

# Minimización del coste de almacenaje de combustible nuclear gastado en cápsulas MPC-32 con programación lineal entera mixta: Caso de carga en una etapa

Joaquín Bautista <sup>1</sup> · Lluís Batet <sup>2</sup> · Manuel Mateo <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research Group OPE-PROTHIUS. ETSEIB. Universitat Politècnica de Catalunya.  
Avda. Diagonal, 647, 7th floor, 08028 Barcelona, Spain.

<sup>2</sup> Advanced Nuclear Technologies Research Group (ANT). UPC  
Avda. Diagonal, 647, Pavilion C, 08028 Barcelona, Spain.

OPE-PROTHIUS · OPE-WP.2020/01 (20200212)  
(Documento científico-técnico: 20200212)



**PROTHIUS**  
Càtedra Organització Industrial

<http://futur.upc.edu/OPE>

<http://www.prothius.com>

## Minimización del coste de almacenaje de combustible nuclear gastado en cápsulas MPC-32 con programación lineal entera mixta: Caso de carga en una etapa

Joaquín Bautista, Lluís Batet, Manuel Mateo \*

### Resumen

En la gestión de residuos de combustible de las centrales nucleares españolas, está previsto activar los almacenes temporales individualizados (ATI) cuando se alcanza la saturación de la piscina destinada a albergar elementos de combustible nuclear gastado durante el periodo de explotación de la instalación; al finalizar dicho periodo, un ATI puede utilizarse como almacén transitorio a corto o largo plazo hasta que el almacén temporal central (ATC) esté disponible. Los elementos combustibles (EC), gastados y ubicados en la piscina de la central nuclear (CN), se seleccionan para su almacenado en seco en contenedores (cápsulas) atendiendo a una serie de restricciones impuestas a cada ATI por el órgano regulador competente en función de los requerimientos que afectan específicamente a los contenedores utilizados (v.gr. la limitación de la carga térmica o el número de posiciones para elementos combustibles). Las características de estas cápsulas condicionan el tiempo mínimo de enfriamiento del combustible en la piscina de la central nuclear y, por consiguiente, el tiempo necesario para completar el vaciado completo de dicha piscina. En este contexto, presentamos un modelo de programación lineal entera mixta (*Mixed Integer Linear Programming*) con el objetivo de minimizar, en una sola carga de elementos con fecha preestablecida, el coste de utilización de las cápsulas MPC (*Multi Purpose Canister*) necesarias para reubicar en un almacén ATI el número máximo de elementos de combustible gastado que están disponibles en la piscina de la central en tal fecha. El modelo propuesto se ha explotado mediante el solucionador CPLEX utilizando un caso de estudio inspirado en la realidad de la CN Ascó ubicada a unos 160 km de Barcelona. El método de resolución que proponemos es capaz de resolver instancias con 1500 elementos de combustible, 7 tipos de regiones y 4 tipos de contenedores en un tiempo de CPU inferior a 2 segundos.

**Palabras clave:** Programación lineal entera mixta (PLEM); Central nuclear (CN); Elemento combustible nuclear; Gestión de residuos nucleares; Calor de decaimiento; Cápsula multipropósito MPC-32; CN Ascó; Almacén Temporal Individualizado (ATI).

**Keywords:** Mixed Integer Linear Programming (MILP), Nuclear Power Plant (NPP), Nuclear fuel element, Nuclear waste management, Decay heat, Multi-Purpose Canister MPC-32, NPP Ascó; Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI).

---

\* Email: joaquin.bautista@upc.edu (J Bautista), lluis.batet@upc.edu (L Batet), manel.mateo@upc.edu (M Mateo).  
Universitat Politècnica de Catalunya. Avda. Diagonal 647, 08028 Barcelona, Spain.

## 1. Preliminares

Los sectores energéticos son fundamentales para la actual actividad humana. La Energía, bajo la óptica de los sistemas productivos, pasa por diversos procesos de generación, transporte y distribución y consumo final.

La generación de energía eléctrica se basa en la transformación de otras clases de energía (v.gr. cinética, térmica, química, lumínica, solar, eólica, mareomotriz, nuclear, etc.). Cuando dicha generación se realiza con fines industriales, los procesos de transformación se llevan a cabo en instalaciones denominadas centrales eléctricas.

En todas las fases del tratamiento energético aparecen numerosos problemas de optimización, algunos de ellos combinatorios, y de simulación, tanto bajo la óptica tecnológica como la de la gestión de operaciones. Así, en la literatura especializada, podemos encontrar trabajos relativos a modelos de simulación sobre el comportamiento de un fluido (temperatura y presión) dentro de un contenedor de combustible nuclear gastado [1,2] o al modelado y resolución de problemas de planificación de la distribución de la energía eléctrica [3,4,5].

Las centrales nucleares son sin duda centrales eléctricas que ofrecen un alto rendimiento en el proceso de transformación de energía. No obstante, el combustible empleado en ellas, debido a su alta peligrosidad, requiere una serie de controles de carácter tecnológico que están sujetos a una estricta reglamentación a lo largo de todo su ciclo de vida [6]. Dicho ciclo se inicia con la extracción del mineral de uranio, pasa por la fabricación de pastillas de uranio enriquecido para elementos combustibles, y culmina con la gestión de los residuos radiactivos generados por las centrales nucleares.

En las centrales nucleares, los elementos combustibles nuevos se introducen por carga o recarga en el reactor nuclear donde se “queman” por reacción de fisión en cadena, emitiendo energía calorífica y dando lugar a productos de fisión que constituyen el combustible nuclear gastado.

Los elementos combustibles una vez gastados son extraídos del reactor nuclear y se almacenan temporalmente en la piscina de combustible irradiado donde permanecen 5 años como mínimo hasta completar su proceso de “enfriamiento” para reducir su actividad.

Después de al menos 5 años, los elementos combustibles gastados y enfriados pueden extraerse de la piscina, en una o varias etapas, y ser relocalizados en contenedores o cápsulas diseñadas para este propósito (v.gr. cápsulas MPC-32: *Multi Purpose Canister* para 32 elementos). El almacenamiento de este combustible puede hacerse transitoriamente en un almacén temporal individualizado (ATI), localizado dentro del propio emplazamiento de la central nuclear, hasta que se efectúa su traslado definitivo ya sea para ser reprocesado o para ser alojado en un almacén temporal centralizado (ATC) o en un almacén geológico profundo (AGP).

En este marco conceptual, presentamos un modelo de programación lineal entera mixta para minimizar el coste de almacenamiento en seco del máximo número de elementos combustibles enfriados en la piscina, empleando el mínimo número de cápsulas MPC-32 [7,8] y teniendo en cuenta el contenido de la piscina de la central en una fecha preestablecida para su vaciado completo en una sola etapa.

El problema propuesto se ilustra mediante un caso de estudio inspirado en la central nuclear Ascó-1 ubicada a unos 160 km de Barcelona y puede ser resuelto con facilidad mediante el solucionador CPLEX de IBM. El método de resolución que proponemos es capaz de ofrecer soluciones en un tiempo de CPU inferior a 2 segundos para instancias con 1500 elementos de combustible, 7 tipos de regiones y 4 tipos de contenedores.

## 2. Modelo para minimizar el coste de contenedores MPC-32

### 2.1. Nomenclatura básica

PARÁMETROS:

- $T$  Instante o fecha prevista para el vaciado de la piscina de la central nuclear en una sola etapa.
- $I$  Conjunto de elementos de combustible (EC):  $i = 1, \dots, n$  ( $n \equiv |I|$ ). Corresponde a los elementos de combustible nuclear gastado, los cuales están ubicados en la piscina de la central nuclear en el instante  $T$ .
- $J$  Conjunto de tipos de región de contenedor según limitación máxima de calor residual:  $j = 0, 1, \dots, m$  con  $|J| \equiv m + 1$ . Supondremos que existe una región universal,  $j = 0$ , que no presenta limitación máxima de calor residual para los elementos combustible; a efectos prácticos, los elementos asignados a la región universal permanecerán en la piscina.
- $K$  Conjunto de tipos de contenedores de combustible nuclear gastado:  $k = 0, 1, \dots, l$  con  $|K| \equiv l + 1$ . Supondremos que existe un tipo de contenedor universal,  $k = 0$ , que está asociado a la región universal  $j = 0$ , sin presentar limitación máxima de calor residual para los elementos combustible; efectos prácticos, los elementos asignados al contenedor universal permanecerán en la piscina. Los contenedores considerados corresponden a cápsulas multipropósito que pueden albergar hasta 32 elementos de combustible como máximo (MPC-32).
- $q_i(T)$  Calor residual o de decaimiento del elemento de combustible  $i \in I$  en el instante de extracción  $T$ .
- $q_j^+$  Límite superior del calor residual en la región del tipo  $j \in J$ .
- $q_j^-$  Límite inferior del calor residual en la región del tipo  $j \in J$ . Aquí, supondremos  $q_j^- = 0 \forall j \in J$ .
- $a_{i,j}(T)$  Coeficiente tecnológico que adopta el valor 1 si el elemento de combustible  $i \in I$  puede ser ubicado en una región del tipo  $j \in J$  en el instante  $T$ , y vale 0 en cualquier otro caso. Formalmente:
- $$a_{i,j} \equiv a_{i,j}(T) = \begin{cases} 0, & \text{if } q_i(T) > q_j^+ \\ 1, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$
- $b_{j,k}$  Coeficiente tecnológico que vale 1 si la región tipo  $j \in J$  está asociada al contenedor tipo  $k \in K$ , y vale 0 en caso contrario.
- $c_j$  Capacidad de una región del tipo  $j \in J$  medida en número de elementos combustible que como máximo puede albergar.

$\gamma_k$  Coeficiente de *adversidad* de un contenedor del tipo  $k \in K$ . El valor  $\gamma_k$  simboliza el coste arbitrario por seleccionar un contenedor del tipo  $k \in K$  para albergar elementos de combustible gastado.

VARIABLES:

$x_{i,j}$  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 de elementos de combustible encapsulados en regiones del tipo  $j \in J$ .

$z_k$  Número de contenedores del tipo  $k \in K$ .

$\Gamma(T)$  Función de *adversidad global*. Representa el coste global de los contenedores usados para albergar el combustible nuclear gastado en la fecha prevista,  $T$ , tras el vaciado de la piscina de la central nuclear.

## 2.2. Modelo de Programación lineal entera mixta

MILP-1: ASIGNACIÓN DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES A REGIONES DE CÁPSULAS MPC-32

$$\min \Gamma(T) = \sum_{k=0}^l \gamma_k z_k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m x_{i,j} = n \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^m a_{i,j} x_{i,j} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_{i,j} x_{i,j} \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (4)$$

$$z_k \geq \frac{b_{j,k}}{c_j} y_j \quad \forall j = 0, 1, \dots, m; \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (5)$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (6)$$

$$y_j \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall j = 0, 1, \dots, m \quad (7)$$

$$z_k \in \mathbb{Z}^+ \cup \{0\} \quad \forall k = 0, 1, \dots, l \quad (8)$$

En el modelo MILP-1, la función objetivo (1) representa la minimización de la función de coste de almacenaje o adversidad global, cuyo valor coincide con el número de contenedores, entre

todos sus tipos, cuando se extraen todos los elementos combustibles de la piscina ( $z_0 = 0$ ) y todos los tipos de contenedor con limitación de calor de decaimiento se penalizan unitariamente ( $y_k = 1 \forall k = 1, \dots, l$ ). Las igualdades (2) y (3) garantizan la asignación de todos los elementos combustibles a alguna región, incluida la región universal  $j = 0$ . Las igualdades (4) determinan el número de elementos combustibles que deben ser encapsulados en cada tipo de región  $j \in J$ . Las restricciones (5) sirven para acotar inferiormente el número de contenedores de cada tipo  $k \in K$ . La condición (6) impone que las variables de decisión ( $x_{i,j}$ ) sean binarias. Finalmente, las condiciones (7) y (8) fuerzan respectivamente la no negatividad e integridad de las variables auxiliares  $y_j$  y  $z_k$ .

### 3. Caso de estudio de la CN Ascó-1. Tarragona - Spain

#### 3.1. Hipótesis

En el caso simplificado que nos ocupa, se asumen las siguientes hipótesis:

- H1. Los elementos combustibles (EC) se caracterizan por su tipo, grado de quemado (*Burnup*:  $MWd/t$ ), enriquecimiento inicial (% en masa) y la fecha de extracción del núcleo según el último ciclo de quemado, lo cual se traduce en el tiempo que transcurre desde su última descarga del núcleo (años). A partir de estos datos, puede determinarse el calor residual de cada EC en el instante considerado. En el caso que nos ocupa, se han considerado valores envolventes para el calor residual por grupos de ECs. (el listado de ECs, identificado cada uno con un identificador ficticio y el calor residual que se le atribuye a la fecha considerada se recogen en el Anexo I).
- H2. No hay elementos de combustible dañados ni afectados por restricciones adicionales.
- H3. No se consideran en el modelo los elementos asociados al combustible (fuentes, barras de control, etc.).
- H4. Se supone que sólo se dispone de un tipo de contenedor en cuanto a dimensiones espaciales físicas y número de posiciones para los elementos combustibles. El contenedor físico que se utiliza en este caso es del tipo HI-TRAC (contenedor de transferencia).
- H5. Los elementos combustibles se cargan en contenedores teniendo en cuenta los requisitos de almacenado en módulos tipo HI-STORM (contenedor de almacenamiento); se supone, además, que no hay limitación de capacidad en la losa de hormigón del almacén temporal individualizado (ATI).
- H6. Se pretende el vaciado total de la piscina, si ello es posible, en una fecha determinada que puede corresponder a la del cese de operaciones en la central nuclear. Se consideran sólo los ECs presentes en la piscina en ese momento (es decir, no se ha considerado que en el caso de cese de operaciones el contenido del último núcleo se descargaría en la piscina y se debería contar con 157 ECs adicionales con diversos grados de quemado). El contenido de la piscina que se ha considerado en el estudio no es el actual, sino que corresponde a una situación anterior, en Ascó-1.
- H7. El vaciado de la piscina se debe realizar con el mínimo número de contenedores en la fecha más temprana posible. Se supone que la carga de los contenedores es instantánea, por lo que no es necesario cargar ningún contenedor antes de transcurridos 5 años tras la entrada en piscina del último elemento combustible.

### 3.2. Requisitos para el almacenado de elementos combustibles

Los requisitos a tener en cuenta para el vaciado de la piscina son los siguientes:

- R1. Los contenedores para los elementos combustibles son del tipo MPC-32, los cuales están compartimentados en 32 posiciones, pudiendo contener cada una un elemento combustible.
- R2. Las posiciones de un contenedor están agrupadas en dos regiones: (r1) región permisiva o de alto calor de decaimiento constituida por 12 posiciones y (r2) región severa o de bajo calor de decaimiento que está constituida por 20 posiciones.
- R3. El contenido de cada posición de almacenamiento de combustible en todo contenedor debe poseer un tiempo de enfriamiento mayor o igual al mínimo valor permitido (5 años desde su extracción del núcleo del reactor).
- R4. El contenido de cada posición de almacenamiento de combustible en todo contenedor debe poseer un calor de decaimiento inferior o igual al máximo permitido en la posición.
- R5. El máximo calor residual permitido en un conjunto MPC-32 es igual a  $Q_{MPC}^+ = 30 \text{ kW}$ .

Por otra parte, los máximos valores tolerados para el calor de decaimiento en las posiciones de almacenamiento de combustible se determinan así:

1. *Carga uniforme.* El máximo calor de decaimiento permitido por posición de almacenamiento de combustible de la cápsula MPC-32 es igual a  $q_1^+ = q_2^+ = 0,9375 \text{ kW}$  ( $30 \text{ kW}/32$ ).

Si todos los elementos combustibles presentan un calor de decaimiento inferior o igual al límite de carga uniforme (i.e.  $q_i(T) \leq 0,9375 \text{ kW} \forall i \in I$ ), entonces, se empleará un solo tipo de contenedor respecto a limitaciones térmicas para el almacenado del combustible.

2. *Carga regionalizada.* Cuando no sea posible vaciar completamente la piscina empleando solo contenedores de carga uniforme, se utilizará la carga regionalizada.

Para determinar los valores máximos de calor de decaimiento de cada posición según la región a la que pertenece (r1 o r2), se aplica el procedimiento que sigue:

- 2.1. Fijar un valor de la ratio de cargas térmicas máximas  $\rho$ , tal que  $1 \leq \rho \leq 3$ .
- 2.2. Determinar la carga térmica máxima,  $q_2^+(\rho, \pi_1, \pi_2)$ , para la región severa r2, a partir de la expresión:

$$(\pi_1 \times \rho + \pi_2) \times q_2^+(\rho, \pi_1, \pi_2) = f(\rho, \pi_1, \pi_2) \times Q_{MPC}^+ \quad (9)$$

Siendo  $f(\rho, \pi_1, \pi_2)$  una función acotada a 1 para  $\rho = 1$  y decreciente con  $\rho$ , de manera que la carga térmica se ve penalizada por el hecho de hacer utilizar la opción de carga regionalizada [9]. La función  $f(\rho, \pi_1, \pi_2)$  para la cápsula MPC-32 puede expresarse de la forma siguiente:

$$f(\rho, \pi_1, \pi_2) = \frac{2}{(1 + \rho^{(0.23/\rho^{0.1})})} \quad (10)$$

- 2.3. Determinar la carga térmica máxima,  $q_1^+(\rho, \pi_1, \pi_2)$ , para la región permisiva r1:

$$q_1^+(\rho, \pi_1, \pi_2) = q_2^+(\rho, \pi_1, \pi_2) \times \rho \quad (11)$$

donde:

$Q_{MPC}^+$	Máximo calor de decaimiento permitido en un conjunto MPC-32 (30 kW), para carga homogénea.
$q_1^+(\cdot)$	Máximo calor de decaimiento (carga térmica) tolerado en toda posición de la región permisiva r1.
$q_2^+(\cdot)$	Máximo calor de decaimiento tolerado en toda posición de la región severa r2.
$\rho$	Ratio de cargas térmicas máximas entre regiones: $\rho = q_1^+(\cdot)/q_2^+(\cdot)$ . Cada valor de la ratio define un tipo de contenedor regionalizado. Por ejemplo, la utilización de los valores $\rho \in \{1,2,3\}$ da lugar a tres tipos de contenedor regionalizado.
$\pi_1$	Número de posiciones disponible en la región permisiva r1. Se supone $\pi_1 = 12$ .
$\pi_2$	Número de posiciones disponible en la región severa r2. Se supone $\pi_2 = 20$ .

### 3.3. Dimensión del modelo

Obviamente, las dimensiones del modelo MILP-1 son función de las instancias empleadas para realizar la experimentación. Con el propósito de fijar ideas, nos centraremos en la instancia ASCÓ#01\_6.0 (ver Tabla A1 en Anexo I) del caso objeto de estudio, cuyos datos significativos son los que siguen:

- Fecha prevista para la extracción de elementos combustibles:  $T = 6$  años desde el momento en que se supone cesa la actividad (v.gr. los calores de decaimiento listados en la tabla A1 corresponden a  $T = 6$  años).
- Número de elementos combustibles gastados:  $n = 1164$
- Número de tipos de región con limitación máxima de calor residual:  $m = 6$
- Número de tipos de contenedor con limitación máxima de calor residual:  $l = 3$

Atendiendo a los valores anteriores podemos escribir:

1. MILP-1 contiene 8.148 variables de decisión binarias ( $x_{i,j}$ ).
2. MILP-1 contiene 11 variables auxiliares enteras no negativas ( $y_j; z_k$ ).
3. MILP-1 contiene 1.165 igualdades asociadas a la asignación de elementos a regiones.
4. MILP-1 contiene 7 igualdades asociadas al contaje de elementos en cada región.
5. MILP-1 contiene 28 restricciones de cota sobre el número de contenedores según su tipo.
6. El solucionador IBM ILOG CPLEX (Optimization Studio v.12.2, win-x86-64), ejecutado en DELL Inspiron-13 (Intel(R) Core(TM) i7-7500U @ 2.70 GHz CPU 2.90 GHz, 16 GB de RAM, x64 Windows 10 Pro), emplea menos de 2 segundos de CPU para resolver instancias de la dimensión de ASCÓ#01\_6.0.

## 4. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

MILP se ha mostrado como una técnica de optimización competitiva para resolver problemas de minimización del coste de almacenaje de combustible nuclear. Esto se confirma a través de los experimentos que hemos realizado con la base de datos ITEC-1394 Rev4.xlsm suministrada por ENDESA. Dicha base permite generar instancias con dimensiones industriales (v.gr. 1200



elementos combustibles y de 1 a 30 tipos de contenedores regionalizados, lo cual se traduce en un número de tipos de regiones de calor de decaimiento comprendido entre 2 y 61).

En cuanto a investigaciones futuras, hemos previsto las siguientes líneas de actuación: (L1) Diseño de heurísticas relacionadas con MILP-1 para minimizar el coste de almacenaje fijando el número de tipos de región; (L2) Formulación y explotación de otros modelos basados en MILP para la asignación de elementos combustibles a regiones de contenedores atendiendo a diversos criterios; (L3) Diseño de métodos heurísticos vinculados a L2 para equilibrar las cargas térmicas en los contenedores; (L4) Extensión de los modelos y procedimientos de las líneas anteriores al caso de carga polietápica para un horizonte de explotación de la central nuclear.

### **Agradecimientos:**

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades del Gobierno de España con el proyecto OPTHEUS (ref. PGC2018-095080-B-I00), incluyendo Fondos para el desarrollo regional europeo, y el proyecto UPC “*Desarrollo de herramientas para la simulación y optimización del vaciado de piscinas de combustible gastado de centrales nucleares*” financiado por ENDESA Generación, S.A.

### **5. Referencias**

1. Herranz, L.E.; Penalva, J.; Fera, F. (2015) CFD analysis of a cask for spent fuel dry storage: Model fundamentals and sensitivity studies. *Annals of Nuclear Energy*, 76(2015): 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.09.032>.
2. Wu, Y.; Klein, J.; Zhou, H.; Zuo, L. (2018) Thermal and fluid analysis of dry cask storage containers over multiple years of service. *Annals of Nuclear Energy*, 112(2018): 132-142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.10.013>.
3. Georgilakis, P.S; Hatziargyriou, N.D. (2015) A review of power distribution planning in the modern power systems era: Models, methods and future research. *Electric Power Systems Research*, 121(2015): 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.12.010>.
4. Klyapovskiy, S.; You, S.; Cai, H.; Bindner, H.W. (2019) Incorporate flexibility in distribution grid planning through a framework solution. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 111(2019): 66-78. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.069>.
5. Sempértegui, R.; Bautista, J.; Griño, R.; Pereira, J. (2002) Models and procedures for Electric Energy Distribution Planning. A review. *IFAC Proceedings Volumes*, 35(1): 395-400. <https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.01217>.
6. CSN (s.f.) El combustible nuclear y su ciclo. Monografía Consejo de Seguridad Nuclear. <https://www.csn.es/el-combustible-nuclear-y-su-ciclo>. Último acceso: 20200212.
7. Batet, L.; León, P.; Serra, E. Ciruelos, J.; Estrampes, J.; Culebras, F. (2018) Desarrollo de una herramienta de ayuda a la gestión y optimización de carga de contenedores de combustible gastado. SNE 44 Reunión anual de la Sociedad Nuclear Española, 26-28 septiembre 2018, Ávila (Spain).
8. CSN (2015) 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/II/REV.2/E-0120.
9. Holtec International (2008) FSAR, Final Safety Analysis Report for the HI-STORM 100 Cask System. Holtec Report No. HI-2002444, Rev. 7. <https://www.nrc.gov/docs/ML0824/ML082401629.pdf>. Último acceso: 20200212.

## Anexo I

$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$
1	0,4189	41	0,4189	81	0,6098	121	0,6296	161	0,5789
2	0,4189	42	0,4189	82	0,6098	122	0,6332	162	0,5302
3	0,4189	43	0,4189	83	0,5789	123	0,6296	163	0,5858
4	0,4189	44	0,4189	84	0,6010	124	0,5927	164	0,5335
5	0,4189	45	0,4189	85	0,5772	125	0,5335	165	0,5351
6	0,4189	46	0,4189	86	0,5236	126	0,6917	166	0,5327
7	0,4189	47	0,4189	87	0,5302	127	0,6898	167	0,5434
8	0,4189	48	0,4189	88	0,5302	128	0,6165	168	0,5418
9	0,4189	49	0,4189	89	0,5772	129	0,6147	169	0,5302
10	0,4189	50	0,4189	90	0,6049	130	0,7068	170	0,6955
11	0,4189	51	0,4189	91	0,5962	131	0,4942	171	0,7052
12	0,4189	52	0,4189	92	0,6101	132	0,6183	172	0,5055
13	0,4189	53	0,4189	93	0,5302	133	0,6917	173	0,5039
14	0,4189	54	0,5979	94	0,4772	134	0,4925	174	0,5813
15	0,4189	55	0,5841	95	0,4820	135	0,6363	175	0,5088
16	0,4189	56	0,5789	96	0,4756	136	0,4942	176	0,5270
17	0,4189	57	0,5789	97	0,4836	137	0,4909	177	0,5844
18	0,4189	58	0,5962	98	0,4740	138	0,4958	178	0,5064
19	0,4189	59	0,5818	99	0,4836	139	0,4974	179	0,5253
20	0,4189	60	0,6080	100	0,4756	140	0,7105	180	0,5031
21	0,4189	61	0,5384	101	0,4756	141	0,4925	181	0,5072
22	0,4189	62	0,6084	102	0,5335	142	0,7442	182	0,5270
23	0,4189	63	0,5310	103	0,6350	143	0,6112	183	0,6917
24	0,4189	64	0,5766	104	0,5979	144	0,6898	184	0,5831
25	0,4189	65	0,5732	105	0,6296	145	0,4974	185	0,6973
26	0,4189	66	0,5784	106	0,5962	146	0,5875	186	0,5023
27	0,4189	67	0,6014	107	0,6385	147	0,5451	187	0,5253
28	0,4189	68	0,5801	108	0,5997	148	0,5853	188	0,5848
29	0,4189	69	0,5562	109	0,5962	149	0,5343	189	0,5990
30	0,4189	70	0,5721	110	0,5979	150	0,5401	190	0,5467
31	0,4189	71	0,5766	111	0,5335	151	0,5335	191	0,5973
32	0,4189	72	0,5477	112	0,5997	152	0,5451	192	0,5533
33	0,4189	73	0,5704	113	0,5979	153	0,5858	193	0,5973
34	0,4189	74	0,5477	114	0,5962	154	0,5444	194	0,5500
35	0,4189	75	0,5835	115	0,6860	155	0,5318	195	0,6571
36	0,4189	76	0,5302	116	0,5351	156	0,5418	196	0,6571
37	0,4189	77	0,5484	117	0,5962	157	0,5434	197	0,5417
38	0,4189	78	0,5318	118	0,5940	158	0,5910	198	0,5417
39	0,4189	79	0,5749	119	0,6347	159	0,5905	199	0,6535
40	0,4189	80	0,6098	120	0,6010	160	0,5841	200	0,6094

Tabla A1 (1 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01\_6.0. Las características son: identificador  $i$  del elemento y calor residual  $q_i(T)$  para  $T = 6$  años.

$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$
201	0,5533	241	0,6460	281	0,6320	321	0,7184	361	0,6802
202	0,5973	242	0,6442	282	0,6337	322	0,7203	362	0,6972
203	0,6553	243	0,6442	283	0,6372	323	0,6904	363	0,6839
204	0,5939	244	0,7673	284	0,6442	324	0,7184	364	0,6991
205	0,5500	245	0,6028	285	0,6512	325	0,7146	365	0,6915
206	0,6025	246	0,7593	286	0,6460	326	0,7071	366	0,8315
207	0,5533	247	0,6285	287	0,7199	327	0,7128	367	0,8274
208	0,5550	248	0,6079	288	0,7180	328	0,7071	368	0,8336
209	0,6007	249	0,6199	289	0,6543	329	0,7109	369	0,8315
210	0,5384	250	0,6407	290	0,7238	330	0,7090	370	0,8212
211	0,6172	251	0,5977	291	0,6507	331	0,7071	371	0,8336
212	0,5351	252	0,6233	292	0,6490	332	0,7109	372	0,8233
213	0,6154	253	0,6216	293	0,6525	333	0,7034	373	0,8482
214	0,5360	254	0,6407	294	0,6525	334	0,7222	374	0,9784
215	0,6154	255	0,7813	295	0,6472	335	0,7165	375	0,9710
216	0,5394	256	0,6199	296	0,6490	336	0,7146	376	0,9759
217	0,5477	257	0,6062	297	0,6507	337	0,7128	377	0,9858
218	0,5236	258	0,6477	298	0,6454	338	0,6757	378	0,9735
219	0,6101	259	0,6495	299	0,6454	339	0,6794	379	0,9784
220	0,7112	260	0,6079	300	0,6578	340	0,6775	380	0,9759
221	0,5484	261	0,6425	301	0,6543	341	0,6794	381	0,9883
222	0,6119	262	0,6390	302	0,6525	342	0,6757	382	0,7239
223	0,5360	263	0,6477	303	0,7753	343	0,6775	383	0,7182
224	0,6154	264	0,6045	304	0,7793	344	0,6775	384	0,7258
225	0,5236	265	0,6045	305	0,7117	345	0,6757	385	0,7239
226	0,5494	266	0,6407	306	0,7117	346	0,6218	386	0,8357
227	0,5351	267	0,6045	307	0,7733	347	0,4535	387	0,8357
228	0,5477	268	0,6285	308	0,7713	348	0,6261	388	0,7599
229	0,5368	269	0,6390	309	0,7097	349	0,6261	389	0,7638
230	0,5410	270	0,6320	310	0,7203	350	0,4566	390	0,7677
231	0,5351	271	0,6320	311	0,7184	351	0,6244	391	0,8315
232	0,6137	272	0,6355	312	0,7165	352	0,6279	392	0,7658
233	0,6101	273	0,6320	313	0,7241	353	0,4520	393	0,7638
234	0,6442	274	0,6355	314	0,6923	354	0,6289	394	0,7638
235	0,6303	275	0,6337	315	0,7184	355	0,6244	395	0,7638
236	0,6512	276	0,6372	316	0,6923	356	0,4489	396	0,7284
237	0,6165	277	0,6355	317	0,6904	357	0,6307	397	0,7717
238	0,6355	278	0,6407	318	0,7260	358	0,6783	398	0,7638
239	0,6407	279	0,6251	319	0,7165	359	0,6915	399	0,7343
240	0,6233	280	0,6372	320	0,7203	360	0,6839	400	0,7323

Tabla A1 (2 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01\_6.0. Las características son: identificador  $i$  del elemento y calor residual  $q_i(T)$  para  $T = 6$  años.

$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$
401	0,8441	441	0,8820	481	0,7903	521	0,8030	561	0,8460
402	0,7304	442	0,8952	482	0,8128	522	0,7968	562	1,0201
403	0,7677	443	0,8864	483	0,7801	523	0,9134	563	0,7901
404	0,7677	444	0,8886	484	0,8086	524	0,8974	564	1,0176
405	0,7658	445	0,8908	485	0,8066	525	0,8134	565	1,0126
406	0,7658	446	0,8842	486	0,8046	526	0,8303	566	0,7989
407	0,7483	447	0,8908	487	0,8256	527	0,8345	567	1,0226
408	0,7386	448	0,8886	488	0,8128	528	0,8367	568	0,7814
409	0,7638	449	0,9063	489	0,8107	529	0,8345	569	0,7836
410	0,7463	450	0,7704	490	0,7882	530	0,8303	570	0,7923
411	0,7483	451	0,7644	491	0,8213	531	0,8113	571	0,7879
412	0,7483	452	0,7724	492	0,8046	532	0,8134	572	1,0126
413	0,7521	453	0,7704	493	0,7903	533	0,8197	573	1,0151
414	0,7502	454	0,7882	494	0,8149	534	0,8093	574	1,0076
415	0,7560	455	0,7700	495	0,8087	535	0,8155	575	0,7901
416	0,7463	456	0,7720	496	0,8192	536	0,8218	576	0,7749
417	0,7463	457	0,7781	497	0,7882	537	0,8218	577	1,0201
418	0,7502	458	0,7744	498	1,0027	538	0,8303	578	1,0076
419	0,7502	459	0,7781	499	0,9203	539	0,8093	579	1,0026
420	0,7463	460	0,7680	500	0,9955	540	0,8155	580	1,0026
421	0,7406	461	0,7943	501	0,9955	541	0,8239	581	1,0026
422	0,7776	462	0,7923	502	0,9249	542	0,8261	582	0,8483
423	0,7736	463	0,7882	503	1,0027	543	0,8197	583	0,8329
424	0,7795	464	0,7842	504	0,9180	544	0,8134	584	0,8329
425	0,7677	465	0,7903	505	0,9111	545	0,8218	585	0,8417
426	0,7680	466	0,7842	506	0,9180	546	0,8439	586	0,8395
427	0,7720	467	0,7903	507	0,9295	547	0,8218	587	0,8505
428	0,7620	468	0,7882	508	0,9931	548	0,8527	588	0,8329
429	0,7560	469	0,7903	509	0,9907	549	0,8351	589	0,8549
430	0,7640	470	0,8579	510	0,9835	550	0,8197	590	0,8615
431	0,7540	471	0,7680	511	0,9157	551	0,8395	591	0,8483
432	0,7640	472	0,7720	512	0,9157	552	0,8197	592	0,8527
433	0,7640	473	0,8601	513	0,9835	553	0,8155	593	0,8571
434	0,8666	474	0,8514	514	1,1306	554	0,8218	594	0,8460
435	0,8558	475	0,7700	515	1,1223	555	0,8218	595	0,8505
436	0,8623	476	0,7761	516	1,1278	556	0,8483	596	0,8571
437	0,8623	477	0,8492	517	1,1389	557	0,8460	597	0,8571
438	0,8558	478	0,7903	518	0,8030	558	0,8373	598	0,8929
439	0,8710	479	0,7923	519	0,8997	559	0,8197	599	0,8816
440	0,8688	480	0,7943	520	0,8907	560	0,8218	600	0,8839

Tabla A1 (3 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01\_6.0. Las características son: identificador  $i$  del elemento y calor residual  $q_i(T)$  para  $T = 6$  años.

$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$
601	0,8839	641	1,0679	681	0,9130	721	0,9762	761	1,3706
602	0,8285	642	1,0652	682	1,0603	722	0,9609	762	1,3436
603	0,8929	643	1,0412	683	0,9036	723	0,9660	763	1,3368
604	0,8861	644	1,0254	684	0,9177	724	0,9762	764	0,9667
605	0,8460	645	1,0733	685	0,9130	725	1,0716	765	1,0631
606	0,8351	646	1,1196	686	0,9059	726	0,9788	766	1,0547
607	0,8351	647	1,1278	687	0,9201	727	0,9559	767	1,0491
608	0,8839	648	1,1168	688	0,9012	728	1,0859	768	1,0575
609	0,8907	649	1,1278	689	0,8989	729	1,0802	769	1,0830
610	0,8771	650	0,8965	690	1,2510	730	1,0830	770	1,0688
611	0,8549	651	0,8872	691	1,2543	731	0,9635	771	1,0660
612	0,8727	652	0,8895	692	0,9012	732	0,9813	772	1,0745
613	0,8727	653	0,8942	693	1,2380	733	1,0631	773	1,0716
614	0,9916	654	0,8895	694	1,1614	734	0,9839	774	1,0745
615	0,8771	655	0,8918	695	1,2502	735	1,0631	775	1,0603
616	0,8549	656	0,8965	696	1,2336	736	1,0575	776	1,0716
617	0,8549	657	0,8918	697	1,1614	737	0,9788	777	1,0859
618	0,8615	658	0,9036	698	1,2367	738	1,0547	778	1,2543
619	0,9890	659	0,8965	699	1,1526	739	0,9813	779	1,2510
620	0,8749	660	0,8918	700	1,1496	740	0,9762	780	1,0773
621	0,8794	661	1,0679	701	1,1555	741	0,9762	781	1,0688
622	0,8704	662	1,2543	702	1,2428	742	0,9813	782	1,2575
623	0,9994	663	1,0706	703	1,2367	743	1,0547	783	1,2510
624	0,9890	664	1,0679	704	1,2306	744	1,0660	784	1,0745
625	0,8749	665	1,2575	705	1,2306	745	1,0547	785	1,0973
626	1,1196	666	0,9106	706	1,1585	746	0,9890	786	1,0887
627	1,1168	667	1,2381	707	1,1485	747	0,9788	787	1,0973
628	1,1306	668	0,9083	708	1,2367	748	1,0603	788	1,0944
629	1,1141	669	1,0599	709	0,9433	749	0,9640	789	1,2543
630	1,0868	670	1,0760	710	0,9408	750	1,3368	790	1,0916
631	1,0439	671	0,9083	711	0,9383	751	1,3740	791	1,0916
632	1,0814	672	1,0706	712	0,9408	752	1,3638	792	1,2608
633	1,0652	673	1,0572	713	0,9584	753	1,3234	793	1,2608
634	1,0519	674	1,0652	714	1,1233	754	0,9775	794	1,2608
635	1,0733	675	0,8965	715	1,1175	755	1,3335	795	1,0944
636	1,0281	676	1,2543	716	0,9534	756	1,3436	796	1,0887
637	1,0412	677	0,9059	717	0,9458	757	1,3301	797	0,8749
638	1,0439	678	0,9036	718	1,1146	758	1,3503	798	1,1093
639	1,0333	679	0,9012	719	1,1204	759	1,3672	799	0,8724
640	1,0733	680	0,9059	720	0,9508	760	0,9721	800	0,8698

Tabla A1 (4 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01\_6.0. Las características son: identificador  $i$  del elemento y calor residual  $q_i(T)$  para  $T = 6$  años.

$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$
801	1,1093	841	1,2124	881	0,4651	921	0,4902	961	0,5179
802	0,8826	842	1,2478	882	0,4603	922	0,4934	962	0,4312
803	1,1124	843	1,2060	883	0,5223	923	0,5558	963	0,5148
804	1,1185	844	1,1997	884	0,4571	924	0,5507	964	0,5179
805	1,1154	845	1,2156	885	0,4651	925	0,4885	965	0,4439
806	1,1185	846	1,2029	886	0,5156	926	0,5167	966	0,4397
807	0,8673	847	1,2124	887	0,5426	927	0,4546	967	0,4213
808	0,8749	848	1,2446	888	0,5273	928	0,4771	968	0,5256
809	0,8673	849	1,2510	889	0,5240	929	0,4755	969	0,4368
810	1,1124	850	1,2060	890	0,4492	930	0,5576	970	0,4326
811	1,1093	851	1,2092	891	0,4196	931	0,5167	971	0,4656
812	0,8749	852	1,2381	892	0,5206	932	0,4117	972	0,5148
813	1,1556	853	0,5923	893	0,4555	933	0,4656	973	0,4641
814	1,1494	854	0,5947	894	0,5223	934	0,5015	974	0,5133
815	1,1556	855	0,5947	895	0,4667	935	0,4312	975	0,5027
816	1,1587	856	0,5923	896	0,4603	936	0,6366	976	0,5012
817	0,5207	857	0,4069	897	0,4571	937	0,6114	977	0,4354
818	1,2124	858	0,3913	898	0,4135	938	0,6120	978	0,4583
819	1,2284	859	0,5159	899	0,5477	939	0,4651	979	0,4354
820	0,5186	860	0,3975	900	0,5140	940	0,5190	980	0,4598
821	0,5123	861	0,4292	901	0,5409	941	0,4731	981	0,5240
822	1,2252	862	0,3975	902	0,4196	942	0,5257	982	0,4368
823	1,2220	863	0,3975	903	0,5173	943	0,4635	983	0,4326
824	0,5207	864	0,3975	904	0,5460	944	0,4476	984	0,4997
825	1,2349	865	0,4038	905	0,5206	945	0,5477	985	0,5256
826	1,2510	866	0,4785	906	0,4619	946	0,4683	986	0,5287
827	1,2575	867	0,4022	907	0,5140	947	0,5210	987	0,5012
828	1,2317	868	0,4651	908	0,5190	948	0,5012	988	0,4997
829	1,0519	869	0,3975	909	0,4539	949	0,4354	989	0,5318
830	1,2349	870	0,5133	910	0,4587	950	0,4700	990	0,5302
831	1,2641	871	0,5234	911	0,4603	951	0,5012	991	0,5042
832	1,0609	872	0,4372	912	0,4089	952	0,4656	992	0,5019
833	1,0639	873	0,4836	913	0,5240	953	0,4744	993	0,5925
834	1,0639	874	0,4325	914	0,5140	954	0,4554	994	0,5033
835	1,2575	875	0,5477	915	0,4594	955	0,4298	995	0,4945
836	1,2349	876	0,4635	916	0,4820	956	0,4554	996	0,5957
837	1,2543	877	0,5223	917	0,4820	957	0,4656	997	0,4931
838	1,2092	878	0,4524	918	0,4787	958	0,4729	998	0,5019
839	1,2478	879	0,5426	919	0,4562	959	0,4368	999	0,4901
840	0,5375	880	0,5375	920	0,5455	960	0,4714	1000	0,4887

Tabla A1 (5 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01\_6.0. Las características son: identificador  $i$  del elemento y calor residual  $q_i(T)$  para  $T = 6$  años.

$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$	$i$	$q_i(T)$
1001	0,4960	1041	0,5713	1081	0,4518	1121	0,6905	1161	0,7475
1002	0,5033	1042	0,5713	1082	0,5336	1122	0,6924	1162	0,7279
1003	0,4901	1043	0,4706	1083	0,4561	1123	0,6924	1163	0,7534
1004	0,5048	1044	0,4691	1084	0,5321	1124	0,6924	1164	0,7713
1005	0,4989	1045	0,4576	1085	0,4604	1125	0,6690		
1006	0,6005	1046	0,5681	1086	0,5290	1126	0,6654		
1007	0,4960	1047	0,4547	1087	0,5290	1127	0,6672		
1008	0,6021	1048	0,4590	1088	0,4764	1128	0,6690		
1009	0,5989	1049	0,5713	1089	0,4750	1129	0,6708		
1010	0,4887	1050	0,4706	1090	0,5649	1130	0,6672		
1011	0,5989	1051	0,4750	1091	0,5539	1131	0,6690		
1012	0,4975	1052	0,4735	1092	0,5398	1132	0,6708		
1013	0,5973	1053	0,4720	1093	0,5554	1133	0,7097		
1014	0,6053	1054	0,4532	1094	0,4604	1134	0,6407		
1015	0,5470	1055	0,4794	1095	0,4706	1135	0,7146		
1016	0,5078	1056	0,4750	1096	0,4720	1136	0,7184		
1017	0,5122	1057	0,5382	1097	0,4547	1137	0,7222		
1018	0,5063	1058	0,5305	1098	0,5602	1138	0,7146		
1019	0,5348	1059	0,4662	1099	0,4677	1139	0,7203		
1020	0,5424	1060	0,4504	1100	0,4461	1140	0,6794		
1021	0,5394	1061	0,4518	1101	0,4677	1141	0,6739		
1022	0,4613	1062	0,4490	1102	0,4518	1142	0,6720		
1023	0,4628	1063	0,5382	1103	0,5336	1143	0,7146		
1024	0,4585	1064	0,4576	1104	0,4677	1144	0,6789		
1025	0,5394	1065	0,4633	1105	0,6512	1145	0,7203		
1026	0,4628	1066	0,4619	1106	0,6460	1146	0,7165		
1027	0,4599	1067	0,4619	1107	0,6407	1147	0,7165		
1028	0,5078	1068	0,4490	1108	0,6372	1148	0,6739		
1029	0,5152	1069	0,5539	1109	0,6407	1149	0,6720		
1030	0,5078	1070	0,4561	1110	0,6390	1150	0,7053		
1031	0,5122	1071	0,4648	1111	0,6477	1151	0,7260		
1032	0,4599	1072	0,5602	1112	0,6390	1152	0,6684		
1033	0,4599	1073	0,5336	1113	0,6337	1153	0,7203		
1034	0,5409	1074	0,5351	1114	0,6530	1154	0,7184		
1035	0,4585	1075	0,4490	1115	0,6565	1155	0,6734		
1036	0,5152	1076	0,5554	1116	0,6601	1156	0,7146		
1037	0,5363	1077	0,5618	1117	0,6548	1157	0,7090		
1038	0,5048	1078	0,5336	1118	0,6495	1158	0,7260		
1039	0,5409	1079	0,4490	1119	0,6548	1159	0,7593		
1040	0,5237	1080	0,4677	1120	0,6601	1160	0,7494		

Tabla A1 (6 de 6): Conjunto de elementos combustibles correspondiente a la instancia Ascó#01\_6.0. Las características son: identificador  $i$  del elemento y calor residual  $q_i(T)$  para  $T = 6$  años.