

JOSÉ A. GAGO - PABLO ZULOAGA

EL ALMACENAMIENTO EN SECO DE LOS RESIDUOS

RADIATIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

En el presente artículo se pasa revista a las diferentes tecnologías existentes para el almacenamiento en seco de los residuos de alta actividad. En el mismo se describen los criterios de diseño y seguridad aplicables al conjunto de estos sistemas y se analizan someramente los diversos factores que pueden influenciar la adopción de un sistema frente a otro. Se describe por último la aproximación seguida en el caso español y se concluye con un ligera descripción de un contenedor de doble propósito (almacenamiento y transporte) diseñado para la Central Nuclear de Trillo

El combustible irradiado se ha venido almacenando en piscinas (vía húmeda), de forma casi universal, hasta la década de los años 70. No obstante, existían experiencias de manejo y almacenamiento en seco, por corto período de tiempo, que se remontan a los años 40, si bien la utilización continuada de esta forma de almacenamiento comenzó a finales de los años 60, ante el interés mostrado por varios países. En consecuencia, se emprendieron entonces varios programas de investigación y desarrollo para sustentar esta forma de almacenamiento, que sirvieron de base a la amplia oferta existente en la actualidad de sistemas de almacenamiento en seco del combustible gastado.

El inventario de combustible gastado de centrales comerciales almacenado en seco superaba a finales de 1995 las 3.400 tU. Las primeras instalaciones licenciadas para el almacenamiento en seco fueron las de Whiteshell, Canadá (para combustible con vaina de zircaloy), basada en contenedores de hormigón y la de Wylfa, Reino Unido (para combustible Magnox), basada en la tecnología de bóvedas, y que viene operando comercialmente desde 1971.

Aunque en adelante se centrarán los comentarios sobre el combustible gastado, por ser el residuo de alta actividad mayoritario en el caso español, cabe señalar que los vidrios de alta actividad provenientes del reprocesado del combustible se almacenan también mayoritariamente en seco.

CRITERIOS DE DISEÑO Y DE SEGURIDAD

El diseño de los diferentes sistemas de almacenamiento en seco de residuos de alta actividad debe incorporar las características necesarias que garanticen fundamentalmente los siguientes aspectos:

- Subcriticidad, que se puede asegurar mediante una adecuada disposición (geometría) de la instalación y de sus componentes, así como mediante medios específicos adicionales como el empleo de materiales absorbentes de neutrones, etc. Se deberán suponer condiciones más desfavorables de moderación, reflexión neutrónica, posibles deformaciones geométricas, tolerancias de fabricación de los componentes, etc.

- Disposición general, referidos, entre otros criterios, a evitar el acceso no autorizado a las zonas de manipulación y de almacenamiento, a prevenir la remoción no autorizada de los residuos y a minimizar el movimiento de cargas pesadas sobre los mismos y sobre sistemas de seguridad, a permitir la inspección de los residuos, si así se requiriese, a disponer de salidas de emergencia para el personal y garantizar condiciones seguras de almacenamiento tras situaciones externas postuladas como terremotos, tornados, inundaciones, etc.

- Protección Radiológica, para lo que se deberá cumplir con los principios y requisitos de Protección de los trabajadores y público en general frente a la radiación reglamentados en la normativa nacional e internacional existente.

- Confinamiento del material radiactivo, dotándoles de las medidas necesarias para el confinamiento de los materiales radiactivos que eviten la liberación incontrolada de los mismos al medio ambiente. Para ello se dispone un sistema multibarrera en torno al combustible gastado, en el que la vaina actúa normalmente como la primera de estas barreras para que esto no tenga lugar, por lo que deberá evitarse su degradación durante la vida de diseño del sistema.

- Evacuación del calor, requisito que, para el caso del combustible gastado, se asocia normalmente a garantizar que la vaina no superará la máxima temperatura aceptada por

el Organismo Regulador para el tipo y características del combustible allí almacenado.

- Materiales, para lo que los componentes de la instalación de almacenamiento relacionados con la seguridad deberán preservar su adecuado funcionamiento durante la vida de diseño de la misma. La selección de los materiales estructurales y métodos de soldadura deberá basarse en Códigos y Normas aceptables por la Autoridad Reguladora Competente. Asimismo, deberán considerarse los agentes corrosivos existentes tanto dentro como fuera de la barrera de confinamiento. En la medida de lo posible se emplearán materiales cuya ulterior descontaminación sea sencilla, lo que facilitará el futuro desmantelamiento de la instalación.

- Salvaguardias y Protección Física, para lo que se deberán establecer las medidas que garanticen el confinamiento, la vigilancia y contabilidad de los materiales nucleares. También se deberán adoptar las medidas de protección física que eviten el acceso no autorizado de personal a las zonas de almacenamiento y manejo de estos residuos.

- Aspectos operacionales, que se concreta en la adopción de medidas para:

- restringir la liberación de radiactividad y exposiciones a la radiactividad de los trabajadores y del público durante la operación normal y posible sucesos operacionales anticipados según el criterio de limitación de dosis, utilizando, en la medida posible, técnicas remotas en zonas de radiación;
- impedir la ocurrencia de situaciones anormales de operación o de accidente que pudieran derivar en condiciones de accidente severo inaceptables;
- facilitar la operación y mantenimiento del equipo esencial para el funcionamiento de la instalación (en particular, de todos los equipos relacionados con la seguridad);

- la recuperabilidad de los residuos tras su período de almacenamiento.

La importancia de la presencia de un gas inerte en torno a los elementos combustibles se debe a dos motivos fundamentales. Por una parte, como medida para evitar la degradación de la vaina, a la que en el caso de combustible sin fallo se le puede dar crédito como primera barrera de protección y, por otra, para alcanzar una mayor densidad de almacenamiento, ya que la temperatura máxima que se permite alcanzar en la vaina (función del tipo de elemento combustible, grado de quemado alcanzado y tiempo de enfriamiento previo) es mayor en el caso de presencia de un gas inerte (entre 380 y 410 °C) que en el de aire (sobre 250 °C).

Una de las principales ventajas que ofrecen las tecnologías de almacenamiento en seco reside en su carácter pasivo para realizar las funciones requeridas. Tan solo se necesita una vigilancia, normalmente indirecta, del mantenimiento de las condiciones de estanqueidad del sistema en el tiempo que dure el almacenamiento.

TECNOLOGÍAS

En la actualidad son tres las opciones básicas utilizadas para el almacenamiento en seco, a saber: los contenedores (metálicos o de hormigón), los nichos de hormigón y las cámaras o bóvedas. A continuación se describen brevemente cada una de estas alternativas.

Contenedores

Se basa en la introducción de un número limitado de elementos combustibles en unos envoltorios o cápsulas diseñadas al efecto, que son trasladados posteriormente a una instalación de almacenamiento. Existen diferentes tipos de contenedores, entre los que cabe citar los siguientes:

Contenedores metálicos

Hay una gran variedad de diseños de contenedores metálicos de almacenamiento, si bien todos ellos constan de los mismos elementos básicos: un cuerpo metálico robusto (vaso) en el que se inserta un bastidor que sirve de alojamiento y soporte a los elementos combustibles, una o varias tapas de cierre del cuerpo, unos muñones que sirven para manejo del contenedor, y unas penetraciones con sus correspondientes tapas y/o taponeros de cierre que sirven, entre otras funciones, para las operaciones de drenaje y venteo que se describirán más adelante.

Los funciones que deben garantizar los contenedores metálicos se consiguen mediante los siguientes medios:

- Integridad estructural y recuperabilidad del combustible:
 - Resistencia de la barrera de confinamiento.
 - Integridad de los componentes estructurales del bastidor.
- Disipación del calor residual:
 - Empleo de materiales con buena conductividad térmica en el bastidor.
 - Utilización de aletas de disipación de calor.
- Subcriticidad:
 - Integridad estructural del bastidor.
 - Trampas de agua.
 - Venenos neutrónicos.
- Blindaje:
 - Cuerpo metálico.
 - Materiales de blindaje neutrónico y gamma.
- Confinamiento:
 - Doble barrera de sellado.

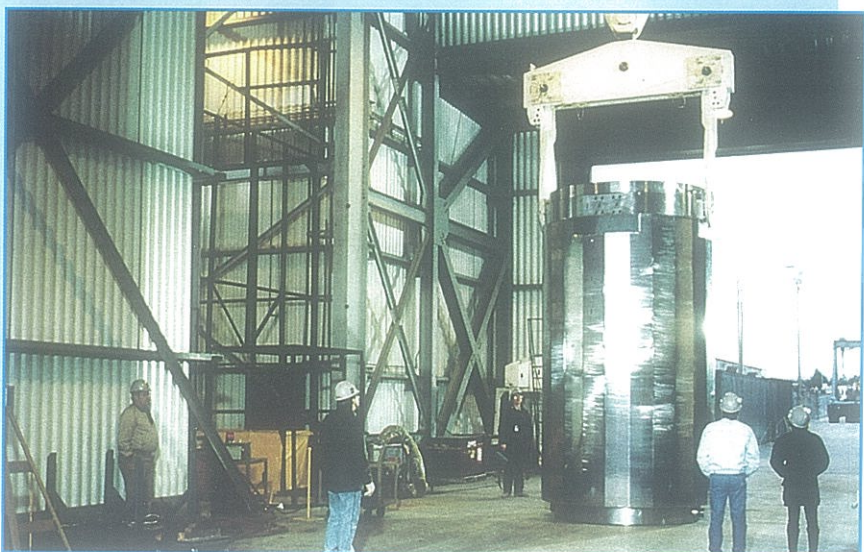
En la figura 1 se presentan dos ejemplos típicos de contenedores metálicos licenciados. Como norma general, los diseños de última

generación para elementos de una central PWR de 1000 MWe, presentan un diámetro interno de la cavidad de 1.75 m y uno externo máximo de 2.5 m, siendo su altura de unos 5 m y su peso máximo cargado de combustible y agua de unas 125 ton.

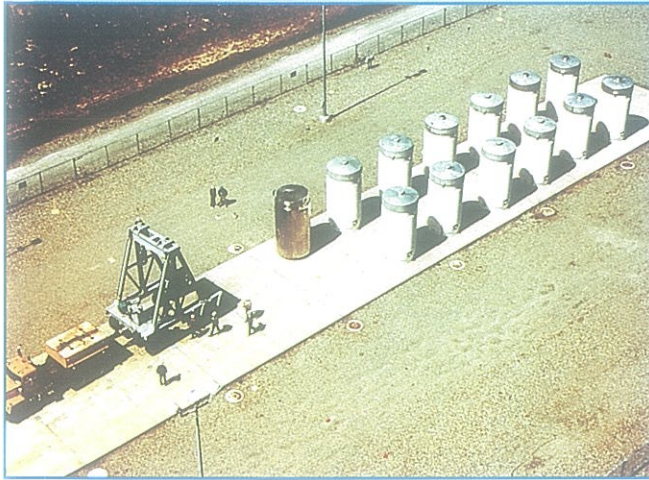
El proceso de carga de un contenedor metálico consta normalmente de las siguientes operaciones principales:

- Introducción del contenedor en la zona habilitada en el foso o pozo de contenedores de la piscina (a falta de éste, se emplea una zona de la piscina reservada a tal efecto);
- Inserción uno a uno de los elementos combustibles en cada una de las posiciones del bastidor;
- Colocación de la tapa del contenedor y sus sellos bajo agua, y posterior drenaje parcial de la cavidad interna;
- Izado del contenedor y descontaminación superficial mediante chorro de agua;
- Apriete de los pernos de la tapa interna;
- Drenaje del agua restante de la cavidad y obtención de condiciones de vacío;

F.1. Arriba, en primer término, un contenedor metálico TN-24 durante unas pruebas realizadas en el INEL (EE.UU.). Abajo, vista del contenedor NAC-ST-26 en la central estadounidense de Surry, Virginia.



F II. A la izquierda, vista de la instalación de almacenamiento de la central estadounidense de Surry, Virginia, con contenedores metálicos tipo CASTOR y NAC. A la derecha, vista del interior de la instalación de Ahaus (Alemania)



- Llenado de la cavidad interna con gas inerte;
- Pruebas de estanqueidad para el control de posibles fugas a través de los sellos de la tapa interna y de los de las tapas de las penetraciones.
- Colocación de la tapa externa (si la hubiera) y sus sellos para el posterior traslado a la instalación de almacenamiento.

Una vez cargado el contenedor se traslada a la instalación de almacenamiento, que puede consistir en una simple losa de apoyo a la intemperie o en un edificio, como se muestra en la figura II.

Los contenedores metálicos suelen incorporar un presostato, cuya continua lectura permitirá comprobar indirectamente el adecuado funcionamiento de los mismos, y más concretamente, de la barrera de confinamiento (p.ej. controlando las variaciones de la presión del espacio entre las dos tapas o del espacio entre sellos de la tapa interna).

Contenedores de hormigón

El concepto es totalmente similar al de los contenedores metálicos, siendo la única diferencia que el cuerpo es de hormigón con un revestimiento metálico en su interior, lo que introduce modificaciones operacionales apreciables frente al concepto anterior. Pueden disponer o no de aberturas para la ventilación, por convección natural, de su contenido en función de la carga térmica que fuesen a albergar. Este sistema está formado por los siguientes componentes:

- **BASTIDOR SELLADO (MSB):** Es una estructura sencilla de acero que contiene el bastidor que alojará los elementos combustibles, con una tapa que se suelda tras la inserción del combustible en la piscina de la central, y cuyo interior se rellena con helio posteriormente.
- **CONTENEDOR DE TRANSFERENCIA:** Alberga al MSB para su traslado desde la piscina al módulo de almacenamiento, pro-

porcionando fundamentalmente funciones de blindaje.

- **CONTENEDOR DE HORMIGÓN VENTILADO:** El módulo de almacenamiento en sí, construido en hormigón, que aloja al MSB.

Contenedores de doble propósito

Son una variante de los contenedores metálicos de almacenamiento, que se diseñan además para cumplir la reglamentación aplicables a los contenedores de transporte. Con ello se consigue disponer de un sistema de almacenamiento que servirá para el posterior transporte del combustible a su destino final sin que exista necesidad de manipulación adicional del mismo.

Contenedores multipropósito

Un paso adicional en el desarrollo de los contenedores de doble propósito consistiría en el que el mismo contenedor pudiera servir para las funciones de almacenamiento, transporte y evacuación definitiva en un repositorio de residuos de alta actividad.

Este concepto incorpora características de los anteriormente reflejados, y comparte mayor similitud con el de los contenedores de hormigón: Un cuerpo interior metálico soldado que se ubica bien en nichos o contenedores de hormigón para la modalidad de almacenamiento, en un contenedor metálico para cumplir la función de transporte y en otro envoltorio por definir, en función de los requisitos que imponga el diseño del repositorio. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo en los Estados Unidos de América.

Nichos de hormigón

Este sistema se conoce comercialmente en USA como NUHOMS®. Sus principales componentes y funciones se describen a continuación:

- **CONTENEDOR SECO BLINDADO (DSC):** Es un componente de acero inoxidable que aloja un bastidor y que dispone de blindajes adicionales en las tapas inferior y superior para reducir las dosis en las operaciones asociadas con este componente. El interior se llena de helio para prevenir la oxidación del combustible y mejorar las características térmicas del sistema.

- **MÓDULO DE ALMACENAMIENTO HORIZONTAL (HSM):** Es una estructura de hormigón armado, cuya misión fundamental es la de proporcionar blindaje y servir de mecanismo pasivo para la refrigeración pasiva del DSC mediante convección natural del aire circundante. Además proporciona resistencia estructural contra fenómenos naturales como terremotos, tornados, misiles, etc. Dispone de carriles interiores para soportar el DSC y de entradas de aire en la parte inferior del módulo y de salidas de aire en la parte superior. En cada HSM se aloja un único DSC.

- **CONTENEDOR DE TRANSFERENCIA:** Es un contenedor metálico utilizado para transferir el DSC al interior del HSM.

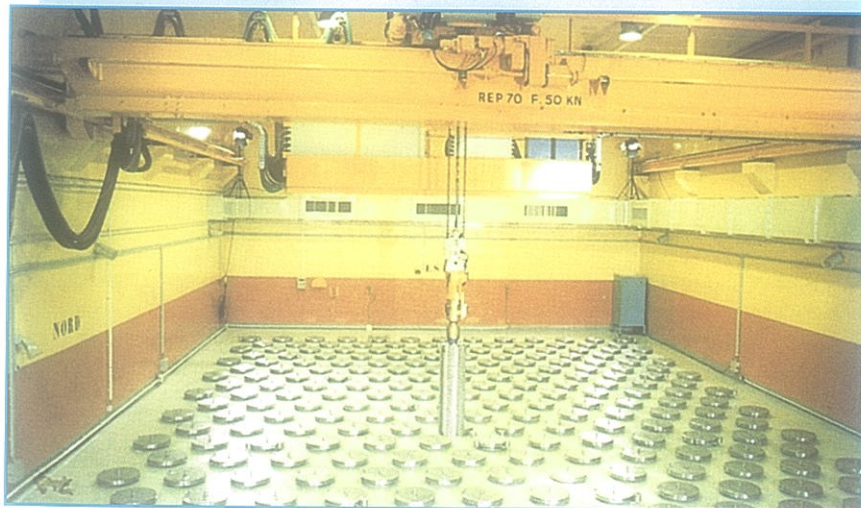
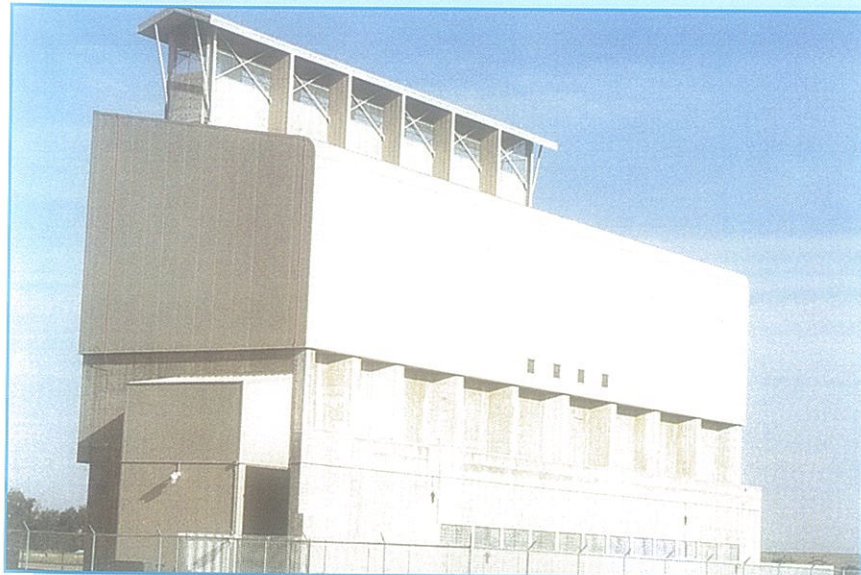
Cámaras

Las cámaras permiten el almacenamiento de uno o varios elementos combustibles en tubos metálicos que se disponen vertical u horizontalmente, según el diseño, en unas bóvedas. La refrigeración es de nuevo por convección natural, que se alcanza mediante el diseño adecuado del edificio que las hospeda. En la figura III se puede ver el esquema de una instalación basada en esta tecnología.

En general, los diferentes diseños presentan los siguientes componentes comunes:

- Una *zona de recepción*, donde llegan los contenedores de transporte cargados con los elementos combustibles.
- Una *zona de acondicionamiento*, donde se extrae el combustible del contenedor y

F III. Arriba, vista de la instalación de Fort St. Vrain (EE.UU.) - modelo GEC-ALSTHOM. Abajo, interior de la instalación Cascade (Francia) de diseño SGN.



se acondiciona para su traslado a la zona de almacenamiento.

- La zona de almacenamiento, que se puede construir de forma modular, consistente en las bóvedas propiamente dichas.

La principal diferencia entre los dos conceptos existentes en el mercado con instalaciones de referencia reside en la zona y en el proceso de acondicionamiento del combustible recepcionado. En un caso (diseño de GEC-ALSTHOM), la Máquina de Manipulación de Combustible (FHM) sirve para extraer directamente cada elemento combustible del contenedor y depositarlo directamente en el tubo de almacenamiento ya dispuesto en la bóveda correspondiente. En el segundo caso (diseño de SGN) cada elemento combustible (o varios según el diseño) se ubican en el interior de un tubo al que se le suelda la tapa en una celda caliente, y que se traslada posteriormente con una grúa a su posición en la bóveda de almacenamiento, presentando frente al primer sistema una barrera adicional de confinamiento.

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE OPCIONES

Como primera observación, cabe destacar que, en general, los bastidores colocados originalmente en las piscinas de las centrales nucleares tenían un espaciado entre centros de elementos combustibles bastante generoso. Es por ello, que el método más barato y sencillo de aumentar la capacidad de almacenamiento sea el de sustituir los bastidores de las piscinas con otros que permitan una mayor densidad de almacenamiento. Hoy en día esto se consigue incorporando un veneno neutrónico en los bastidores y dando crédito al grado de quemado del combustible. Además, la sustitución de los bastidores de las piscinas de almacenamiento genera un impacto mínimo en la operación de la planta.

Cuando ya no es posible la sustitución de los bastidores de las piscinas, resulta necesario acudir bien a la construcción de una piscina adicional, o a la elección de alguna de las tecnologías mencionadas para el al-

macenamiento en seco. La primera de estas opciones dota a la planta de una gran flexibilidad, pero supone una inversión inicial muy considerable y unos costes de operación, mantenimiento y posterior desmantelamiento considerablemente elevados. Por ello, normalmente se tiende a la elección de soluciones modulares de almacenamiento en seco.

No existe una norma universal para elegir entre una u otra tecnología de almacenamiento en seco, como lo prueba el hecho de que todas ellas están, en mayor o menor medida implantadas en diferentes reactores en el mundo. La selección debe efectuarse caso por caso, teniendo en consideración todos los condicionantes y restricciones de cada caso particular.

A continuación se indican brevemente unos cuantos factores que afectarán la elección del sistema de almacenamiento óptimo:

- La madurez del concepto de almacenamiento.
- El tiempo necesario requerido para la implementación del sistema.
- La licenciabilidad de la solución elegida en cada país.
- La tasa a la que es necesario almacenar el combustible (si tan sólo se necesita capacidad para pocos elementos combustibles cada año o se trata, por ejemplo, de una instalación centralizada para todo el combustible de un país).
- Las interfases que requiere el sistema con la operación normal de la central.
- El coste de cada opción (global y por posición almacenada).
- La opinión pública.

Entre todos estos factores, quizás sea el del coste uno de los más críticos, sino el que más, a la hora de decantar la elección. Para ello se deberá considerar no sólo el coste de la inversión inicial, sino los costes previsibles de operación, mantenimiento y, a ser posible, los del futuro desmantelamiento. Existen diferentes metodologías para realizar estos cálculos, siendo la más empleada la consistente en referir todos los costes a un año de referencia (normalmente el año en que se realiza la evaluación) teniendo en cuenta la escalación "real" del dinero mediante la tasa de descuento.

EL CASO ESPAÑOL

El almacenamiento en vía húmeda, en las propias piscinas de las centrales nucleares, es la práctica común para todas las centrales del parque nuclear español. Cuando se ha estado próximo a la saturación de la capacidad de las mismas, las centrales, conjuntamente con ENRESA, han acometido la sustitución de los bastidores originales por otros más compactos, de acuerdo con la estrategia diseñada en el 4º Plan General de Residuos Radiactivos (en adelante PGRR) para el almacenamiento temporal del

combustible gastado, que se articula en torno a tres direcciones principales:

- Aumento de la capacidad de las piscinas de las centrales nucleares mediante el cambio de bastidores.
- Aumento de la capacidad de almacenamiento mediante el uso de contenedores metálicos.
- Disponibilidad de un Almacenamiento Temporal Centralizado (ATC) antes del año 2.013 para el caso de 40 años de operación de las centrales nucleares.

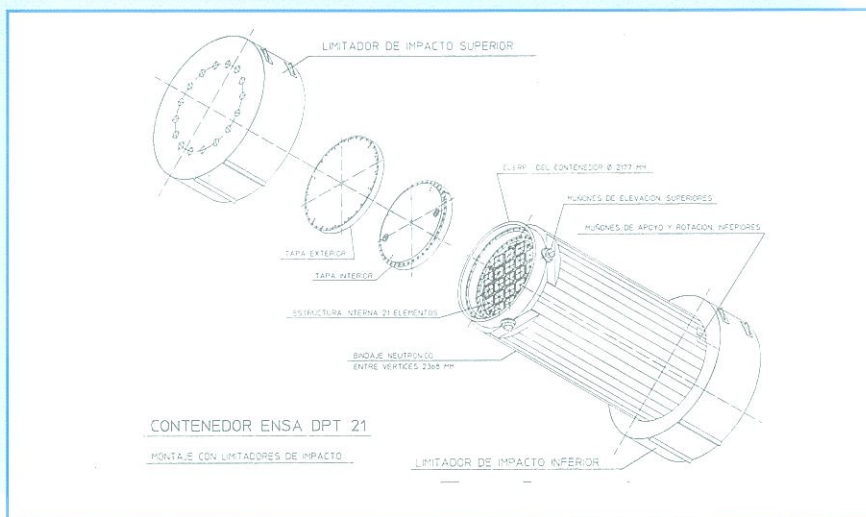
Los trabajos correspondientes a la implementación de la primera de estas vías se iniciaron en 1.989 conjuntamente para los dos grupos de las centrales de Almaraz y de Ascó, por ser éstas las primeras que presentaban problemas de saturación hacia el año 1.992. En 1.996 se terminarán los trabajos en las centrales de Trillo (ya concluido en el momento de la edición del presente artículo) y Vandellós II, mientras que a lo largo de 1.997 está previsto completar el cambio de los bastidores del resto de centrales (Santa María de Garoña, Cofrentes y José Cabrera). Cuando las piscinas agotan su capacidad de almacenamiento, las soluciones previstas en el PGRR abogan por el almacenamiento en seco. En primer término, y con el fin dar solución a la situación específica de la primera central que lo necesitará, la Central de Trillo I, se prevé la utilización de una solución modular y de gran flexibilidad como son los contenedores metálicos de doble propósito. Por otra parte, se pretende utilizar en el ATC una combinación de la anterior con otra tecnología más acorde a un almacenamiento de carácter masivo como son las bóvedas. De acuerdo con lo indicado anteriormente la fecha más tardía para la puesta en servicio de dicha instalación sería el 2013, habiéndose fijado como objetivo su finalización en el año 2010.

EL CONTENEDOR ENSA-DPT

El contenedor ENSA-DPT es un contenedor metálico de doble propósito cuyo diseño final se muestra esquemáticamente en la figura IV. Este contenedor puede albergar para su almacenamiento y/o transporte hasta 21 elementos combustibles del tipo empleado en la Central Nuclear de Trillo I, en los que el enriquecimiento inicial puede alcanzar hasta un 4% U_{235} , un quemado de hasta 41.200 MWd/tU y un tiempo de enfriamiento de tan solo 5 años. El peso del bulto, cargado de combustible, y de sus accesorios se ha mantenido por debajo de 118 toneladas bajo cualquier condición de manejo.

El diseño del contenedor ENSA-DPT es similar al del contenedor NAC-STC, desarrollado por la empresa estadounidense NAC International con el patrocinio del EPRI, Virginia Power Co. y ENRESA, si bien en él se han incorporado algunas mejoras que faci-

F IV. Vista general del contenedor ENSA-DPT.



tan el proceso de fabricación y su futura operación. El cuerpo del contenedor es un cilindro de construcción multipared (acero - plomo - acero - blindaje neutrónico). En su parte superior, dispone de dos tapas de acero inoxidable, una interior y otra exterior que son chapas circulares que se fijan con pernos a los asientos de las tapas mecanizados en la forja superior. Dispuestas en la tapa inferior existen dos penetraciones a la cavidad del contenedor que se utilizan para las operaciones de venteo y drenaje. En la parte inferior del cuerpo, las virolas interior y exterior van soldadas al fondo del cuerpo que está a su vez formado por dos forjas y una chapa.

El blindaje necesario frente a la radiación se consigue principalmente mediante el empleo de una capa de plomo, situado entre las dos virolas principales del contenedor, y una más exterior de un blindaje neutrónico, conocido como NS4FR, que es un polímero absorbente de neutrones que contiene carburo de boro. En el interior de la envolvente de blindaje neutrónico se han dispuesto radialmente 36 aletas bimetalicas que facilitan la disipación del calor que emiten los elementos combustibles.

Para cumplir con la reglamentación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en materia de hipotéticos accidentes que tuvieran lugar durante el transporte, se ha llevado a cabo un completo programa de pruebas y validación. Se realizaron una serie de 6 ensayos de caída con un modelo a escala 1/4 para demostrar la capacidad de absorción de energía y la resistencia a la rotura del contenedor. Este programa de pruebas se completó satisfactoriamente en las instalaciones de Winfrith (Reino Unido), homologadas al efecto.

En coordinación con el desarrollo de este contenedor específico para C.N. Trillo, esta Central ha presentado el proyecto de un edificio para almacenar el combustible gastado en la operación de la propia central.

José Antonio GAGO BADENAS es Ingeniero Industrial (Especialidad Técnicas Energéticas) por la Universidad Politécnica de Madrid. Tras una etapa como Investigador y Profesor Asociado en dicha Universidad, se incorpora a ENRESA en 1988. En la actualidad trabaja en el Departamento de Proyectos y Construcción como Jefe de Proyectos relacionados con el Almacenamiento Temporal del Combustible Gastado y de actividades de I+D asociadas al comportamiento a largo plazo de este tipo de residuos y de las cápsulas previstas para su almacenamiento definitivo.



Pablo ZULOAGA LALANA es Ingeniero Industrial (Especialidad Técnicas Energéticas) por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Bilbao. De 1976 a 1986 trabajó en INITEC, primero en el proyecto de la CN Vandellós II y posteriormente en las Puestas en Marcha de CN Lemóniz, CT Alcudia II, Grupos 1 y 2, CT La Robla, Grupo 2 y CN Vandellós II. De 1986 a 1995 trabajó en ENRESA como responsable del proyecto de las nuevas instalaciones de El Cabril y desde esa fecha es Jefe del Departamento de Proyectos y Construcción de dicha empresa.