

Gestión del ciclo de combustible por las empresas eléctricas y centrales nucleares españolas

Grupo de Combustible de Unesa

El Grupo de Combustible dependiente de la Comisión de Tecnología del Comité de Energía Nuclear de Unesa, lo forman representantes de las empresas eléctricas y centrales nucleares españolas, y se ocupa de los asuntos comunes a las centrales en lo relativo a la explotación y gestión del combustible nuclear en sus diferentes etapas del ciclo de combustible.

En el artículo se revisan las actividades que desarrolla el Grupo en la primera parte del ciclo de combustible, principalmente en el seguimiento de programas internacionales que definen criterios para mejorar la fiabilidad del combustible y en el establecimiento de bases comunes para la aplicación de la regulación específica que aplica al combustible nuclear, y en la segunda parte del ciclo de combustible, sobre todo en aquellas actividades de coordinación con terceros en la gestión del combustible usado en las centrales.

The Nuclear Fuel Group reports to the Technology Committee of the UNESA's Nuclear Energy Committee, and is constituted by representatives of both the Spanish Utilities and the Nuclear Power Plants. The Group addresses the nuclear plant common issues in relation to the operation and management of the nuclear fuel in their different stages of the Fuel Cycle. The article reviews the activities developed by the Group in the Front-End, mainly in the monitoring of international programs that define criteria to improve the Fuel Reliability and in the establishment of common bases for the implementation of changes in the regulation applying the nuclear fuel. Concerning the Back-End the Group focuses on those activities of coordination with third parties related to the management of used fuel.

INTRODUCCIÓN

El artículo, elaborado por el Grupo de Combustible de Unesa, describe las actividades más significativas para la gestión del combustible nuclear de las centrales nucleares españolas.

El Grupo de Combustible, enmarcado en la Comisión de Tecnología del Comité de Energía Nuclear de Unesa, lo forman representantes de las empresas eléctricas y centrales nucleares españolas, y se ocupa de los asuntos comunes a las centrales en lo relativo a la explotación y gestión del combustible nuclear en sus diferentes etapas del ciclo de combustible (primera y segunda parte del ciclo). Desde un punto de vista práctico, el Grupo de Combustible se organiza en las siguientes áreas temáticas:

- Fiabilidad del combustible en explotación,
- Aspectos económicos del combustible,
- Gestión del combustible nuclear usado,
- Actividades de I+D+i del combustible, y
- Termohidráulica y análisis de transitorios y accidentes.

Se describen a continuación los aspectos fundamentales de la gestión del combustible, para lo que, con objeto de dar una visión global, se incluyen adicionalmente a las propias que se coordinan en el Grupo de Combustible, aquellas otras que se gestionan de forma individual o en otras estructuras comunes de las empresas eléctricas o centrales nucleares.

GESTIÓN DE LA PRIMERA PARTE DEL CICLO DE COMBUSTIBLE

Gestión de los aprovisionamientos de uranio

Las empresas eléctricas propietarias de las centrales nucleares españolas realizan la gestión de los abastecimientos de uranio a través de la Comisión de Aprovisionamiento de Uranio (CAU), formada por miembros de las empresas y de Enusa, que actúa como agente encargado del acopio, almacenamiento, garantía y control de calidad, transporte, conversión, enriquecimiento y notificación de salvaguardias, así como todo lo necesario para la entrega final del uranio enriquecido en forma de UF₆ en el destino indicado por los clientes. El

EL GRUPO DE COMBUSTIBLE DE UNESA LO FORMAN:

Eva María Celma (Endesa),
Celia González (Nuclenor),
Jose Vicente López (Nuclenor)
José Melara (Iberdrola),
Luis López (Iberdrola),
Juan Carlos Martínez (CNAT),
Francisco Culebras (ANAV),
Julio Blanco (Gas Natural, Coordinador),
y Lorenzo Francia (Unesa, Secretario)

plan de coberturas satisface en todo momento las necesidades del parque nuclear español de servicios de concentrados, conversión y enriquecimiento para los siguientes cinco años.

Gestión del suministro de recargas

Aunque por Recarga se entiende aquel periodo en el que se realiza una parada de la producción de energía eléctrica para recargar el combustible fresco y descargar el usado, aprovechando además para realizar las operaciones programadas de inspección, mantenimiento y reparación, por extensión se denomina Diseño e Ingeniería de la Recarga al conjunto de actividades de ingeniería dirigidas a la selección y colocación óptimas de los elementos combustibles (frescos y usados) en el núcleo del reactor, así como la evaluación de seguridad del núcleo resultante.

En términos de combustible nuclear, el suministro de las recargas está constituido por la fabricación de los elementos combustibles (incluyendo la segunda conversión y la fabricación, transporte y entrega en central de los elementos combustibles), la ingeniería de análisis, diseño

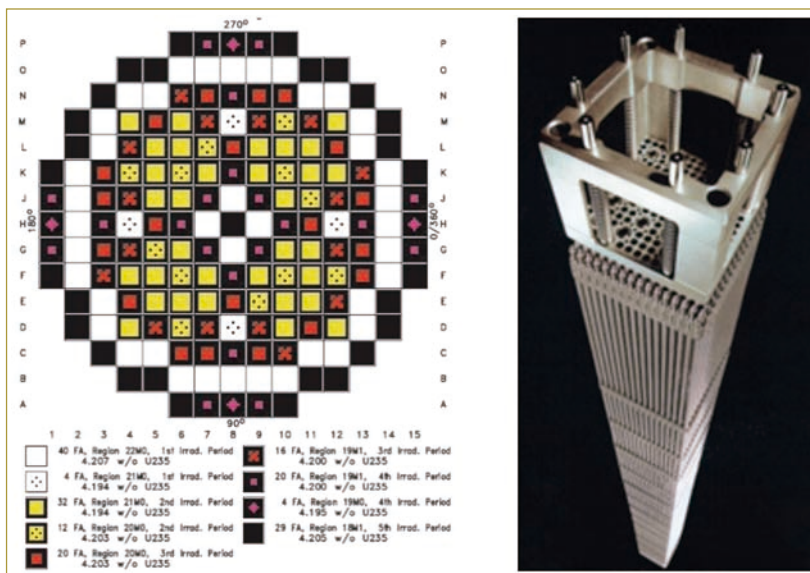
de núcleo y apoyo al licenciamiento de las recargas y otros servicios opcionales. Este suministro de recargas se rige por contratos específicos para cada central, que se establecen entre las empresas eléctricas propietarias de dicha central y el contratista.

Los contratos fijan el calendario de tiempos para la fabricación de elementos combustibles y para la realización de las actividades de diseño, así como las responsabilidades y obligaciones del contratista y del cliente. El inicio de la fabricación de los elementos combustibles se realiza aproximadamente 5 meses antes de la entrega en central.

Los elementos deben estar almacenados en la central en la que van a ser utilizados con una antelación mínima de dos meses a la fecha prevista de recarga, según el requisito legal establecido en el Real Decreto 1464/1999, de 17 de septiembre, sobre actividades de la primera parte del ciclo del combustible nuclear.

El Diseño e Ingeniería de la Recarga es una tarea de ingeniería compleja y multidisciplinar en la que intervienen aspectos económicos, técnicos y reguladores cuyo objetivo es que el núcleo diseñado sea capaz de operar a plena potencia con seguridad, flexibilidad y de forma económica y para ello hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- El diseño del elemento combustible: desde el inicio de la vida de la planta, el combustible utilizado ha ido evolucionando incrementando su fiabilidad para responder a las necesidades y exigencias de la operación.
- La propia gestión del núcleo y del combustible que debe determinar un esquema de recarga que incluya las consideraciones físicas, las contractuales y los factores técnicos, los cuales interaccionan unos con otros, así como los requerimientos energéticos, las consideraciones del coste del ciclo del combustible, los quemados de descarga a alcanzar, los elementos disponibles, los venenos a utilizar, es decir, todos aquellos que deben ser tenidos en cuenta para obtener un esquema satisfactorio.
- El Análisis de Seguridad de la Recarga: que tiene por objetivo que el núcleo diseñado sea capaz de operar a plena potencia con seguridad, demostrando de esa manera que la planta tiene capacidad de operar a potencia y presenta margen a los límites de seguridad.
- Y por último, preparar los documentos que proporcionan la infor-



Esquema de diseño de un ciclo de operación y de un elemento combustible de CN Trillo.

mación de diseño que sirve de soporte a la operación del Reactor. Los principales documentos son el Informe de Diseño Nuclear, el Documento de Carga del Núcleo y el Informe de Gestión del ciclo.

El Informe de Diseño Nuclear documenta los parámetros físicos y las características del núcleo que sean útiles para la operación segura de la central a lo largo del ciclo incluyendo el arranque y las pruebas físicas nucleares antes de subir a potencia.

En un reactor BWR el Informe de Gestión de Ciclo reúne las recomendaciones para el operador que garantizan: el cumplimiento del margen de parada y de los límites térmicos de operación a lo largo del ciclo, así como el quemado final acordado, es decir, la energía generada y un arranque seguro.

La vigilancia de los principales parámetros de operación a lo largo del quemado del ciclo así como las medidas de química y radio química permiten realizar un seguimiento del comportamiento nuclear del ciclo de forma que garantiza que su comportamiento se realiza de acuerdo al diseño previsto y de que el combustible opera sin fallos.

Impacto económico de la primera parte del ciclo de combustible

Al ser introducidos en el núcleo del reactor, los elementos combustibles tienen un valor como activos igual al precio total (aprovisionamiento de uranio más suministro de recargas) que las empresas eléctricas pagan a sus suministradores de combustible.

Existe una equivalencia entre el valor de cada conjunto de elementos

combustibles que se introduce en el núcleo en cada parada para recarga y la energía total que estos generarán a lo largo de su estancia en el núcleo del reactor. Ambos valores disminuirán a medida que el combustible se queme en el núcleo del reactor hasta ser ambos 0 en el momento de su descarga definitiva del núcleo. A partir de esta equivalencia, y suponiendo linealidad en el quemado, para cada conjunto de elementos combustibles presente en el núcleo durante el ciclo de operación, se calcula el coste de la primera parte del ciclo realizando una estimación de la energía producida por el conjunto en base a su grado de quemado incremental. Gracias a la equivalencia energía-valor económico, se calcula el coste total asociado al consumo de combustible nuclear en el periodo.

El coste unitario se suele expresar en €/MWh neto o bruto (consumo de combustible / energía bruta o neta producida durante el periodo, o coste en barras de central o en barras de alternador).

A diferencia de otras tecnologías, los precios del combustible nuclear, tanto de los aprovisionamientos como del suministro de recargas, en términos relativos son estables y constituyen un porcentaje pequeño del coste total de generación.

Operación del combustible en el reactor. Seguimiento de prácticas internacionales

Las centrales nucleares españolas siguen las recomendaciones de mejores prácticas de utilización del combustible nuclear que realizan sus suministradores y los estándares de

referencia como INPO. Unesa participa en el programa nuclear del instituto norteamericano de investigación eléctrica, EPRI, y en particular en su programa específico sobre Fiabilidad del Combustible.

EPRI, con la colaboración de las centrales nucleares y los suministradores ha desarrollado unas guías técnicas sobre las mejores prácticas para evitar fallos en combustible desarrollando recomendaciones de INPO. Estas guías, que se siguen en las centrales españolas, se encuadran dentro del Programa de Fiabilidad de Combustible de EPRI y se han desarrollado en cinco áreas:

- Supervisión e inspección del combustible y seguimiento de operación en BWR y PWR.
- Rozamiento barra-rejilla (GTRF, en inglés) en PWR.
- Control de la corrosión y de los productos de la corrosión (*crud*) en vainas de PWR.
- Control de la corrosión y del *crud* en BWR.
- Interacción vaina-pastilla (PCI, en inglés) en BWR y PWR.

Adicionalmente EPRI también contempla la existencia de fallos de combustible debido a partículas sueltas en el primario incluyendo recomendaciones en sus guías para la exclusión de material extraño (*Foreign Material Exclusion*, FME).

Las guías describen el problema específico y tratan las acciones emprendidas estableciendo las recomendaciones en tres niveles: obligatorio, necesario y buena práctica.

Con el Programa de Investigación Coordinada (PIC) que las centrales PWR españolas de diseño Westinghouse y Enusa vienen realizando para vigilar el comportamiento del combustible, la industria española se anticipó a las recomendaciones de EPRI evaluando el efecto sobre el combustible de los cambios de las condiciones de operación, cambios en el diseño de combustible, esquema de recarga, química, cambio de componentes o combinación de efectos. Además se realiza un análisis continuado de la fiabilidad de la operación del combustible investigando los posibles fallos y las mejoras en el diseño de combustible y en el proceso de fabricación han supuesto un avance en la eliminación de algunos tipos de fallo. La práctica totalidad de las recomendaciones de EPRI se cumplen en los cinco reactores PWR de diseño Westinghouse españoles cumpliéndose con anterioridad a la emisión de las guías de EPRI. El comportamiento del combustible se considera excelente y

la tasa de fallo de barras en España es inferior a la del resto de plantas europeas y próxima a la de las centrales norteamericanas, siendo la principal causa de fallo la abrasión por partículas. Otro aspecto importante es el buen comportamiento del combustible durante su manejo.

De igual forma que el resto de centrales, CN Trillo (diseño original KWU) ha ido progresivamente mejorando la economía de los ciclos de combustible sin degradar su fiabilidad y sus márgenes de seguridad. Esto se ha conseguido mediante aumento de los quemados de descarga y mejor utilización del combustible, con esquemas de menores fugas neutrónicas y mayores enriquecimientos. También, se promueve la participación en los foros internacionales sobre usuarios de cada tecnología y se intercambia experiencia operativa y buenas prácticas con el resto de operadores.

Las centrales BWR españolas operan en ciclos de dos años. Esta forma de operación está ampliamente extendida en EE UU y permite mantener una relación equilibrada entre el coste de combustible y la duración de las paradas de recarga. Las experiencias y necesidades operativas de las centrales americanas son muy similares a las españolas y los proyectos del programa de Fiabilidad de Combustible de EPRI resultan directamente aplicables a las plantas españolas.

Las centrales BWR españolas siguen también las recomendaciones de las guías de química desarrolladas por EPRI, que incorporan específicamente y de forma cuantitativa límites y niveles de actuación para el control de *crud* y de la corrosión del combustible.

Se realizan también los análisis de riesgo recomendados ante los cambios introducidos en el reactor (química, materiales, condiciones de operación). Si se concluye que es conveniente, se definen planes de inspecciones inspirados en las recomendaciones de las guías de EPRI específicas de supervisión e inspección del combustible con el objeto de controlar los cambios y realizar un seguimiento del impacto de los mismos.

El comportamiento del combustible BWR se considera excelente (CN Cofrentes ha estado ocho años consecutivos sin fallos), siendo también la principal causa de fallo la abrasión por partículas. Se han incorporado los diseños de combustible que contienen los filtros antipartículas de diseño más avanzado en la pieza soporte inferior del elemento.

Apoyo a la operación del combustible en el reactor

Los programas de seguimiento de la operación del combustible en el reactor tienen entre sus principales objetivos mantener permanentemente actualizado el conocimiento de todos aquellos aspectos relacionados con la explotación y la gestión del combustible. Las fuentes de actualización son muy diversas, encontrándose entre ellas los requisitos reguladores, la experiencia operativa internacional y propia, las recomendaciones de los grupos de propietarios y los programas internacionales de investigación al respecto, que incluyen tanto aquellos orientados al análisis de fenómenos observados en la operación del combustible, como los que se diseñan como anticipación a potenciales problemáticas identificadas.

Dentro del marco anteriormente mencionado se establece la colaboración de Unesa en el Programa Nuclear de EPRI y, en particular, en el Plan de Acción de Fiabilidad del Combustible, que permite el acceso de las centrales a todos los productos existentes y previstos, así como la colaboración en sus programas particulares, como el Programa de Fiabilidad del Combustible (FRP, *Fuel Reliability Program*) y el Grupo de Usuarios del Código FALCON (*Falcon Fuel Rod Performance Code*), utilizado para la evaluación del comportamiento de combustible en reactores de agua ligera (interacción pastilla-vaina y corrosión localizada) mediante análisis termo-mecánicos en condiciones de operación normal y accidente.

De igual forma, se considera de gran interés disponer de un grupo de expertos con suficiente competencia técnica y experiencia para mantener actualizado el conocimiento en temas relacionados con la explotación y gestión del combustible, dando soporte al sector eléctrico y facilitando a las centrales nucleares españolas la asimilación y aplicación de la tecnología de EPRI mediante el análisis detallado de sus productos, su aplicabilidad a las especificidades de cada central, la participación en los grupos técnicos y programas internacionales existentes, así como la identificación de otros programas de potencial interés. Con el objetivo de proporcionar un soporte especializado que contribuya a mantener la operación segura, fiable y competitiva desde el punto de vista de la operación del combustible nuclear, Unesa ha establecido acuerdos de colaboración con diversas entidades españolas de reconocida capacitación en la materia, Enusa Industrias Avan-

zadas e Iberdrola Ingeniería y Construcción, para actuar como Centros de Referencia en el Área de Eficiencia del Combustible Nuclear.

Se han establecido, acuerdos de colaboración entre EPRI, suministradores y centrales españolas participando activamente al mismo nivel que cualquier miembro de EPRI.

Dentro del marco de colaboración Unesa-EPRI se han llevado a cabo otros proyectos para dar soporte al Grupo de Combustible que, estando fuera del ámbito del Plan de Acción de Fiabilidad de Combustible, presentaban relación directa con la explotación y gestión del combustible en las centrales nucleares. Este es el caso del Proyecto Unesa-MAAP5, desarrollado por los centros de Referencia en Contención y Modelización de Accidentes Severos, cuyo objetivo era el análisis y mejora de las capacidades del código termohidráulico MAAP5 (*Modular Accident Analysis Program*) para la simulación de fenomenologías de accidente en las piscinas de combustible gastado.

Adicionalmente a la colaboración en los programas de EPRI y con la misma finalidad de mantener actualizado tanto el conocimiento como la especialización de técnicos en todos los aspectos relacionados con la explotación del combustible, Unesa y las empresas eléctricas, de forma individual, fomentan la colaboración de diversas universidades para la adquisición de conocimientos, herramientas y métodos de simulación de la fenomenología de transitorios y accidentes mediante el desarrollo, mejora y aplicabilidad de códigos de cálculo y simulación termohidráulica que contribuyan al mantenimiento de la operación segura de las plantas.

A este respecto, cabe destacar los acuerdos alcanzados con el Consejo de Seguridad Nuclear bajo el marco del Programa CAMP-España, para la mejora y aplicación de códigos termohidráulicos a las centrales españolas mediante el desarrollo y explotación de modelos específicos de planta, con la consecuente conformación de grupos de especialistas entrenados en su utilización. Este programa se gesta como reflejo de la colaboración entre el CSN y la USNRC en el Proyecto CAMP, *Thermal-Hydraulic Code Applications and Maintenance Program*.

GESTIÓN DE LA SEGUNDA PARTE DEL CICLO DE COMBUSTIBLE

Segunda parte del ciclo de combustible

Excepto el combustible inicialmente reprocesado de las centrales de Van-

dellós I, José Cabrera y Santa M^a de Garoña, todo el combustible usado de las centrales de agua ligera que se ha generado en el parque nuclear español se ha venido almacenando en las piscinas de las centrales hasta que estas fueron aproximándose a su saturación, cuando se acometieron proyectos de sustitución de los bastidores originales por otros más compactos con lo que se difirió la necesidad de contar con un almacenamiento adicional. A pesar de ello, en CN Trillo al verse agotada su capacidad de almacenamiento en piscina, se construyó un Almacén Temporal Individualizado (ATI) en el emplazamiento, operativo desde 2002, con contenedores metálicos suministrados por Enresa que también están homologados para el transporte (doble propósito). Posteriormente se acometió el desmantelamiento de la central CN José Cabrera, descargando previamente su combustible a un ATI en 2009. Ante la indisponibilidad del ATC y la saturación de las piscinas de CN Ascó I y II, también se construyó un ATI en el emplazamiento cuya operación comenzó en 2013.

El 6º Plan General de Residuos Radiactivos (2006) preveía la puesta en marcha en 2010 de un Almacén Temporal Centralizado (ATC) para todo el combustible gastado y residuos de alta actividad de las centrales españolas. Dicha estrategia, actualmente en vigor pese a los retrasos ocasionados en la elección del emplazamiento, se basa en un sistema en seco tipo bóvedas y dotada de una celda caliente de recepción y acondicionamiento del combustible usado y resto de residuos. Las centrales nucleares, conjuntamente con Enresa, están desarrollando, como se indica más adelante, planes específicos y globales (hoja de ruta) para transferir el combustible al ATC.

Impacto económico de la segunda parte del ciclo de combustible

Las actividades que realiza Enresa se nutren de un fondo para la financiación de actividades del PGRR que se viene dotando desde 1984 y cuyo principio básico es que los costes de las actividades derivadas de la gestión de residuos radiactivos deben ser financiados por los agentes generadores de dichos residuos. El sistema establecido ha sufrido diversas modificaciones y la actual tasa nuclear de 6,69 €/MWh ha sufrido diferentes aumentos desde la primera de 1,86 €/MWh de 2005.

Adicionalmente, desde 2012 (Ley 15/2012, de 27 de diciembre, de me-

didat fiscales para la sostenibilidad energética) las centrales nucleares españolas tienen que abonar un impuesto por la producción del combustible nuclear usado a razón de 2.190 €/kg de metal pesado.

El Grupo de Combustible ha elaborado una guía para establecer la metodología general de aplicación a las centrales españolas de dicho impuesto: *Unesa CEN-43. Metodología de aplicación del impuesto por producción de combustible nuclear gastado a las centrales nucleares españolas* (Ley 15/2012 y su modificación conforme a la Ley 16/2013). Rev.0, Abril 2014.

Actividades sectoriales en relación a la gestión de la segunda parte del ciclo de combustible

Las actividades de gestión del combustible usado y los residuos radiactivos y el desmantelamiento de instalaciones legalmente constituyen un servicio público esencial que desarrolla la empresa pública Enresa y que se plantea para desarrollar iniciativas con seguridad que eviten restricciones operativas a las centrales.

En España, de acuerdo al VI PGRR, la estrategia de la gestión de los residuos radiactivos de alta actividad se basa en la construcción del ATC al que se trasladará todo el combustible nuclear gastado de las centrales nucleares españolas para su almacenamiento. Es necesario para ello tener un conocimiento correcto del estado del combustible de las piscinas de las centrales y prever alternativas como la construcción de ATI, que permitan adecuar los plazos del proyecto del ATC para cumplir estos requisitos.

El sector fomenta la coordinación y cooperación técnica con Enresa y otros agentes implicados a través de la Comisión Paritaria Unesa-Enresa y sus grupos mixtos de trabajo, principalmente:

- Grupo de Gestión de Residuos de Media y Baja Actividad.
- Grupo de Gestión de Combustible Gastado y seguimiento del ATC.
- Grupo de Análisis del Plan General de Residuos Radiactivos.

De especial importancia en este momento es la coordinación de actividades sectoriales de caracterización y clasificación del combustible irradiado y resolución conjunta con Enresa de las posibles problemáticas que se van identificando. Aunque el combustible de las centrales ha seguido una explotación acorde a las mejores prácticas internacionales, cuando se caracteriza para su posterior gestión por la vía de su almacenamiento y

transporte en seco, se requiere profundizar en aspectos determinados que justifiquen la seguridad y la fiabilidad de estas actuaciones.

El objetivo de la caracterización es la verificación y conocimiento de las características del combustible con objeto de poder clasificarlo para su almacenamiento y transporte atendiendo a condiciones tales como estanqueidad, integridad estructural y manejabilidad, estabilidad geométrica, corrosión de vaina, quemado, etc. Para ello, se dispone de registros de operación en planta, registros de radioquímica y resultados de inspecciones.

Los criterios de aceptación para el almacenamiento y transporte son el conjunto de parámetros/propiedades sujetos a verificación durante el proceso de aceptación o al cumplimiento de limitaciones para garantizar el cumplimiento de los requisitos de almacenamiento y transporte. En base a la información disponible de los elementos combustibles y la caracteriza-

ción previa, así como los criterios de aceptación, se realiza la clasificación de los elementos.

Las centrales ya han realizado diversas actividades necesarias para caracterizar sus inventarios de combustible usado. Cuando se disponga de un diseño licenciado de contenedor de transporte y de las condiciones del ATC, las centrales se encontrarán en disposición de clasificar gran parte de este inventario. Para la óptima realización de todas estas actividades las centrales españolas intercambian experiencias de caracterización de elementos combustibles y están en proceso de homogeneización de criterios y actuaciones sobre la caracterización del combustible gastado.

Unesa y Enresa están desarrollando actividades para la elaboración de una hoja de ruta conjunta de todas las centrales nucleares españolas para la gestión coordinada del combustible y de los residuos especiales asociados que permita definir de una

manera unificada y sistemática las necesidades, limitaciones y prioridades de las centrales nucleares españolas en la gestión del combustible usado y residuos especiales para su coordinación con Enresa.

CONCLUSIONES

Las actividades de gestión del ciclo de combustible nuclear que se desarrollan sectorialmente cubren un abanico significativo de las propias derivadas de su explotación en las centrales nucleares. Tanto en la gestión de la primera parte (*Front-End*) como en la de la segunda (*Back-End*), el grupo de combustible desarrolla un conjunto de actividades de interés común y de coordinación frente a terceros, que se reflejan en el artículo, entre las que destacan las prácticas para mantener un alto grado de fiabilidad del combustible y las actividades de gestión del combustible usado para etapas posteriores a las de su almacenamiento en las piscinas de las centrales.■