

Planificación y control de stocks del combustible nuclear quemado en centrales nucleares PWR

Planning and control of spent nuclear fuel stocks in PWR nuclear power plants

Joaquín Bautista-Valhondo¹

Recibido: 11/11/24 | Aceptado: 10/01/25

Resumen

Se describen las fases de las dos épocas del ciclo de vida del combustible nuclear utilizado en centrales nucleares instaladas en España, así como las principales características del almacenaje en seco del stock de elementos combustibles quemados en los reactores nucleares tipo PWR. Se presentan dos modelos de programación lineal entera mixta para optimizar el encapsulamiento en una sola misión del combustible nuclear quemado. Finalmente, se aplican los modelos matemáticos a un caso hipotético sobre el vaciado de la piscina de la central nuclear de Ascó (Tarragona) en el año 2028.

Palabras clave: Central nuclear, reactor de agua a presión (PWR), gestión de stocks de combustible nuclear quemado, programación matemática, Ingeniería Circular.

Abstract

This paper describes the phases of the two epochs of the nuclear fuel lifecycle used in nuclear power plants in Spain, as well as the main characteristics of dry storage of spent fuel elements from PWR-type nuclear reactors. Two mixed-integer linear programming models are presented to optimize the single-mission encapsulation of spent nuclear fuel. Finally, the mathematical models are applied to a hypothetical case of emptying the spent fuel pool at the Ascó nuclear power plant (Tarragona) in 2028.

Keywords: Nuclear power plant, pressurized water reactor (PWR), management of spent nuclear fuel stockpiles, mathematical programming, Circular Engineering.

1. Preliminares

La actividad humana depende intensamente de los sectores energéticos. La energía es un recurso escaso a nivel global que pasa por diversas etapas: generación, distribución o reparto, transporte, y consumo por parte de los sectores económicos y de las personas.

La generación de energía eléctrica no es directa, pues se basa en transformar otras clases de energía cuya fuente puede ser natural o artificial.

Son clases de energía la cinética, la térmica y química, la lumínica y solar, la eólica, la mareomotriz y la energía nuclear. Cuando la producción de energía eléctrica se rea-

liza de manera industrial, los procesos de transformación tienen lugar en instalaciones llamadas centrales eléctricas.

El tratamiento de la energía presenta problemas en todas sus etapas. Estos problemas pueden ser resueltos con técnicas de optimización, tanto en el ámbito tecnológico como en la planificación y control de operaciones de producción, distribución y almacenaje.

Una central nuclear es una central eléctrica de alto rendimiento a la hora de transformar la energía nuclear en eléctrica; no obstante, los residuos que generan, debido a su elevada radiactividad, requieren diversos controles de carácter tecnológico que están sujetos a una estricta reglamentación a lo largo de todo el ciclo de vida del combustible

¹ IOC-ETSEIB. Universitat Politècnica de Catalunya. Avda. Diagonal 647, 08028 Barcelona, Spain. SIR-OPE Research Group (UPC): <https://futur.upc.edu/SIR-OPE>. Email: joaquin.bautista@upc.edu

nuclear, el cual culmina con la gestión de residuos radiactivos generados en las centrales nucleares.

2. Ciclos de vida del combustible nuclear.

Primera y segunda Épocas

A lo largo de su vida, el combustible empleado por un reactor de agua ligera de una central nuclear, tanto de agua a presión (PWR) como en ebullición (BWR), pasa por diferentes fases (en serie y en paralelo) que comprenden desde la extracción del mineral de uranio, para fabricar el combustible nuclear, hasta la gestión de los residuos radiactivos generados por los reactores de las centrales nucleares (CSN s.f.).

Las fases del ciclo de vida del combustible nuclear se agrupan en dos épocas solapadas parcialmente en el tiempo.

En la Primera Época, la materia (esencialmente óxido de uranio) se transforma en energía eléctrica. La Primera Época comprende el conjunto de fases que van desde que el mineral de uranio se extrae de la mina hasta que el combustible nuclear se introduce y quema en el reactor nuclear, pasando por varios procesos de conversión y enriquecimiento de la materia prima y por la fabricación de los denominados elementos de combustible, tal como se muestra en la [Figura 1](#).

Las fases de la Primera Época del ciclo de vida del combustible nuclear son las siguientes:

- F1. Extracción del mineral de uranio en excavaciones subterráneas o a cielo abierto con técnicas propias de la minería.
- F2. Primera conversión del mineral de uranio. Corresponde al proceso que transforma el octaóxido de triuranio (U_3O_8) en hexafluoruro de uranio (UF_6).
- F3. Enriquecimiento del uranio fisionable, U-235, el cual solo está presente en el 0,70% del uranio natural (básicamente U-238).
- F4. Segunda conversión del compuesto de uranio enriquecido. Corresponde al proceso de transformación de hexafluoruro de uranio (UF_6), ya enriquecido, en dióxido de uranio enriquecido (UO_2).
- F5. Fabricación de elementos combustibles (EC). Comprende la producción de pastillas de óxido de uranio enriquecido (ver [Figura 2](#)), mediante el prensado y la sinterización en horno, la carga (en vainas) y el sellado de varillas metálicas con pastillas de UO_2 , así como la agrupación de conjuntos de varillas en armazones metálicos que constituyen los elementos de combustible nuclear (ver [Figura 3](#)).

Figura 1. Esquema de la Primera Época del ciclo de vida del combustible nuclear. Fuente: Foro nuclear. Foro de la Industria Nuclear Española.

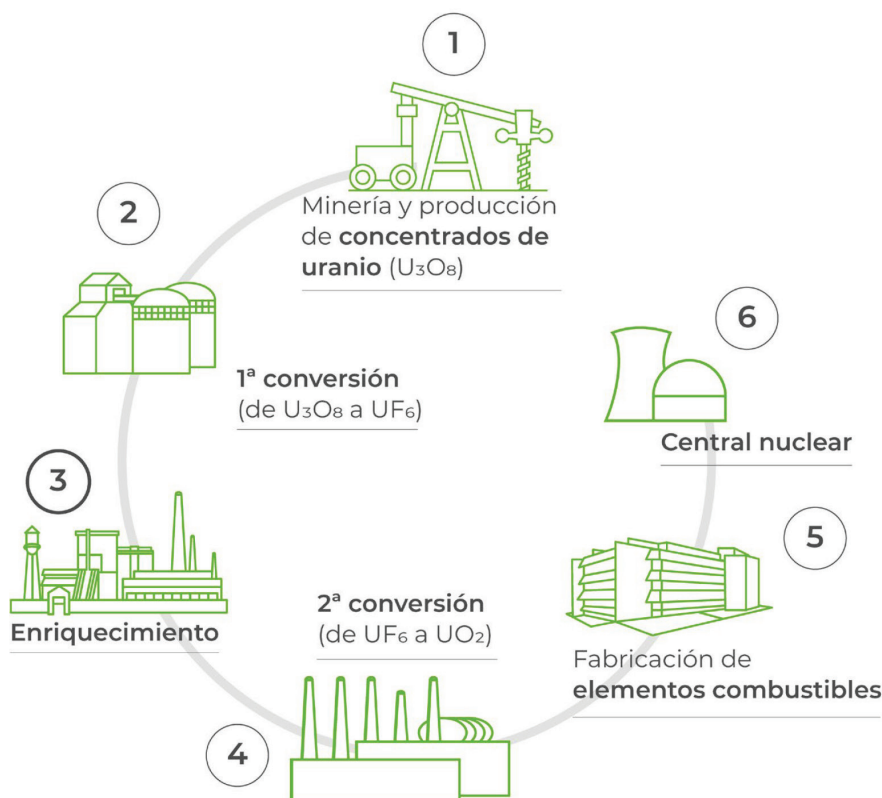


Figura 2. El UF_6 enriquecido se transforma en polvo de UO_2 que se compacta en pastillas cilíndricas cerámicas de 1cm de diámetro por 1cm de alto (aprox.) con características estables a las temperaturas que soportarán en el reactor nuclear. Fuente: Foro nuclear, Foro de la Industria Nuclear Española.



Figura 3. Las pastillas de UO_2 enriquecido se introducen en vainas, las cuales se fijan con el soporte de varillas. Las varillas se agrupan constituyendo elementos de combustible nuclear. Fuente: Foro nuclear, Foro de la Industria Nuclear Española.



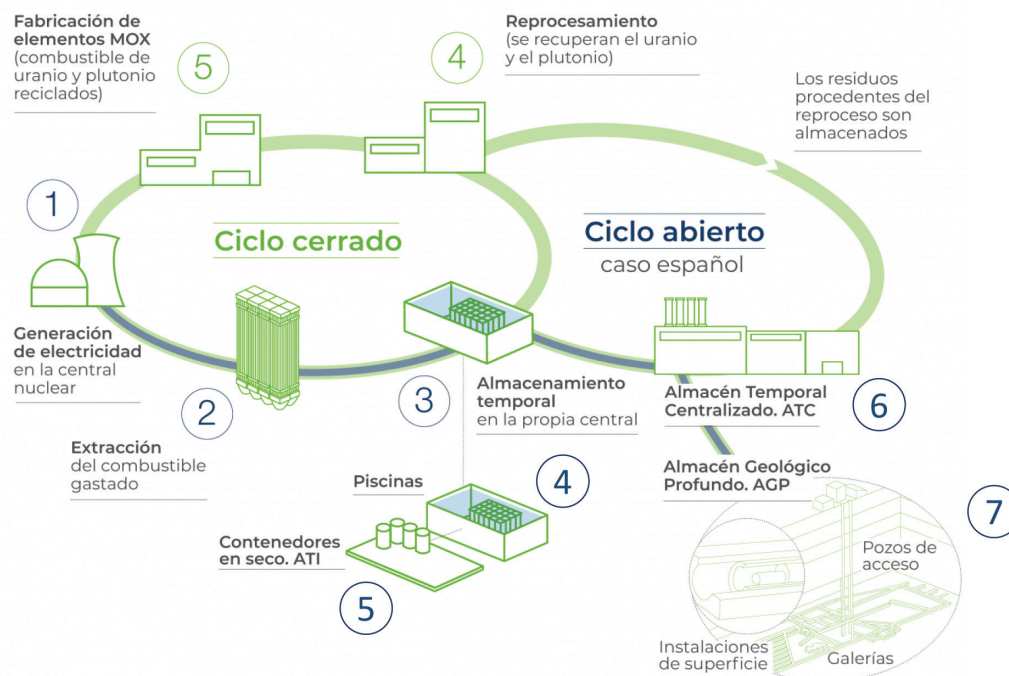
F6. Carga del reactor nuclear con elementos combustibles para generar energía.

La Segunda Época del ciclo de vida del combustible nuclear comprende las recargas del reactor y la gestión de los residuos radiactivos, tal como se muestra en la [Figura 4](#).

En España la Segunda Época del ciclo de vida corresponde a un **ciclo abierto**, de forma que las distintas fases en las que se divide el ciclo se despliegan básicamente en serie.

En países como Francia, Japón, Rusia y China, la Segunda Época del ciclo de vida del combustible nuclear se ajusta a un **ciclo cerrado** (ver [Figura 4](#)), adoptando la alternativa

Figura 4. Esquema de la segunda época del ciclo de vida del combustible nuclear. Fuente: Foro nuclear. Foro de la Industria Nuclear Española.



tecnológica de reciclar el combustible nuclear quemado tras ser almacenado en la propia central (punto 3, Figura 4). Después, se pasa a la fase de reprocesamiento para recuperar tanto el uranio fisible como el plutonio fisible (punto 4, ciclo cerrado, Figura 4). Tras ello, se procede a la fase de fabricación del MOX (*Mixed Oxide*), creando nuevos elementos combustibles compuestos por mezcla de óxidos de uranio y de plutonio (punto 5, ciclo cerrado, Figura 4). Los nuevos elementos pueden utilizarse para la generación de energía eléctrica en la central nuclear (punto 1, Figura 4), cerrando así el ciclo (o círculo) de vida del combustible nuclear.

Las fases de la Segunda Época del ciclo de vida del combustible nuclear con **ciclo abierto** - casos de España, Estados Unidos, Canadá y Finlandia - son las siguientes:

- F1. Quemado de elementos combustibles tras su introducción en el núcleo del reactor nuclear. En el reactor, el uranio sufre la reacción de fisión en cadena generando productos de fisión y gran cantidad de energía calorífica que después se transforma en energía eléctrica.
- F2. Extracción del combustible quemado y recarga del reactor con nuevos elementos de combustible. El objetivo de la fase de recarga del reactor es reemplazar un tercio del combustible quemado por nuevos elementos de combustible. El tercio de elementos irradiados pasa a la piscina de enfriamiento y el resto, junto con los nuevos, se reubica en el reactor para maximizar su quemado. El plazo nominal de una parada de recarga y extracción es

del orden de un mes y el período entre recargas y extracciones consecutivas varía entre uno y dos años según la central nuclear.

- F3. Almacenamiento temporal en la propia central. Al terminar el plazo de utilización de un elemento combustible en el reactor, este se almacena en la piscina de combustible irradiado ubicada en la planta nuclear; allí se desintegran los productos de fisión de corta vida reduciendo su radiactividad.
- F4. Almacenamiento del combustible quemado en piscinas. Los elementos combustibles irradiados que se extraen del reactor se guardan durante cinco o más años en celdas enmalladas, en el fondo de piscinas especiales de agua que están localizadas en la misma planta nuclear (ver Figura 5). El agua actúa como moderador cubriendo y refrigerando los elementos de combustible nuclear quemado durante sus primeros años de decaimiento radiactivo, mediante la absorción continua del calor residual que este genera. Tras el enfriamiento, estos elementos de combustible pierden radiactividad y se consideran residuos que son transportados y almacenados de forma temporal o definitiva.
- F5. Operaciones en el Almacén Temporal Individualizado (ATI). El objetivo de un ATI es guardar el combustible irradiado, dentro del emplazamiento de la propia central nuclear, hasta que es trasladado a una Instalación de Reproceso (IR) o a un Almacén Temporal Centralizado (ATC) o a un Almacén Geológico Profundo (AGP).

Un ATI es un almacén que se construye en la superficie o a pocos metros bajo tierra y su misión es albergar por un tiempo, ya sea en húmedo (piscinas) o en seco (bóvedas o contenedores), los residuos radiactivos de la planta nuclear a la que pertenecen.

- F6. Operaciones en el Almacén Temporal Centralizado (ATC). El objetivo de un ATC es preservar, en piscinas de agua o en cápsulas metálicas, durante un plazo concreto (v.g. 50 años o más), el combustible nuclear quemado procedente de todas o algunas plantas nucleares de un país. Las operaciones ATC constituyen una etapa intermedia de la gestión de residuos radiactivos.
- F7. Almacenamiento Geológico Profundo (AGP). Representa la última etapa de gestión de residuos nucleares de alta actividad. Consiste en aislar los residuos radiactivos a unos 500 metros bajo tierra. En primer lugar, los elementos de combustible nuclear quemado se introducen en cápsulas de metal no degradable y resistente a la corrosión, en segundo lugar, las cápsulas se ubican en el interior de galerías estables de origen geológico que además se sellan con materiales absorbentes y se rodean con tierra poco permeable y gran capacidad de retención. Así, el combustible nuclear quemado queda confinado del medio ambiente mediante dos barreras: tecnológica (cápsulas y sellado) y natural (la propia roca de la galería).

3. Sistemas de almacenamiento del combustible nuclear quemado

Tras cumplirse el plazo de utilización de los elementos combustibles en el reactor, estos se localizan en la piscina de combustible irradiado de la planta nuclear, así los productos

de fisión de vida corta se desintegran y reducen su radiactividad. En definitiva, los elementos combustibles irradiados extraídos del reactor se guardan durante cinco o más años en celdas enmalladas, en el fondo de piscinas especiales de agua (Figura 5).

Después de 5 años, los elementos combustibles quemados y enfriados pueden extraerse de la piscina en una o más etapas (Figura 5) y ser reubicados en contenedores o cápsulas que presentan mayor o menor rendimiento en la transferencia de calor del combustible en función de la tecnología utilizada, que puede ser más o menos compleja.

En general, las cápsulas están diseñadas específicamente para el almacenamiento en seco del combustible irradiado, no obstante, existen diseños de cápsulas que permiten su uso como contenedores de transporte de combustible nuclear quemado, por supuesto, siempre que cumplan todas las restricciones tecnológicas impuestas por motivos de seguridad.

En la fase de almacenamiento en seco, las operaciones de planificación y control de stocks del combustible nuclear quemado constituyen el grueso de las actividades relevantes de la gestión de residuos radiactivos.

Existen diversos sistemas para almacenar en seco el combustible nuclear quemado en una central nuclear. El sistema de almacenamiento en seco más extendido corresponde al encapsulamiento de los elementos combustibles quemados (Figura 6).

Por ejemplo, para almacenar en seco y transportar el combustible quemado por los dos reactores de la central nuclear de Ascó (Tarragona) está previsto el sistema HI-STORM, el cual cuenta con la asistencia de diversos componentes (Figura 6: Dcha.-arriba), los cuales permiten encapsular, transportar,

Figura 5. Recarga y descarga parcial del núcleo del reactor y almacenamiento en piscinas de los elementos de combustible nuclear quemado en el reactor. Fuente SNE (Sociedad Nuclear Española).

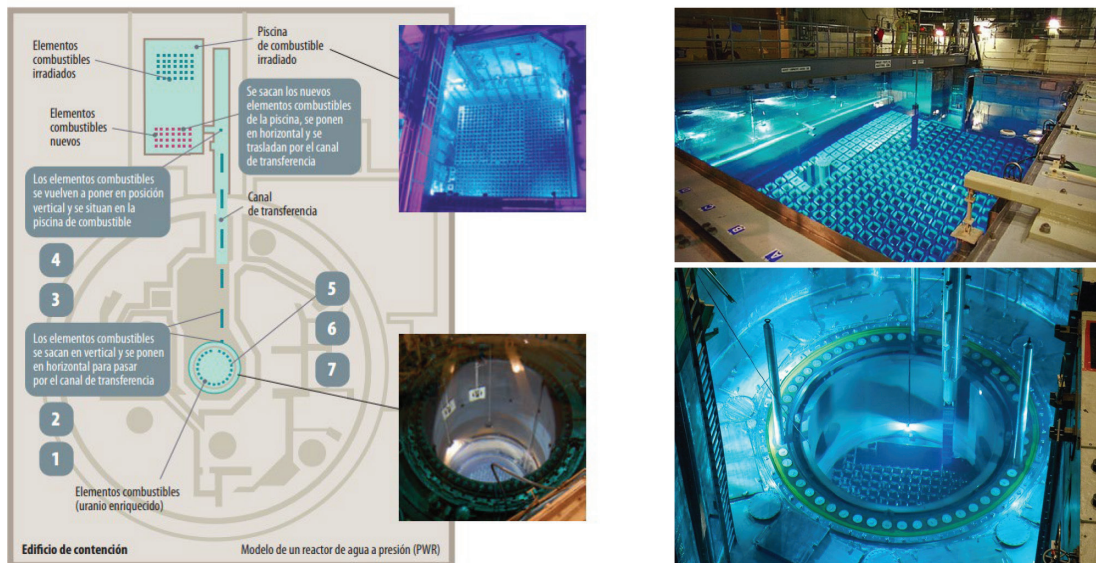
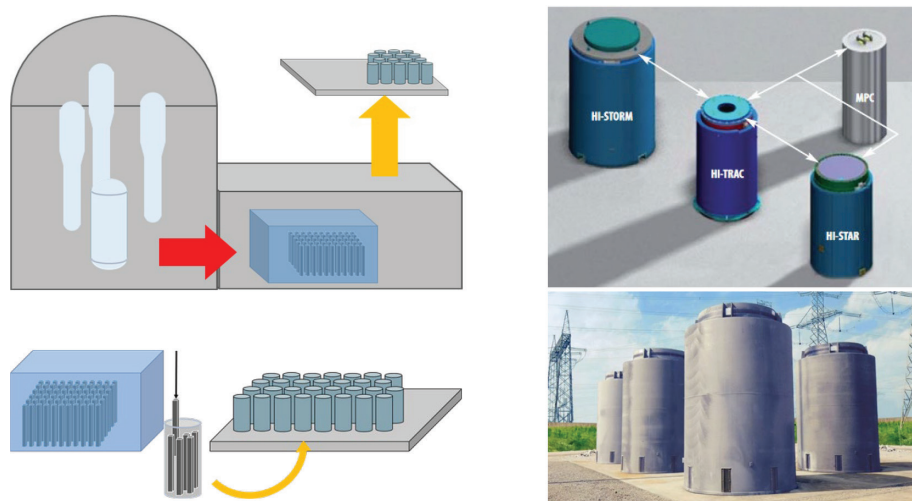


Figura 6. Izq.: Esquema de planificación y control de stocks del combustible nuclear quemado (Epoca-2). Dcha.-arriba: Componentes HI-STORM de almacenaje y transporte de combustible nuclear quemado. Dcha.-abajo: Stock de cápsulas MPC en ATI (Almacén temporal individualizado). Fuentes: Consejo de Seguridad Nuclear (CSN - España) y Nuclear Regulatory Commission (NRC- Estados Unidos).



transferir y blindar el combustible quemado en dicha central (Holtec INTL, 2008a; 2008b).

En concreto, el sistema de almacenamiento en seco HI-STORM requiere 4 componentes: (a) la cápsula multipropósito MPC (*Multi-Purpose Canister*) cuyo objeto es albergar un número determinado de elementos combustibles quemados (v.gr. 32, 37, 89), (b) el módulo de almacenamiento HI-STORM, (c) el módulo de transporte HI-STAR y (d) el módulo de transferencia HI-TRAC, cuya función es posibilitar la transferencia de la cápsula MPC entre los otros módulos (CSN, 2015a).

Esta alternativa garantiza la integridad del combustible nuclear limitando la temperatura a la que pueden estar sujetas las varillas metálicas que contienen las pastillas de dióxido de uranio (UO_2). Esto se traduce en una limitación sobre la potencia térmica (calor residual) que pueden generar los elementos de combustible nuclear quemado en el interior de cada cápsula MPC.

Las cápsulas MPC² con combustible nuclear quemado y extraído de la piscina de Ascó se guardarán en el almacén temporal individualizado de la central nuclear (MITECO, 2024), de acuerdo con el 7º Plan General de Residuos Radiactivos (MITECO, 2023).

4. Almacenamiento en seco. Central nuclear de Ascó

En el caso de la central nuclear de Ascó, una posibilidad para el almacenamiento en seco es la cápsula del tipo MPC-32

(Figura 7), cada una de las cuales puede contener hasta 32 elementos de combustible nuclear quemado (Holtec INTL, 2008a, 2008b; CSN, 2015b).

En condiciones de carga uniforme cada posición o *locus* de una cápsula MPC-32 puede contener un elemento de combustible con una potencia calorífica nominal máxima igual a 0.9375 kW medida en el instante de su carga, por tanto, la potencia térmica total que puede llegar a disipar una cápsula cargada de este tipo es igual a 30 kW como máximo.

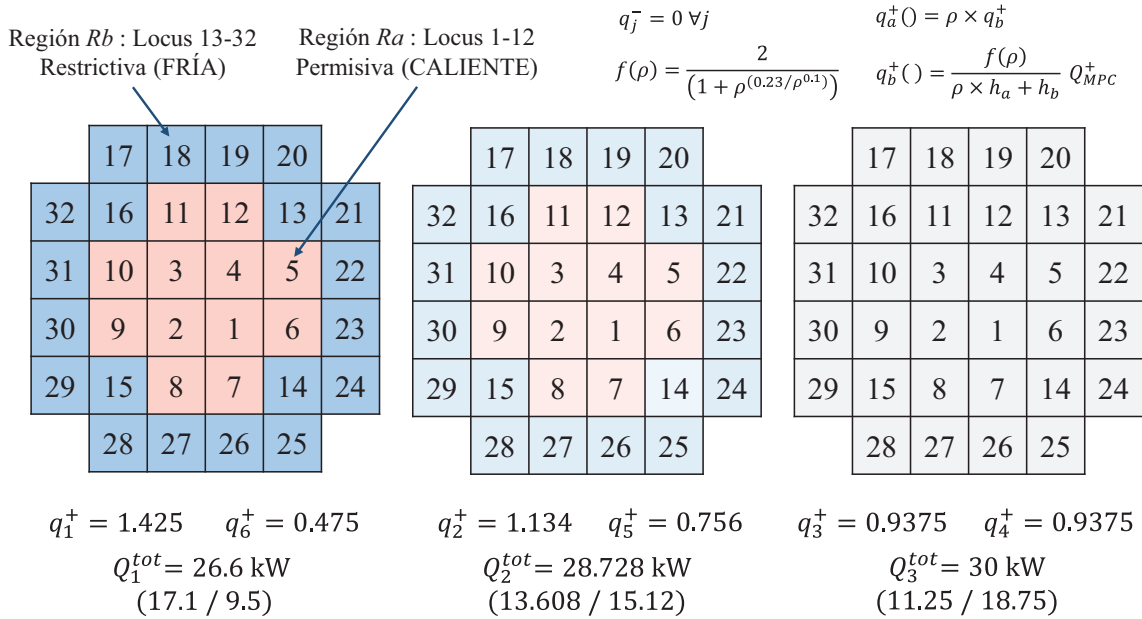
El sistema de almacenamiento en seco propuesto para Ascó permite la regionalización de las cargas térmicas. Esta posibilidad implica que una cápsula se divide, por ejemplo, en dos regiones o zonas: una región interna R_a , denominada *región permisiva* y constituida por 12 posiciones, en la que se pueden guardar hasta 12 elementos de combustible *calientes* con una potencia térmica mayor que la nominal (0.9375 kW), y una región periférica R_b , denominada *región restrictiva* y formada por 20 posiciones, cuya función es almacenar elementos de combustible *fríos* con una potencia térmica menor que la nominal (Figura 7). En cualquier caso, la potencia térmica máxima total que puede disipar cada cápsula está limitada a 30 kW .

Para determinar la potencia residual máxima permitida en cada posición de cada región de una MPC-32 regionalizada se procede del modo siguiente:

1. Se fija el valor de la potencia térmica máxima total Q_{MPC}^+ que puede disipar una cápsula MPC-32, por ejemplo, $Q_{MPC}^+ = 30 \text{ kW}$.

² Para el caso de Ascó, los tipos de cápsula MPC aprobados por el Consejo de Seguridad Nuclear son MPC-32 y MPC-37.

Figura 7. Cápsulas MPC-32 regionalizadas: tipos de cápsulas regionalizadas $l=3$; zonas térmicas $m=6$; celdas por cápsula en zona térmica $h_1=h_2=h_3=12$, $h_4=h_5=h_6=20$; límite calor residual por celda en zona térmica $q_1^+=1.425$, $q_2^+=1.134$, $q_3^+=0.9375$, $q_4^+=0.9375$, $q_5^+=0.756$, $q_6^+=0.475$.



2. Se fija el número de posiciones de cada región del contenedor. Sean h_a y h_b el número de posiciones respectivas de las regiones R_a (interna) y R_b (periférica), por ejemplo, se fijan los valores $h_a=12$ y $h_b=20$.
3. Se fija un valor para la ratio (ρ) de potencias residuales máximas permitidas en cada posición de cada región. Sean q_a^+ y q_b^+ las cargas térmicas máximas respectivas que puede soportar cada locus en las regiones R_a y R_b , entonces: $\rho = q_a^+/q_b^+$. El valor de ρ está limitado por la normativa de la forma: $1 \leq \rho \leq 3$. Por ejemplo, se fija el valor $\rho = 3$, lo cual implica $q_a^+ = 3q_b^+$.
4. Se determina la carga térmica máxima $q_b^+ = q_b^+(\rho, h_a, h_b, Q_{MPC}^+)$, correspondiente a la región restrictiva R_b , a partir de la expresión (1).

$$q_b^+(\rho, h_a, h_b, Q_{MPC}^+) = \frac{f(\rho)}{\rho \times h_a + h_b} \times Q_{MPC}^+ \quad (1)$$

Donde $f(\rho)$ es una función acotada a 1 para $\rho = 1$ y decreciente con ρ , de manera que la carga térmica total está penalizada por utilizar la opción de carga regionalizada. La función $f(\rho)$ para la cápsula MPC-32 corresponde a la fórmula (2).

$$f(\rho) = \frac{2}{(1 + \rho^{(0.23/\rho^{0.1})})} \quad (2)$$

Por ejemplo, si: $Q_{MPC}^+ = 30$, $h_a = 12$, $h_b = 20$ y $\rho = 3$, entonces, $q_b^+(\cdot) = 0.475$.

5. Se determina la carga térmica máxima, $q_a^+ = q_a^+(\rho, q_b^+)$, para la región permisiva R_a , con la fórmula (3).

$$q_a^+(\rho, q_b^+) = \rho \times q_b^+ \quad (3)$$

Por ejemplo, si: $\rho = 3$ y $q_b^+ = 0.475$, entonces, $q_a^+ = 1.425$.

Nótese que si: $\rho=1$, entonces, los valores q_b^+ y q_a^+ coinciden, tal como se refleja en la fórmula (4).

$$q_b^+ = q_a^+ = \frac{Q_{MPC}^+}{h_a + h_b} \quad (4)$$

La fórmula (4) corresponde a la situación de carga uniforme en todas las posiciones de la cápsula; en efecto, si: $Q_{MPC}^+ = 30$, $h_a = 12$ y $h_b = 20$ entonces, $q_b^+ = q_a^+ = 0.9375$, dando lugar a una sola región térmica: $q \in [0; 0.9375]$.

Cuando $\rho \neq 1$, entonces, aparecen dos regiones térmicas: $q \in [0; q_b^+]$ y $q \in [0; q_a^+]$. Por ejemplo, si: $\rho = 3$, las dos regiones térmicas son: $q \in [0; 0.475]$ y $q \in [0; 1.425]$.

En general, dada una cápsula MPC-32 y la terna $(\rho, h_a, h_b, Q_{MPC}^+)$, es posible definir, dando valores a los parámetros, tantas regiones térmicas como sea necesario para guardar en seco (encapsular) los elementos de combustible nuclear inmersos en la piscina en el instante previsto para su vaciado parcial o total, por supuesto, siempre que los elementos presenten un calor residual menor o igual a 1.425 kW, que es el valor máximo de potencia residual permitido cuando $\rho = 3$.

5. Problema del encapsulamiento del combustible nuclear quemado

5.1. Descripción del problema

En este marco conceptual surge el problema del encapsulamiento del combustible nuclear quemado³ - ECNQ- (Bautista et al., 2020a).

La variante más simple del problema consiste en programar las operaciones del vaciado (parcial o total) de la piscina para que se ejecuten en una sola misión (ECNQ/m1), entonces, el problema que nos ocupa admite la siguiente descripción.

En el instante T del horizonte temporal, que corresponde a la fecha prevista para el inicio de la misión de vaciado, se dispone de n elementos de combustible quemado inmersos en la piscina, sea I dicho conjunto.

Los elementos combustibles ($i \in I$) se caracterizan por su calor residual o de decaimiento en el instante T de extracción de la piscina, sea $q_i(T)$ tal valor. El calor residual $q_i(T)$ es función de la potencia térmica inicial $q_i(T_0)$ en el instante T_0 de inmersión del elemento $i \in I$ en la piscina y del plazo de permanencia en ella hasta la fecha de extracción.

Se dispone también de un sistema de almacenamiento en seco constituido por un conjunto K de tipos de cápsulas compartimentadas para el combustible nuclear quemado.

Cada tipo de cápsula ($k \in K$) tiene asociados un coste (γ_k) y una disponibilidad (d_k). Estos contenedores tienen dos compartimentos o regiones: R_a permisiva o interna y R_b restrictiva o periférica (Figura 7). La zonificación de los contenedores da lugar a un conjunto J de zonas térmicas virtuales. La zona térmica $j \in J$ se caracteriza por su límite superior (q_j^+) del calor residual que puede soportar, i.e. $q \leq q_j^+$ y por su capacidad h_j , es decir, el número máximo de elementos de combustible nuclear quemado que caben en la región dentro de un contenedor.

En tales condiciones, el problema del encapsulamiento de combustible nuclear quemado en una sola misión (ECNQ/m1) consiste en transferir el máximo número de elementos combustibles quemados, ubicados en la piscina de la central nuclear en la fecha T , hacia contenedores regionalizados de diverso tipo, respetando las restricciones tecnológicas de capacidad y de potencia residual máxima soportable en cada región, y minimizando el coste total de los contenedores requeridos para el vaciado parcial o total de la piscina.

5.2. Modelos matemáticos para resolver el problema

El problema que nos ocupa puede ser resuelto en dos fases. La primera fase consiste en asignar con mínimo coste los elementos combustibles quemados a regiones térmicas. La segunda fase se ocupa de ubicar los elementos combustibles quemados en las regiones térmicas de los contenedores, atendiendo a algún criterio de optimización vinculado a las cargas térmicas soportadas por estos, por ejemplo, el *equilibrado de cargas térmicas* entre las cápsulas cargadas, admitiendo este concepto diversas formulaciones.

FASE-1: ASIGNACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES A ZONAS TÉRMICAS VIRTUALES

La primera fase de resolución del problema responde a criterios económicos, teniendo en cuenta el coste de adquisición y de manipulación de cada contenedor. En esta fase se asignan los elementos combustibles quemados a zonas térmicas virtuales minimizando el número de contenedores que son necesarios para el vaciado de la piscina.

Para resolver este problema pueden utilizarse métodos exactos o bien metaheurísticas (Bautista et al., 2020b). Aquí, se ha optado por la programación lineal entera mixta como método de resolución (Bautista et al., 2024), siendo su formulación esta que sigue:

Pm-c1: Programa matemático (PLEM) de la Fase-1 del problema ECNQ/m1.

$$\min \Gamma(T) = \sum_{k=0}^l \gamma_k z_k \quad (5)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m x_{ij} = n \quad (6)$$

$$\sum_{j=0}^m a_{ij} x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} x_{ij} \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

³ Aquí se usa intencionadamente el término “quemado” en lugar de “gastado” para dar a entender que, tras cumplirse el primer plazo de utilización del combustible por el reactor, el combustible quemado resultante puede ser guardado como stock y, más tarde, puede ser reutilizado o reciclado en Ciclo de Vida Cerrado.

$$z_k \geq \frac{b_{jk}}{h_j} y_j \quad \forall j = 0, 1, \dots, m; \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (9)$$

$$z_k \leq d_k \quad \forall k = 1, \dots, l \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^l z_k \leq D \quad (11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (12)$$

$$y_j \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (13)$$

$$z_k \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (14)$$

Donde:

T Fecha de inicio de la misión para extraer elementos combustibles quemados que están inmersos en la piscina de la central nuclear. En el caso de la central nuclear de **Ascó** supondremos aquí que el vaciado de la piscina se realiza en una sola misión.

I Conjunto de elementos combustibles quemados dentro de la piscina de la central nuclear en la fecha T ; sean tales elementos: $i = 1, \dots, n$, con $n \equiv |I|$.

J Conjunto de tipos de región térmica de contenedor según la limitación máxima de calor residual ($j = 0, 1, \dots, m$ con $|J| \equiv m + 1$). La región universal $j = 0$ corresponde a la piscina por ser la que albergará los elementos no extraíbles.

K Conjunto de tipos de contenedor ($k = 0, 1, \dots, l$, con $|K| \equiv l + 1$). El contenedor universal $k = 0$ corresponde a la piscina.

$q_i(T)$ Calor residual o de decaimiento que tiene el elemento de combustible $i \in I$ en la fecha T .

q_j^+ Límite superior del calor residual que admite cada *locus* de la región térmica del tipo $j \in J$.

q_j^- Límite inferior del calor residual admisible para cualquier elemento $i \in I$ que sea ubicado en una región del tipo $j \in J$. Aquí, supondremos: $q_j^- = 0 \quad \forall j \in J$.

$a_{ij}(T)$ Coeficiente tecnológico que vale 1 si el elemento combustible $i \in I$ puede ser ubicado en una región térmica del tipo $j \in J$ en la fecha T , y vale 0 en caso contrario; esto es:

$$a_{ij} \equiv a_{ij}(T) = \begin{cases} 0, & \text{if } q_i(T) > q_j^+ \\ 1, & \text{if } q_i(T) \leq q_j^+ \end{cases}$$

b_{jk} Coeficiente tecnológico que vale 1 si la región térmica $j \in J$ está asociada a una cápsula del tipo $k \in K$, y valen 0 en caso contrario. Dichos coeficientes constituyen la matriz de relación región-contenedor B .

h_j Capacidad de almacenamiento de la región térmica $j \in J$ en una cápsula, es decir, número máximo de elementos combustibles, por cápsula, que pueden ser localizados en la región térmica $j \in J$.

d_k Número máximo de contenedores tipo k ($k = 1, \dots, l$) que pueden utilizarse para vaciar la piscina en la fecha T . Como todas las cápsulas son idénticas, los valores d_k ($\forall k$) los fija el decisor.

D Disponibilidad total de contenedores físicos utilizables en la fecha T .

γ_k Coste relativo por seleccionar un contenedor del tipo $k \in K$ para albergar elementos de combustible nuclear quemado. Como todas las cápsulas son idénticas, los valores γ_k ($\forall k$) los fija el decisor.

x_{ij} Variable binaria que adopta el valor 1 si el elemento de combustible $i \in I$ se asigna a una región del tipo $j \in J$, y vale 0 en caso contrario.

y_j Número total de elementos de combustible encapsulados en regiones térmicas del tipo $j \in J$.

z_k Número total de contenedores del tipo $k \in K$ que se emplean en el vaciado de la piscina en la fecha T .

$\Gamma(T)$ Coste total de los contenedores utilizados para albergar el combustible nuclear quemado en la fecha prevista T para vaciar la piscina de la central nuclear.

En el modelo **Pm-c1**, la función objetivo (5) representa la minimización del coste total de encapsulamiento, cuyo valor es igual al número total de cápsulas cuando es posible vaciar completamente la piscina ($z_0 = 0$) y cuando los costes para todos los tipos de contenedor son unitarios (i.e. $\gamma_k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, l$). Las igualdades (6) y (7) garantizan la asignación de los elementos combustibles a alguna región (incluida la región $j = 0$). Las igualdades (8) permiten determinar el número de elementos que deben encapsularse en las regiones térmicas del tipo $j \in J$. Las restricciones (9) acotan inferiormente el número de cápsulas de cada tipo $k \in K$, mientras que las (10) acotan superiormente tal número en función de las preferencias del decisor (d_k). La inequación (11) limita el número total de cápsulas entre sus tipos (excepto para $k = 0$, que corresponde a la piscina), en función del número de contenedores disponibles para la misión. La condición (12) impone que las variables de decisión (x_{ij}) sean binarias. Y, las condiciones (13) y (14) fuerzan a que las variables auxiliares y_j y z_k , respectivamente, sean enteras y no negativas.

La explotación del modelo **Pm-c1** ofrece tres resultados:

1. Una asignación óptima de elementos combustibles quemados a las regiones térmicas ($x_{ij}^* \in \{0, 1\} \quad \forall i \forall j$), respetando los límites máximos de calor residual permisibles en ellas ($q_j^+ \forall j$). Esta solución óptima puede representarse mediante la matriz de relación óptima combustible-región $X^*(T)$ cuyos elementos son x_{ij}^* ($\forall i \forall j$).

2. El número óptimo de elementos combustibles quemados ($y_j^* \forall j$) que debe albergar cada de región térmica de tipo $j \in J$.
3. El número óptimo de contenedores de cada tipo ($z_k^* \forall k$) correspondiente al mínimo coste de encapsulamiento de los elementos combustibles: $\Gamma^*(T)$.

$$Q_{\delta_k} \geq Q_{min} \quad \forall \delta_k = 1, \dots, z_k^*; \forall k = 1, \dots, l \quad (20)$$

$$Q_{\delta_k} \leq Q_{max} \quad \forall \delta_k = 1, \dots, z_k^*; \forall k = 1, \dots, l \quad (21)$$

$$u_{i\delta_k} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, n; \forall \delta_k = 1, \dots, z_k^*; \forall k = 1, \dots, l \quad (22)$$

FASE-2: CARGA DE ELEMENTOS EN CÁPSULAS EQUILIBRANDO LAS CARGAS TÉRMICAS

La segunda fase de resolución del problema responde a principios tecnológicos, teniendo en cuenta algún criterio para que la carga de los elementos de combustible en las cápsulas sea lo más homogénea posible. Esto implica ubicar de forma concreta todos los elementos combustibles en las regiones reales (permisiva y restrictiva) de las cápsulas.

Un criterio razonable de asignación de elementos a regiones de contenedor consiste en minimizar la dispersión del calor residual o de decaimiento que estará presente en cada cápsula tras la asignación, con ello, se consigue que las cargas térmicas y las emisiones radiológicas de las cápsulas sean lo más homogéneas posible, estando bajo control, y, además, se simplifica la gestión de stocks de cápsulas con combustible quemado en el almacén temporal individualizado (ATI), tanto a la entrada, desde la piscina al ATI, como a la salida, desde el ATI a otra instalación utilizando algún medio de transporte.

A continuación, se presenta la formulación del Programa matemático propuesto.

Pm-c2: Programa matemático simplificado asociado al problema del encapsulamiento del combustible nuclear quemado (Fase 2).

$$\text{opt } \mathcal{F}(\cdot) = \mathcal{F}(Q, T, Q_{min}, Q_{max}, Q_{med}) \quad (15)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{\delta_k=1}^{z_k^*} \mu_{i\delta_k} = n^* \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{\delta_k=1}^{z_k^*} a_{ij} b_{jk} u_{i\delta_k} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n^* \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n b_{jk} u_{i\delta_k} \leq h_j \quad \forall j = 1, \dots, m; \forall \delta_k = 1, \dots, z_k^*; \forall k = 1, \dots, l \quad (18)$$

$$Q_{\delta_k} = \sum_{i=1}^n q_i(T) \times u_{i\delta_k} \quad \forall \delta_k = 1, \dots, z_k^*; \forall k = 1, \dots, l \quad (19)$$

Donde:

I^*	Conjunto de elementos combustibles susceptibles de ser encapsulados en la fecha T . Se cumple: $I^* \subseteq I, n^* \equiv I^* = \sum_{j=1}^m y_j^*$
n^*	Número de elementos combustibles que deben ser encapsulados en la fecha T . La diferencia $n^0 = n - n^*$ corresponde al número de elementos combustibles que deben permanecer en la piscina.
δ_k	Índice de contenedor del tipo k ; esto es: $\delta_k = 1, \dots, z_k^*$ $\forall k = 1, \dots, l$.
z_{tot}^*	Número óptimo total de contenedores: $z_{tot}^* = \sum_{1 \leq k \leq l} z_k^*$
$u_{i\delta_k}$	Variable binaria que adopta el valor 1 si el elemento de combustible $i \in I$ es encapsulado en el δ_k -ésimo contenedor de tipo $k \in K$, y adopta el valor 0 en caso contrario. El rango de valores de δ_k es: $\delta_k = 1, \dots, z_k^* \forall k = 1, \dots, l$
Q_{δ_k}	Calor residual o carga térmica correspondiente al encapsulado de elementos combustibles en la fecha T en el δ_k -ésimo contenedor de tipo $k \in K$.
Q_{min}	Calor residual dentro del contenedor con menor carga térmica en la fecha T .
Q_{max}	Calor residual dentro del contenedor con mayor carga térmica en la fecha T .
Q_{med}	Carga térmica media: valor medio del calor residual emitido por el conjunto de contenedores en la fecha T ; se determina así:
	$Q_{med} = \frac{\sum_{i \in I} q_i(T)}{z_{tot}^*}$
$\mathcal{F}(\cdot)$	Función de dispersión del calor residual o de decaimiento que contienen las cápsulas con los elementos combustibles en la fecha T . Tal función se formula bajo el criterio del decisor: $\mathcal{F}(\cdot) = \mathcal{F}(Q, T, Q_{min}, Q_{max}, Q_{med})$.

El modelo **Pm-c2** incluye los siguientes conceptos. La función objetivo (15) corresponde a la optimización de la función $\mathcal{F}(\cdot)$ que mide la dispersión de las cargas térmicas dentro de las cápsulas. Las igualdades (16) a (18) garantizan que todo elemento de combustible nuclear quemado sea encapsulado en la región térmica adecuada. Las igualdades (19) calculan las cargas térmicas en los contenedores en la fecha T , una vez que los elementos combustibles han sido asignados. Las inecuaciones (20) y (21) sirven respectivamente para determinar las cargas térmicas mínima

y máxima entre el conjunto de cápsulas con carga. Y, las condiciones (22) imponen que las variables de asignación de elementos a cápsulas ($u_{i\delta_k}$) sean binarias.

La explotación del modelo **Pm-c2** ofrece tres resultados:

1. Una asignación óptima de los elementos combustibles quemados a las cápsulas a través de las variables binarias $u_{i\delta_k}^* \in \{0,1\} \forall i \forall \delta_k$, respetando los límites máximos de calor residual permitidos en las regiones térmicas (parámetros a_{ij}) y la compatibilidad entre tipos de región térmica y tipos de contenedor (parámetros b_{jk}).
2. Los valores óptimos del calor residual o carga térmica (en fecha T) que contiene cada cápsula a través de las variables $Q_{\delta_k}^* \forall \delta_k$.
3. El valor óptimo \mathbb{F}^* correspondiente a la función $\mathcal{F}(\cdot)$ de dispersión de carga térmica entre las cápsulas cargadas de combustible nuclear quemado.

La función objetivo $\mathbb{F}(\cdot)$ representa la variabilidad de la carga térmica entre las cápsulas cargadas – fórmula (15) –, por tanto, puede ser útil cualquier métrica estadística de dispersión (Bautista-Valhondo, 2024), siendo válidas las siguientes funciones objetivo:

1. Minimización de la máxima carga térmica:

$$\min Q_{max} = \max_{\forall \delta_k} Q_{\delta_k} \quad (23)$$

2. Maximización de la mínima carga térmica:

$$\max Q_{min} = \min_{\forall \delta_k} Q_{\delta_k} \quad (24)$$

3. Minimización del rango de la carga térmica:

$$\min R(Q,T) = Q_{max} - Q_{min} \quad (25)$$

4. Minimización de la desviación absoluta media de la carga térmica:

$$\min \bar{\Delta}(Q,T) = \frac{1}{z_{tot}^*} \sum_{k=1}^I \sum_{\delta_k=1}^{z_k^*} |Q_{\delta_k} - Q_{med}| \quad (26)$$

5. Minimización de la desviación tipo de la carga térmica:

$$\min \sigma(Q,T) = \sqrt{\frac{1}{z_{tot}^*} \sum_{k=1}^I \sum_{\delta_k=1}^{z_k^*} (Q_{\delta_k} - Q_{med})^2} \quad (27)$$

6. Minimización de la varianza de la carga térmica:

$$\min \sigma^2(Q,T) = \frac{1}{z_{tot}^*} \sum_{k=1}^I \sum_{\delta_k=1}^{z_k^*} (Q_{\delta_k} - Q_{med})^2 \quad (28)$$

6. Explotación de modelos. Ejemplo en Central Nuclear de Ascó

6.1. Descripción del escenario

A modo de ejemplo, se considera un escenario hipotético en el que todas las operaciones de generación de energía en la Central Nuclear **Ascó** se interrumpen al final de su ciclo 29 (abril de 2023). Esto implica que los elementos combustibles correspondientes a la hipotética última descarga del reactor se tienen en cuenta para el encapsulamiento en seco junto con los elementos que ya estaban inmersos en la piscina.

Por otra parte, la normativa vigente implica que, para ejecutar las operaciones del vaciado completo de la piscina, debe pasar cierto tiempo (v.gr. 5,5 años) para que el calor residual de los últimos elementos combustibles descargados del reactor descienda hasta un valor admisible ($q \leq 1.425 \text{ kW}$, para $\rho = 3$). Así que el ejemplo que nos ocupa corresponde a una situación futura, hipotética y conservadora de la Central Nuclear de **Ascó** en el mes de septiembre del año 2028.

Aquí, se ha supuesto que el vaciado completo de la piscina se realizará en una misión (problema ECNQ/m1), por tanto, los elementos combustibles quemados permanecerán en la piscina de la central nuclear hasta el mes de septiembre de 2028.

6.2. Características de la simulación, datos y condiciones

Las características básicas, datos y condiciones de la simulación propuesta son:

- Instancia: ASCO#01(2028_5.5). Los datos correspondientes a esta instancia pueden consultarse en Bautista-Valhondo 2025.
- Fecha simulación última descarga del reactor nuclear: 2023-03-01
- Fecha simulación vaciado de piscina de combustible quemado: 2028-09-01
- Tiempo de enfriamiento en piscina últimos elementos combustibles: 5.5 años.
- Número de misiones: 1 misión.
- Número de elementos de combustible (EC) extraíbles de la piscina: $n = 1253 \text{ EC}$.
- Calor residual total en cápsulas (fecha: 2028-09): $Q_{tot} = 955.82 \text{ kW}$.
- Calor residual de los elementos combustibles (fecha: 2028-09): $q_{min} = 0.309 \text{ kW}$, $q_{max} = 1.424 \text{ kW}$, $q_{med} = 0.763 \text{ kW}$, $\sigma(q) = 0.215 \text{ kW}$.
- Cápsulas utilizadas: MPC-32 regionalizadas.

- Regionalización: 2 regiones: R_a caliente o permisiva y R_b fría o restrictiva.
- Número de zonas térmicas virtuales: $m = 6$.
- Límite del calor residual $[q_j^-, q_j^+]$ (kW) por celda en cada zona térmica virtual:
 $q_j^- = 0 \forall j = 1, \dots, 6$.
 $q_1^+ = 1.425, q_2^+ = 1.134, q_3^+ = 0.9375$.
 $q_4^+ = 0.9375, q_5^+ = 0.756, q_6^+ = 0.475$.
- Número de celdas por cápsula de cada región térmica:
 $h_1 = h_2 = h_3 = 12$.
 $h_4 = h_5 = h_6 = 20$.
- Número de tipos de cápsulas regionalizadas: $l = 3$.
- Coste relativo por tipo de cápsula regionalizada: $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 1, \gamma_3 = 1$.
- Número total de cápsulas MPC-32: $z_{tot}^* = 40$ cápsulas.
Resultado de **pm-c1**
- Número de cápsulas por tipo: $z_1^* = 5, z_2^* = 22, z_3^* = 13$.
Resultado de **pm-c1**
- Función objetivo pm-c2: $\min \mathbb{Q}(\cdot) \equiv \min Q_{max} = \max_{\forall \delta_k} \{Q_{\delta_k}\}$
- Solucionador: IBM CPLEX solver. Procesador: Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz y RAM 16,0 GB.

6.3. Instancia ASCO#01(2028_5.5). Resolución y resultados

La resolución del problema se ha dividido en tres fases: regionalización, encapsulamiento y equilibrado de carga.

FASE-0 de regionalización:

Se definen las zonas térmicas virtuales ($j \in J$) y los tipos de cápsulas regionalizadas ($k \in K$) para albergar los elementos combustibles extraíbles del conjunto I^* .

Esta fase se realiza por tanteo empleando Excel o utilizando heurísticas que actúan sobre la variación del pará-

metro $\rho = q_a^+ / q_b^+$ hasta conseguir que todos los elementos de combustible extraíbles tengan asignada una zona térmica virtual.

Los resultados de esta fase son: el número de zonas térmicas (m), los límites de potencia térmica $q_j^+ (\forall j = 1, \dots, m)$ y los coeficientes tecnológicos $a_{ij} (\forall i \forall j)$ y $b_{jk} (\forall j \forall k)$.

FASE-1 de encapsulamiento:

Se explota el modelo **pm-1** codificado para su ejecución en IBM CPLEX solver. El tiempo de CPU empleado es inferior a 1s. En esta fase se obtiene una solución inicial de carga de contenedores.

En la [Figura 8](#) se muestra una solución ofrecida por IBM CPLEX solver para el modelo **pm-c1**, atendiendo al objetivo de minimizar el coste total de contenedores requeridos: $\min \Gamma(T) = \sum_{k=0}^1 \gamma_k z_k$. La solución #2.1 en forma gráfica, aun siendo óptima en coste de contenedores, refleja un mal reparto de la carga térmica entre las cápsulas.

En cuanto a métricas de dispersión, la solución #2.1 ofrece los siguientes valores:

- Número de cápsulas MPC-32 requeridas: 40 cápsulas (óptimo).
- Carga térmica máxima en MPC-32 nro. 39 (tipo 3): $Q_{max} = 29.2530$ kW.
- Carga térmica mínima en MPC-32 nro. 40 (tipo 3): $Q_{min} = 6.5339$ kW.
- Rango de la carga térmica: $R(Q) = 22.7191$ kW
- Carga térmica media: $Q_{avg} = 23.8954$ kW.
- Desviación tipo de la carga térmica: $\sigma_Q = 3.9683$ kW.

Por otra parte, en la [Tabla 1](#) se detallan los valores numéricos del calor residual total Q_{tot} en cada cápsula (1 a 40), la carga térmica Q_{Ra} de la región interna o permisiva, la carga térmica Q_{Rb} de la región periférica o restrictiva y el número

Figura 8. Solución Fase-1 Sol#2.1-ASCO#01. Para las cápsulas 1 a 40, calor residual (kW) contenido en las regiones permisiva (R_a) y severa (R_b). Límites térmicos por celda (kW): cápsulas 1 a 5: $q_a^+ = 1.425, q_b^+ = 0.475$ cápsulas 6 a 27: $q_a^+ = 1.134, q_b^+ = 0.756$ cápsulas 28 a 40: $q_a^+ = q_b^+ = 0.9375$.

Carga térmica cápsulas MPC-32. Sol#2.1-ASCO#01(2028_5.5). Año 2028

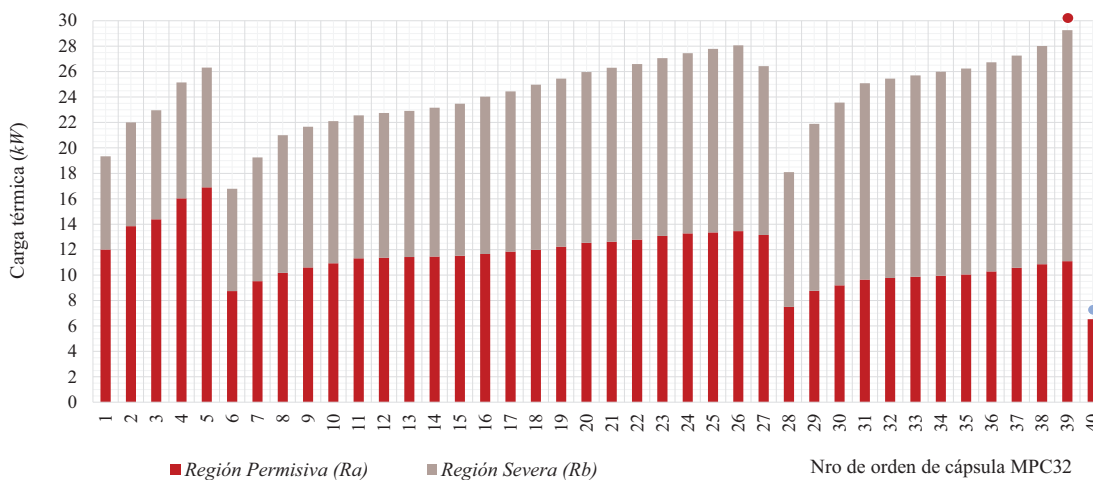


Tabla 1. Solución Fase 1 Sol#2.1-ASCO#01. Cápsulas MPC32 de 1 a 40: calor residual Q_{Ra} (kW) en región interna; calor residual Q_{Rb} (kW) en región externa; calor residual total Q_{tot} (kW); y número de elementos combustibles (ECs).

MPC	Q_{Ra}	Q_{Rb}	Q_{tot}	ECs	MPC	Q_{Ra}	Q_{Rb}	Q_{tot}	ECs
1	12.0159	7.3268	19.3427	32	21	12.6325	13.6672	26.2997	32
2	13.8516	8.1504	22.0020	32	22	12.7967	13.7938	26.5905	32
3	14.3898	8.5684	22.9582	32	23	13.0840	13.9779	27.0619	32
4	16.0379	9.1147	25.1526	32	24	13.2801	14.1691	27.4492	32
5	16.8984	9.4181	26.3165	32	25	13.3548	14.4344	27.7892	32
6	8.7431	8.0503	16.7934	32	26	13.4522	14.6087	28.0609	32
7	9.5270	9.7280	19.2550	32	27	13.1511	13.2785	26.4296	30
8	10.1757	10.8236	20.9993	32	28	7.5000	10.5964	18.0964	32
9	10.6035	11.0644	21.6679	32	29	8.7712	13.1237	21.8949	32
10	10.9277	11.1829	22.1106	32	30	9.1909	14.3780	23.5689	32
11	11.3150	11.2486	22.5636	32	31	9.6508	15.4277	25.0785	32
12	11.3735	11.3765	22.7500	32	32	9.7775	15.6694	25.4469	32
13	11.4194	11.4927	22.9121	32	33	9.8785	15.8202	25.6987	32
14	11.4617	11.7004	23.1621	32	34	9.9466	16.0489	25.9955	32
15	11.5223	11.9539	23.4762	32	35	10.0497	16.1942	26.2439	32
16	11.6637	12.3588	24.0225	32	36	10.2909	16.4398	26.7307	32
17	11.8494	12.5953	24.4447	32	37	10.5801	16.6825	27.2626	32
18	11.9807	12.9910	24.9717	32	38	10.8548	17.1553	28.0101	32
19	12.2411	13.2131	25.4542	32	39	11.0986	18.1544	29.2530	32
20	12.5363	13.4299	25.9662	32	40	6.5339	0.0000	6.5339	7

de elementos de combustible nuclear quemado (ECs) localizados en cada contenedor.

Los detalles técnicos sobre la solución #2.1, correspondientes a la localización de cada uno de los elementos de combustible quemados, en cada posición (1-12 a 13-32) de cada cápsula (1 a 40), pueden consultarse en Bautista-Valhondo 2025.

FASE-2 de *equilibrado de la carga térmica*:

Se explota el modelo **pm-2** codificado para su ejecución en IBM CPLEX solver. El tiempo de CPU concedido es igual a 600s. En esta fase se obtiene una solución final de carga de contenedores con el propósito de reducir la dispersión de la carga térmica en el conjunto de cápsulas.

En la Figura 9 y la Tabla 2 se muestra la solución final directa que ofrece IBM CPLEX solver para el modelo **pm-c2**, atendiendo al objetivo de minimizar la máxima carga térmica en las cápsulas: $\min Q_{max}$. La solución #2.2, sin ser óptima para el objetivo $\min Q_{max}$, presenta una distribución homogénea de la carga térmica entre las cápsulas.

Los valores de las métricas de dispersión correspondientes a la solución #2.2 son:

- Número de cápsulas MPC-32 requeridas: 40 cápsulas (óptimo).

- Carga térmica máxima en MPC-32 nro. 27 (tipo 2): $Q_{max} = 24.0402$ kW.
- Carga térmica mínima en MPC-32 nro. 04 (tipo 1): $Q_{min} = 23.2109$ kW.
- Rango de la carga térmica: $R(Q) = 0.8293$ kW
- Carga térmica media: $Q_{avg} = 23.8954$ kW.
- Desviación tipo de la carga térmica: $\sigma_Q = 0.1782$ kW.

Los detalles técnicos sobre la solución #2.2, en cuanto a la localización de cada elemento de combustible quemado, en las posiciones (1-12 a 13-32) de las cápsulas (1 a 40), pueden consultarse en Bautista-Valhondo 2025.

7. Conclusiones

Las centrales nucleares tienen alto rendimiento en el proceso de generación de energía eléctrica a partir del combustible nuclear, puesto que sus factores de planta (ratio entre potencias generada e instalada) pueden superar el 90%.

El combustible nuclear, debido a su elevada radiactividad, requiere un control estricto de carácter tecnológico durante todo su ciclo de vida, dicho control se ajusta a un conjunto de reglamentos nacionales e internacionales.

Figura 9. Solución Fase-2 Sol#2.2-ASCO#01. Para las cápsulas 1 a 40, calor residual (kW) contenido en las regiones permisiva (R_a) y severa (R_b). Límites térmicos por celda (kW): cápsulas 1 a 5: $q_a^+ = 1.425$, $q_b^+ = 0.475$ cápsulas 6 a 27: $q_a^+ = 1.134$, $q_b^+ = 0.756$; cápsulas 28 a 40: $q_a^+ = q_b^+ = 0.9375$

Carga térmica cápsulas MPC-32. Sol#2.2-ASCO#01(2028_5.5). Año 2028

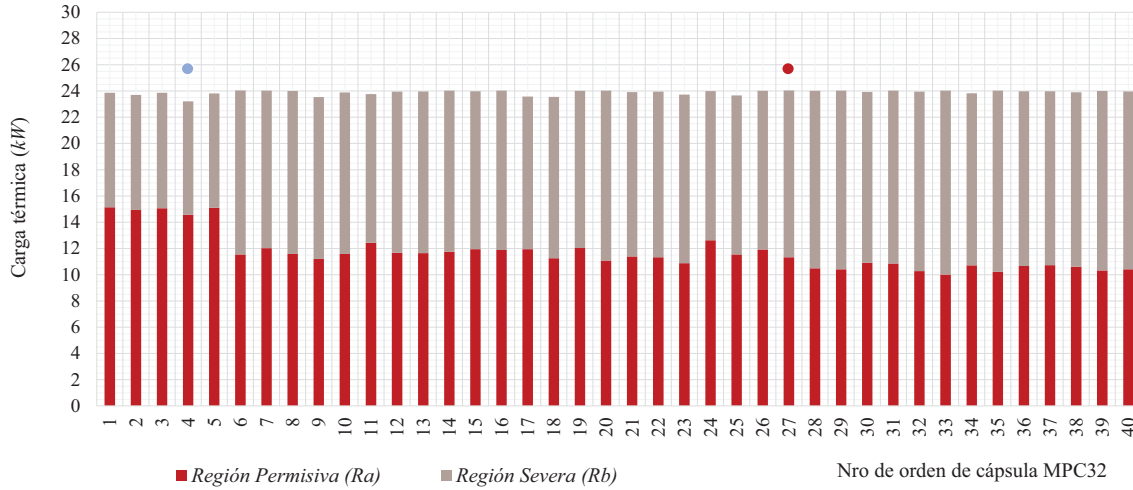


Tabla 2. Solución Fase 2 Sol#2.2-ASCO#01. Cápsulas MPC32 de 1 a 40: calor residual Q_{Ra} (kW) en región interna; calor residual Q_{Rb} (kW) en región externa; calor residual total Q_{tot} (kW); y número de elementos combustibles (ECs).

MPC	Q_{Ra}	Q_{Rb}	Q_{tot}	ECs	MPC	Q_{Ra}	Q_{Rb}	Q_{tot}	ECs
1	15.1462	8.7137	23.8599	32	21	11.3982	12.5216	23.9198	32
2	14.9433	8.7612	23.7045	32	22	11.3357	12.6123	23.9480	32
3	15.0679	8.8000	23.8679	32	23	10.8745	12.8577	23.7322	32
4	14.5694	8.6415	23.2109	32	24	12.6295	11.3624	23.9919	31
5	15.1055	8.7092	23.8147	32	25	11.5516	12.1100	23.6616	31
6	11.5405	12.4988	24.0393	32	26	11.9259	12.0954	24.0213	32
7	12.0221	12.0022	24.0243	32	27	11.3274	12.7128	24.0402	31
8	11.5844	12.4191	24.0035	32	28	10.4872	13.5296	24.0168	29
9	11.2011	12.3357	23.5368	31	29	10.4185	13.6102	24.0287	29
10	11.5805	12.3042	23.8847	31	30	10.9222	13.0056	23.9278	29
11	12.4396	11.3222	23.7618	32	31	10.8547	13.1736	24.0283	29
12	11.6752	12.2756	23.9508	32	32	10.2702	13.6788	23.9490	31
13	11.6429	12.3258	23.9687	32	33	10.0098	14.0198	24.0296	31
14	11.7544	12.2689	24.0233	32	34	10.7102	13.1215	23.8317	31
15	11.9491	12.0289	23.9780	32	35	10.2221	13.8109	24.0330	32
16	11.8836	12.1443	24.0279	31	36	10.6687	13.3087	23.9774	30
17	11.9446	11.6276	23.5722	31	37	10.7288	13.2442	23.9730	31
18	11.2541	12.2978	23.5519	31	38	10.6173	13.2845	23.9018	32
19	12.0375	11.9828	24.0203	32	39	10.3211	13.6871	24.0082	32
20	11.0790	12.9536	24.0326	32	40	10.4162	13.5451	23.9613	31

En España el ciclo de vida del combustible nuclear es abierto, sin reciclaje, por tanto, el ciclo culmina con el almacenamiento de los residuos radiactivos (elementos de combustible nuclear quemado) que proceden de las centrales nucleares.

La última etapa de la gestión en ciclo abierto del residuo nuclear de alta actividad consiste en aislar los residuos a unos 500 metros bajo tierra, tras ser encapsulados en contenedores de metal no degradable y anticorrosivo, quedando

confinados del medio ambiente por una barrera tecnológica de encapsulamiento y sellado y una barrera natural constituida por las rocas de la galería recipiente; la instalación correspondiente a esta etapa final se denomina Almacén Geológico Profundo (AGC).

En etapas previas al almacenamiento AGC, los residuos radiactivos pasan por el Almacén Temporal Individualizado (ATI), localizado en las inmediaciones de la central nuclear, y por el Almacén Temporal Centralizado (ATC).

La carga de las cápsulas con elementos de combustible nuclear quemado está sujeta a una serie de restricciones de seguridad que deben cumplirse de forma estricta, pero, además, pueden emplearse modelos de optimización para minimizar la dispersión de las potencias térmicas asignadas a las cápsulas, propiciando, así, la planificación y el control de stocks de residuos radiactivos y reduciendo el impacto radiológico ambiental.

La gestión de stocks del combustible nuclear quemado en ciclo de vida cerrado adopta la alternativa tecnológica de reciclar este combustible tras pasar por el ATI. Tras ello, se pasa a la fase de reprocesamiento para recuperar el uranio y el plutonio fisibles; después, se fabrica MOX, para crear nuevos elementos combustibles con la mezcla de óxidos de uranio y de plutonio. Los nuevos elementos combustibles pueden utilizarse para generar energía eléctrica en la misma u otra central nuclear, cerrando así el ciclo de vida del combustible nuclear en consonancia con la disciplina Ingeniería Circular.

Financiación

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España / FEDER a través del proyecto OPTHEUS (ref. PGC2018-095080-B-I00).

Referencias

Bautista-Valhondo, J. (2024). Gestión de los residuos nucleares radiactivos procedentes de las centrales nucleares - Estrategias para el manejo de residuos radiactivos. In: Real Academia Europea de Doctores. Barcelona, 1914 (eds.). *Retos Vitales para una nueva era*, Vol. 2: 61-85. McGraw Hill. ISBN: 978-84-09-62607-6.

- Bautista-Valhondo, J. (2025). *Data Set: Solución #2 Instancia ASCO#01(2028_5.5)*. Encapsulamiento del combustible nuclear gastado con minimax carga térmica. Technical Report UPC. <https://hdl.handle.net/2117/442386>
- Bautista, J., Batet, L., & Mateo, M. (2020a). Modelado y resolución del problema del encapsulamiento de combustible nuclear gastado. *Dirección y Organización*, 71(2020): 46-60. <https://doi.org/10.37610/dyo.v0i71.578>
- Bautista, J., Batet, L., & Mateo, M. (2020b). Minimizing the Standard Deviation of the Thermal Load in the Spent Nuclear Fuel Cask Loading Problem. *Energies*, 13(18), 4869. <https://doi.org/10.3390/en13184869>
- Bautista-Valhondo, J., Batet-Miracle, L., & Mateo-Doll, M. (2024). Minimax Thermal Load in the Spent Nuclear Fuel Cask Loading Problem. In: Bautista-Valhondo, J., Mateo-Doll, M., Lusa, A., Pastor-Moreno, R. (eds) (2024). *Proceedings of the 17th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (ICIEIM) – XXVII Congreso de Ingeniería de Organización (CIO2023)*. CIO 2023. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 206. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57996-7_38
- CSN (s.f.). *El combustible nuclear y su ciclo*. Monografía Consejo de Seguridad Nuclear. <https://www.csn.es/el-combustible-nuclear-y-su-ciclo>.
- CSN (2015a). Contenedores para el almacenamiento temporal y el transporte del combustible gastado. *aLfa (Revista de seguridad nuclear y protección radiológica CSN)*, 27: 8-15. <https://www.csn.es/documents/10182/13557/Alfa+27>
- CSN (2015b). *Propuesta de dictamen técnico para la aprobación de la revisión 2 del certificado del modelo de bulto de transporte HISTAR 100, solicitada por ENRESA*. Informe CSN/TFCN/III/REV.2/E-0120.
- Holtec INTL (2008a). *HI-STORM 100 FSAR. Ch. 1: General description*. Report HI-2002444, Rev. 7, 20080809. <https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082401625.pdf>
- Holtec INTL (2008b). *HI-STORM 100 FSAR. Ch. 2: Principal Design Criteria*. Report HI-2002444, Rev. 7, 20080809. <https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082401629.pdf>
- MITECO (2023). *7ª Plan General de Residuos Radiactivos*. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/nuclear/residuos/plan-general.html>
- MITECO (2024). BOE-A-2024-25770. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-25770

Material suplementario

[Data Set: Solución #2 Instancia ASCO#01\(2028_5.5\)](#). Encapsulamiento del combustible nuclear gastado con minimax carga térmica