros creados a tal fin, se genera una base de datos del inventario sobre la que se pueden realizar consultas, modificar valores de atributos específicos y exportar información.

Además, el módulo proporciona procedimientos para que el resto de módulos pueden hacer lo siguiente:

- Selección de elementos combustibles gastados que tengan características específicas identificadas por el usuario (quemado, tiempo de enfriamiento, enriquecimiento, estado, etc.)
- Cálculo de la intensidad de neutrones y fotones y el calor residual de un elemento combustible gastado en un momento determinado mediante interpolación lineal entre

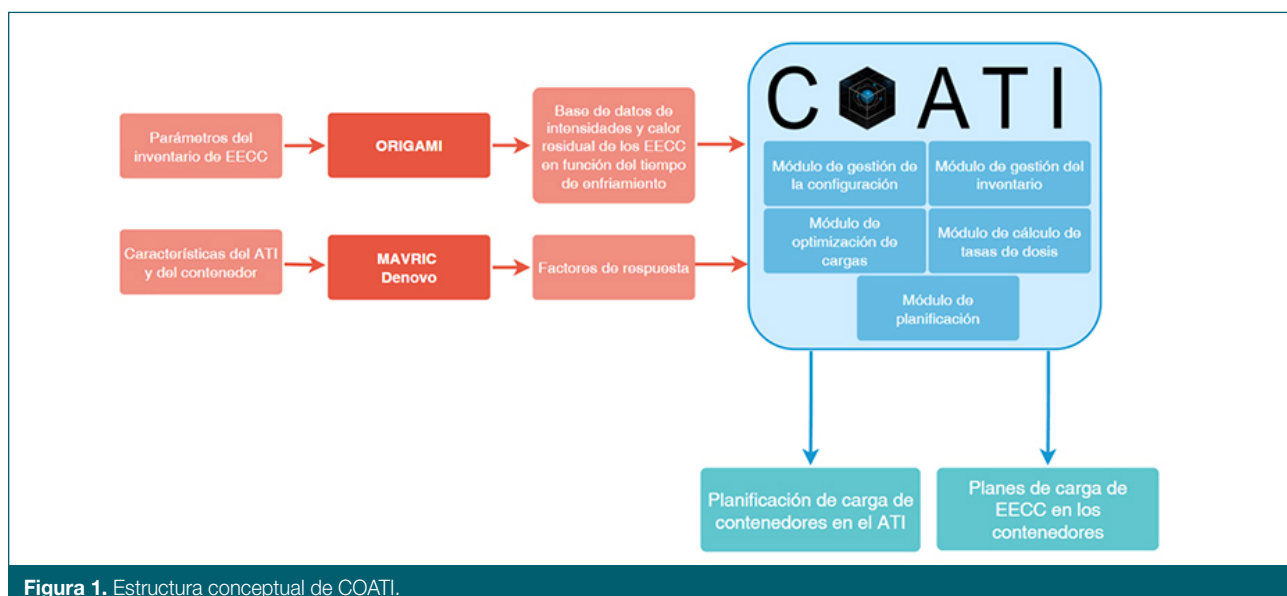


Figura 1. Estructura conceptual de COATI.

los valores correspondientes a dos instantes adyacentes. Como ya se ha indicado, para ello es necesario disponer del cálculo de fuentes en distintos tiempos desde la descarga del elemento del núcleo del reactor.

En la Figura 2 se muestra una imagen de la interfaz, donde en el panel izquierdo se muestran los datos cargados en el Módulo de Gestión de la Configuración de COATI y en el panel de la derecha se muestra una consulta al inventario de elementos combustibles gastados.

OPTIMIZACIÓN DE CARGA DE UN CONTENEDOR

De cara a la elaboración de los “Planes de Carga” en base a los cuales se autoriza la carga de un contenedor y el traslado al ATI para su almacenamiento temporal, una vez que todos los datos básicos han sido cargados en el sistema, el usuario puede solicitar a COATI que diseñe la carga óptima de un contenedor con los elementos combustibles gastados del inventario que están disponibles y que cumplen con una serie de requisitos preestablecidos.

Según sea el diseño del contenedor, las características del ATI, su topografía y el criterio radiológico seleccionado por el usuario (como, por ejemplo, maximizar/minimizar la tasa de dosis alrededor del contenedor o en un punto de interés, generalmente el límite del área controlada), el sistema selecciona aquellos elementos combustibles disponibles que puedan ser cargados en la fecha establecida por el usuario y que cumplen mejor con el criterio radiológico.

Una vez seleccionados, el sistema asigna cada elemento combustible a una posición específica permitida en las re-

giones del bastidor de un contenedor de tal forma que las dosis operacionales sean mínimas. Esto se consigue mediante la evaluación de la tasa en contacto con la superficie del contenedor.

Adicionalmente, el sistema permite al usuario realizar el diseño de la carga manualmente, en cuyo caso el usuario marca los elementos combustibles del inventario seleccionados y la posición que desea que ocupen en el bastidor del contenedor.

En la Figura 3 de muestra del proceso de generación de un mapa de carga optimizado.

Una vez realizado el diseño de las cargas correspondientes a un Lote de contenedores (entendiendo Lote como un conjunto de contenedores que se cargan en la misma campaña de carga), el sistema selecciona entre los candidatos que aún quedan disponibles un número de elementos combustibles de reserva indicado por el usuario, y genera un informe exportable que recoge, entre otra información, la figura correspondiente al mapa de carga para cada uno de los contenedores que forman el Lote.

Estos elementos de reserva son elementos gastados con unas características estructurales y radiológicas (en base a las condiciones de irradiación a las que han estado sometidos en sus distintos ciclos de operación) similares al resto de los elementos seleccionados para una región. De esta manera, si durante las operaciones de carga de los elementos seleccionados en el contenedor se diera alguna circunstancia que impida su carga, pueden sustituirse por los de reserva sin requerir un nuevo “Plan de Carga”.

En la Figura 4 se presenta una imagen del mapa de carga de un contenedor con tres regiones generado con COATI, donde se identifican las características de los elementos combustibles que ocupan cada posición del contenedor para cumplir con el contenido requerido en los “Planes de Carga”.

Una vez aprobados los planes de carga, se puede proceder a la carga de los contenedores. Durante estas actividades, se debe tomar nota de cualquier contingencia que implique la carga de un elemento combustible de reserva.

En caso de producirse tales contingencias, el usuario podrá actualizar en la aplicación el mapa de carga previamente diseñado para acomodarlo a la nueva situación.

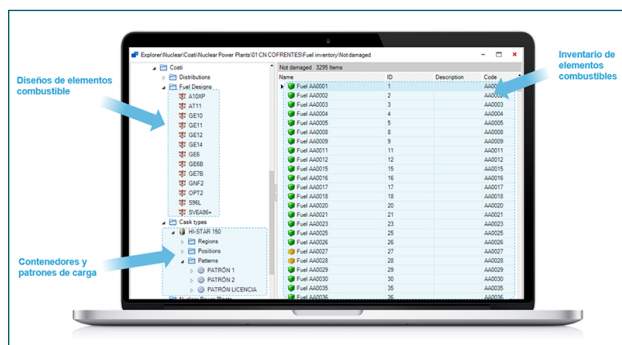


Figura 2. Interfaz de COATI: módulo de gestión de la configuración y módulo de gestión del inventario.



Figura 3. Proceso del diseño del mapa de carga de un contenedor.

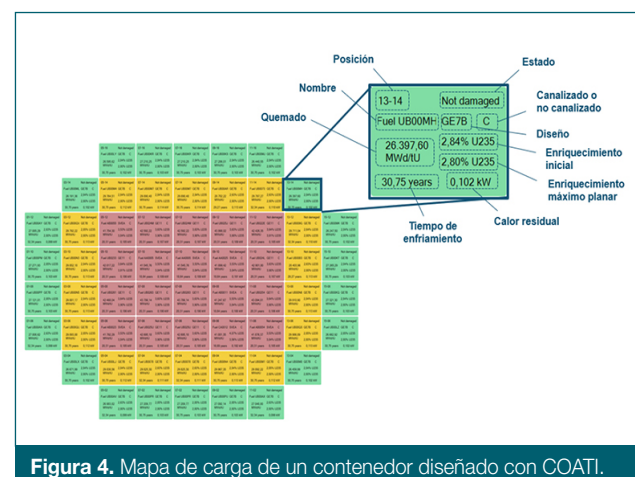


Figura 4. Mapa de carga de un contenedor diseñado con COATI.

CÁLCULOS DE TASA DE DOSIS

Una vez finalizadas las cargas de los contenedores, tanto físicamente en la central como actualizada su información en la herramienta (elementos y contenedor identificado como "Loaded"), el usuario establece las posiciones que ocupan en el ATI y puede solicitar al sistema que realice un cálculo de la tasa de dosis en el punto de interés en una fecha determinada, teniendo en cuenta los contenedores almacenados en ese momento.

Se pueden realizar dos tipos de cálculos:

- **Cálculo aproximado:** este cálculo se realiza instantáneamente utilizando los factores de respuesta disponibles en la herramienta (factores de paso a dosis) generados y cargados previamente.
- **Cálculo preciso:** en este caso, teniendo en cuenta las fuentes de cada elemento combustible cargado en los contenedores en la fecha requerida para el cálculo, el sistema genera automáticamente un fichero de entrada para ejecutar el código MAVRIC que está preparado con el modelo geométrico del contenedor y de la instalación para ser lanzado por el usuario.

Se ha verificado que los resultados obtenidos con el cálculo aproximado presentan unas diferencias con respecto al cálculo preciso inferiores al 5% en todos los casos, si bien el cálculo aproximado se puede realizar de manera instantánea mientras que el cálculo preciso requiere de largos tiempos de ejecución.

La Figura 5 muestra el proceso de diseño de la configuración de un ATI y de cálculo de tasas de dosis, con imágenes del modelo 3D que se encuentra integrado en la herramienta y desde el que se realiza la asignación de posiciones de los contenedores en el ATI.

PLANIFICACIÓN

COATI puede realizar una simulación de varias cargas de contenedores en un ATI a lo largo del tiempo, tanto para verificar el cumplimiento de los requisitos radiológicos en el punto de interés y ver su evolución temporal, como para analizar la posibilidad de vaciado completo de la piscina de elementos combustibles en una fecha determinada.

Así, el sistema permite realizar una planificación de cargas teniendo en cuenta una situación como la ilustrada en la Figura 6, en la que se realizan descargas del núcleo (entradas de combustible gastado en la piscina) y carga de contenedores (salidas de combustible gastado de la piscina) a lo largo del tiempo.

Ante esta situación, COATI asiste al usuario en las siguientes acciones:

- Actualizar el inventario tras la llegada de un nuevo elemento combustible a la piscina de combustible gastado.
- Realizar diferentes planificaciones de carga de contenedores a lo largo del tiempo.
- Determinar la fecha en la que se puede realizar el vaciado completo de la piscina, determinando en cada caso

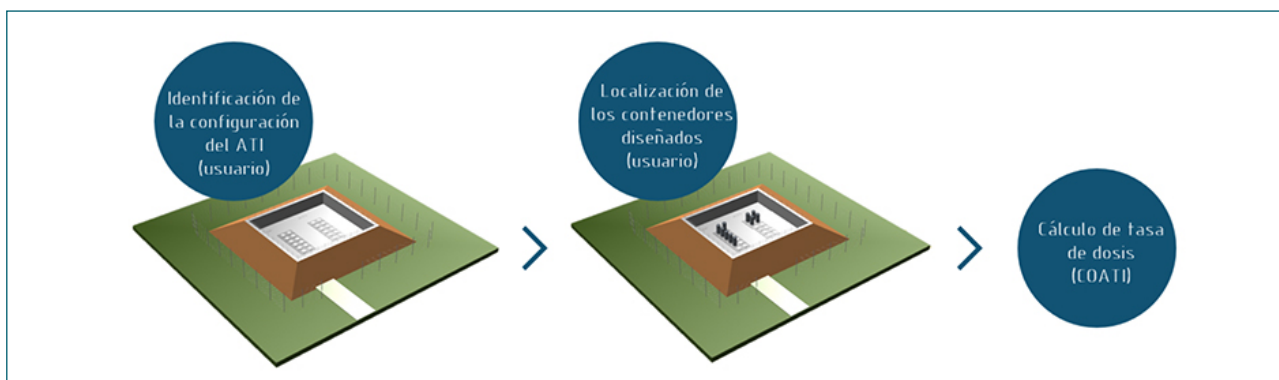


Figura 5. Configuración de posiciones en el ATI.

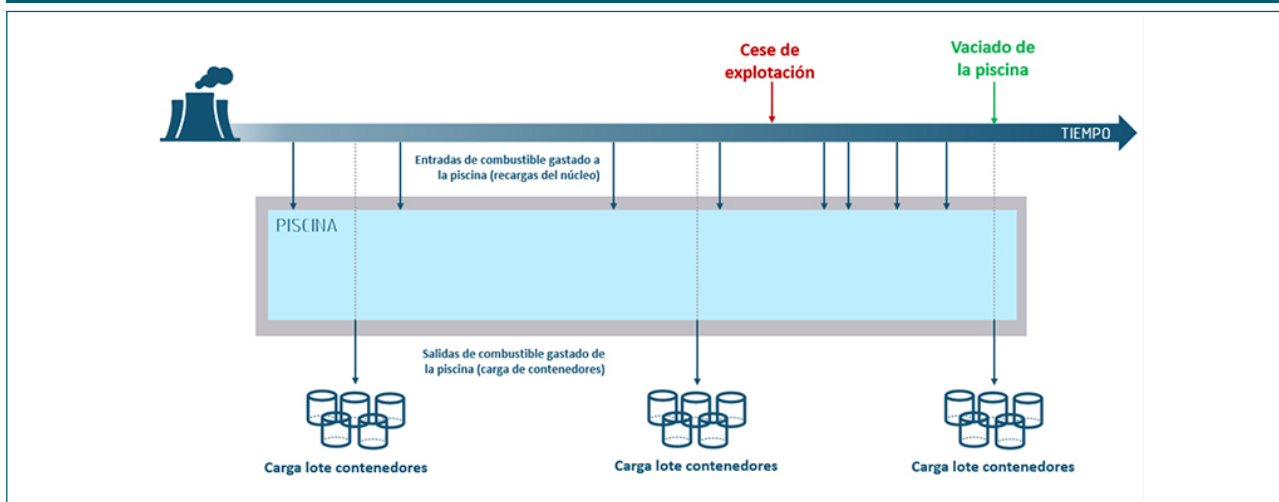


Figura 6. Esquema del proceso de planificación.

el número de contenedores requeridos y los que pueden ser cargados en cada fecha.

- En el caso de disponerse de una fecha prevista de vaciado, verificar la viabilidad del mismo, determinando la planificación de carga de contenedores.
- Calcular la tasa de dosis en el punto de interés en cualquier momento de la planificación.

PROYECTO PILOTO

Para la validación de la herramienta en un entorno piloto, en este caso el ATI de C.N. de Cofrentes, tanto a nivel unitario (de módulo) como integral, se ha diseñado y ejecutado un plan de las pruebas de las funcionalidades previstas para la herramienta COATI.

Se ha reproducido con la herramienta la carga de los cinco primeros contenedores HI-STAR 150 correspondientes a la primera campaña de carga, Lote 1, que se encuentran actualmente almacenados en el ATI de la central nuclear de Cofrentes.

Para ello, se ha realizado una simulación con COATI aplicando los criterios de carga establecidos por IBERDROLA Generación Nuclear para el diseño de la carga de estos cinco primeros contenedores, y se han comparado los resultados obtenidos con COATI con los mapas de carga reales del lote 1. De esta manera, se ha comprobado que gran parte de los elementos seleccionados para cada una de las regiones por la herramienta COATI coinciden con los seleccionados por IBERDROLA Generación Nuclear en el Plan de Carga del Lote 1, si bien, como era de esperar, no ocupan las mismas posiciones en el bastidor ni están agrupados en los mismos contenedores. Esto se debe en parte a que la distribución de los elementos por contenedor realizada por COATI se realiza minimizando las dosis operacionales.

Asimismo, se ha realizado el cálculo aproximado de las tasas de dosis en un punto de interés (punto seleccionado en los cálculos de licencia del ATI como representativo del límite del área controlada, situado en la Vereda de Alcola) obteniéndose unos resultados coherentes con los esperados.

CONCLUSIONES

COATI es una herramienta útil para la gestión del inventario de elementos gastados almacenados en las piscinas de combustible de las centrales nucleares que permite realizar cargas óptimas de los contenedores según los criterios radiológicos seleccionados por el usuario. Además, está preparado para apoyar a los usuarios en la elaboración de los Planes de Carga de los ATI, cumpliendo con los criterios de aceptación establecidos en el Estudios de Seguridad de los sistemas de almacenamiento y con los requisitos establecidos en la Instrucción de Seguridad IS-29 del Consejo de Seguridad Nuclear para instalaciones de almacenamiento temporal de combustible gastado y residuos radiactivos de alta actividad [1].

REFERENCIAS

- [1]. Instrucción IS-29, sobre instalaciones de almacenamiento temporal de combustible gastado y residuos radiactivos de alta actividad, BOE nº 265 de 2 de noviembre de 2010.
- [2]. Vircore <https://www.vircore.es/>
- [3]. W. A. Wieselquist, R. A. Lefebvre y M. A. Jessee, 2020. SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. Año 2020.■