



LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE

FUEL MANAGEMENT

El combustible de la Central Nuclear José Cabrera, que se cargó con carácter de innovación tecnológica en el primer núcleo del reactor, ha venido evolucionando tecnológicamente a lo largo de los 29 ciclos de quemado, garantizando la generación segura y económica de electricidad a la par que ha ido mejorando progresivamente sus índices de calidad en cuanto a su comportamiento en explotación, alcanzando el nivel de excelencia en los últimos 8 ciclos de operación en los que ha logrado el criterio operativo óptimo de “fugas cero”.

The fuel of the Jose Cabrera nuclear power plant, whose loading in the first reactor core was a technologically innovative operation, has been technologically evolving over the 29 burn cycles, guaranteeing safe, economic power generation and at the time progressively improving the quality standards in operating performance. It achieved the level of excellence in the last 8 operating cycles by attaining the optimal operating criteria of “zero leaks”.

INTRODUCCION

El combustible nuclear, operando en el núcleo de reactor, ha sido la fuente energética de la Central Nuclear José Cabrera desde agosto de 1968 hasta abril de 2006. En su interior, mediante la reacción de fisión nuclear automantenida, se ha generado la energía térmica que se transfirió directamente al refrigerante del circuito primario, y a través del generador de vapor al circuito secundario, produciendo así el vapor motriz que finalmente generaba la electricidad impulsando el grupo turbo-alternador.

Por diseño, el núcleo del reactor de José Cabrera dispone de 69 elementos combustibles (ver figura, correspondiente al esquema del último ciclo en operación, ciclo 29) y ha venido operando a lo largo de su vida con un ciclo de referencia de 12 meses. En los primeros ciclos se mantuvieron esquemas de carga de tipo “out-in”, con recargas de 24 elementos combustibles frescos tipo HIPAR con ^{235}U enriquecido al 3,25 %. En los ciclos siguientes se fue evolucionando hacia recargas de 20 elementos de 3,40% y, en ciclo de equilibrio hipo-anual, a recargas de 16 elementos de 3,60%. Posteriormente, para mejorar la economía neutrónica, a la par que para alcanzar la longitud nominal del ciclo de

equilibrio anual, se sustituyó el combustible HIPAR por el LOLOPAR, con recargas de 16 elementos de 3,60% de enriquecimiento, recurriendo a diseños de núcleo con bajas fugas radiales, alcanzando un quemado de descarga medio por elemento en torno a 40.000 MWD/TU, inferior al de licenciamento (45.000 MWD/TU).

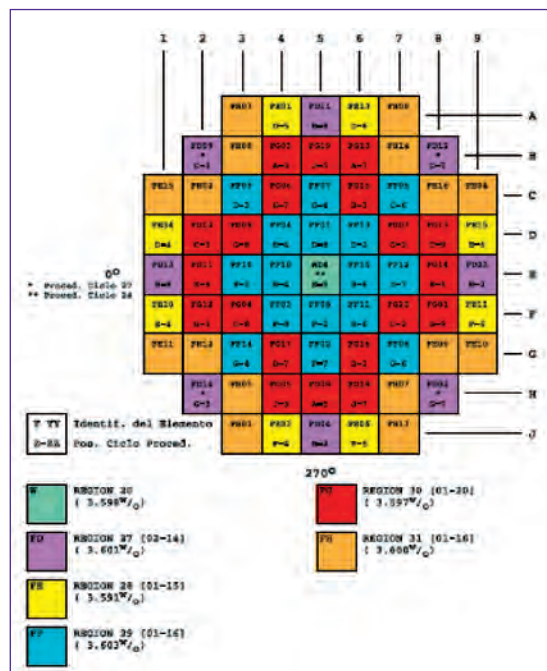
Unión Fenosa siempre ha entendido que el combustible nuclear es el elemento crítico del reactor, por lo que

su gestión se ha realizado primando y potenciando su seguridad, fiabilidad y flexibilidad operativa, por delante de su rentabilidad económica. Siempre cumpliendo los requisitos derivados de su licenciamiento, se han mantenido los márgenes del diseño neutrónico, termohidráulico, mecánico y de límite de quemado.

EL SUMINISTRO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

En diciembre de 1964, casi cuatro años antes de la primera criticidad del reactor, firmó Unión Fenosa su primer contrato de combustible con *Westinghouse Electric International Company* (WEICO) y con *Westinghouse Atomic Power Company Of Spain* (WAPCOS), incluyendo el primer núcleo más 2 elementos combustibles de reserva, y 6 recargas de ciclo anual. Posteriormente, en agosto de 1968, tuvo lugar la primera criticidad del reactor, iniciándose el programa de pruebas nucleares.

Por tanto, Westinghouse, como empresa suministradora de la Central Nuclear, bajo la fórmula “llave en mano”, se responsabilizó de la gestión del suministro del primer núcleo, tanto de la fabricación del combustible nuclear (que incluía como innovación tecnológica la incorporación de



Esquema de los elementos combustibles del núcleo del reactor de José Cabrera.

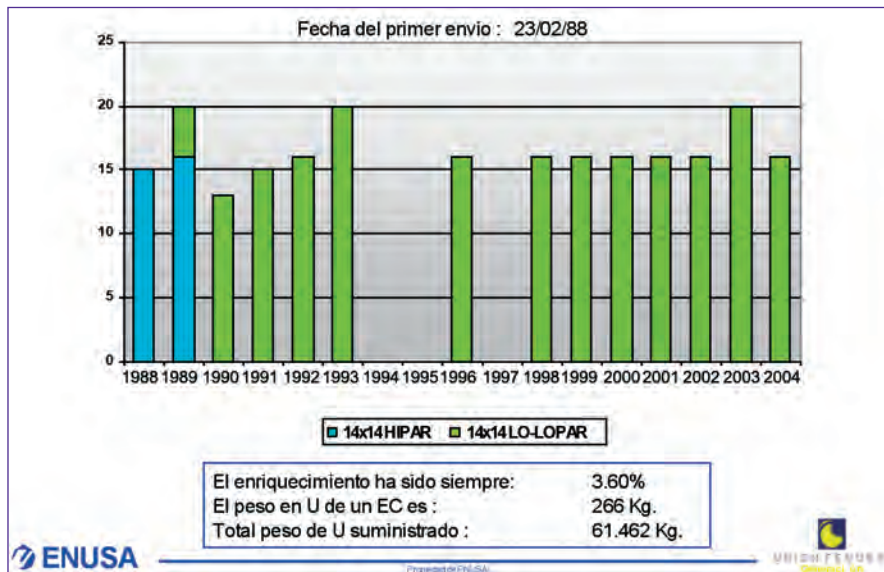


Figura 1. Recargas fabricadas por ENUSA para C.N. José Cabrera.

los nuevos materiales Zr-4 e Inconel-600) como de la documentación soporte de ingeniería para garantizar el licenciamiento y la operación segura del primer ciclo de explotación. Hasta 1979, Westinghouse suministró la ingeniería de los 8 ciclos siguientes, y hasta 1987 la fabricación de las 14 primeras recargas de combustible nuclear 14x14 HIPAR (ciclos 2 a 15),

ENUSA tomó el relevo de Westinghouse y, desde 1980, suministró la ingeniería de los 20 siguientes ciclos de operación (ciclos 10 a 29) y, desde 1988, también se responsabilizó de la fabricación y el transporte de las 14 siguientes recargas de combustible (ciclos 16 a 29), tanto de combustible HIPAR (31 E.C.) como de combustible LOLOPAR (200 E.C.), conforme se indica en la figura 1.

La componente de ingeniería de Westinghouse y ENUSA incluyó el esquema de ciclos de combustible, el informe de diseño nuclear y los potenciales re-diseños de urgencia del núcleo, la evaluación de seguridad de la recarga, y el apoyo al licenciamiento; en tanto que la componente de fabricación incluyó la fabricación y el transporte de las recargas, el suministro de componentes (fuentes primarias y secundarias), la capacidad de respuesta ante las contingencias, el seguimiento de la operación del combustible en el núcleo, y la evaluación de su comportamiento basada en el análisis de mapas de flujo y de medidas de radio-química.

A lo largo del tiempo, Unión Fenosa tuvo que acometer la adaptación de la Central a los nuevos marcos de licenciamiento, lo que dio lugar al re-

análisis de los transitorios y los accidentes base de diseño, así como a la evaluación de seguridad requerida por el cambio del sentido de flujo de by-pass en la vasija y por la operación de núcleos mixtos HIPAR - LOLOPAR.

Con objeto de acercar los procesos de fabricación a los mejores estándares, la fábrica de ENUSA en Juzgado incorporó en sus procesos la metodología de calidad 6 sigma, y se procedió al control por las empresas eléctricas, a través de NOVOTEC, de la calidad del proceso de fabricación. Como resultado se consolidó la calidad y robustez del combustible, garantía de su flexibilidad operativa en el reactor.

En cuanto al suministro de uranio enriquecido, en 1964 Unión Eléctrica Madrileña, predecesora de la actual Unión Fenosa, gestionó con Denison Mines (Australia) el aprovisionamiento de U3O8 y de UF6 natural, y con

JEN-USERDA y JEN-USDOE el suministro de UTS. De esta forma se gestionó el aprovisionamiento de uranio enriquecido para el primer núcleo y las 8 primeras recargas.

En 1972 se constituyó ENUSA que en 1975 pasó a ser la gestora del suministro de uranio enriquecido para la Central, procediendo a su aprovisionamiento para las siguientes 20 recargas (recargas 9 a 28), implicando la adquisición de 805 toneladas de concentrados de uranio en forma de U_3O_8 , la conversión de 740 toneladas de uranio a la forma de UF_6 , y el suministro de 493.000 UTS para enriquecimiento, lo que a precios actuales representaría un valor de 78 M€ (moneda de 2006).

Desde un principio, se le concedió importancia estratégica a la gestión del combustible nuclear, colaborando activamente con el organismo regulador, la Junta de Energía Nuclear, y con el suministrador de combustible nuclear, Westinghouse, en el contexto de un Acuerdo Tripartito orientado a mejorar el conocimiento del combustible en su operación en el reactor, así como a caracterizar el comportamiento y los límites de operación de los nuevos materiales (Zircaloy e Inconel) que Westinghouse incorporó al entonces combustible avanzado HIPAR.

En el contexto de dicho Acuerdo Tripartito, en el que se involucraron WEICO/WAPCOS, USAEC/JEN, y UEM/TECNATOM, se desarrolló un ambicioso programa de I + D sobre combustible nuclear avanzado, con énfasis sobre el comportamiento del Zr-4 y de las barras experimentales de alto enriquecimiento que dieron lugar a alto quemado.

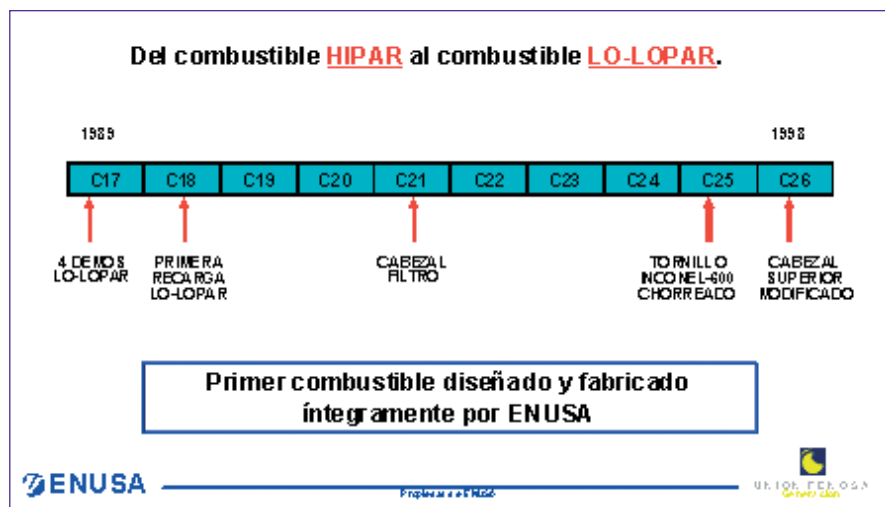


Figura 2. Evolución del producto en C.N. José Cabrera.

Posteriormente, continuando con su estrategia de alianza tecnológica con el suministrador del combustible, Unión Fenosa colaboró activamente con ENUSA, en tareas de aprovisionamiento de uranio enriquecido, de diseño, fabricación y transporte de recargas de combustible, así como en la realización de estudios de ingeniería nuclear y de evaluaciones de seguridad orientadas al licenciamiento. La relación con el suministrador siempre fue de mutua confianza y aunamiento de las capacidades técnicas.

En consecuencia, desde su origen, José Cabrera ha dispuesto del apoyo interno y externo que le ha facilitado el licenciamiento de su operación ante el Departamento de Seguridad Nuclear de la Junta de Energía Nuclear, en su primera fase, y ante el Consejo de Seguridad Nuclear, tras su creación 1980, obteniendo las preceptivas autorizaciones de operación. De esta forma se ha garantizando la operación flexible, fiable, segura y competitiva de la Central Nuclear con un combustible nuclear robusto que ha ido evolucionando a lo largo del tiempo hasta alcanzar los objetivos de calidad exigidos por la reglamentación vigente.

LA ESTRATEGIA DUAL DE INNOVACION Y ESTANDARIZACION

Complementariamente a lo anterior, y con carácter sistemático, Unión Fenosa ha venido impulsando la innovación tecnológica y la optimización técnico - económica aplicada al diseño, la fabricación y la gestión operativa del combustible nuclear, a lo cual siempre han sido receptivos tanto Westinghouse como ENUSA, dando lugar a las sucesivas mejoras incorporadas en el diseño y en los materiales de los elementos combustibles que constituyen las recargas. Como resultado, se ha dispuesto de un combustible nuclear, específico para la Central Nuclear José Cabrera, que además de ser eficiente económicamente, ha resultado ser robusto, flexible y fiable, y por lo tanto seguro, conforme a los requerimientos del explotador del reactor, lo cual ha redundado en la rentabilidad de la explotación global de la Central.

Así, la operación de los 16 primeros ciclos correspondió a estrategias de recarga OUT-IN y combustible

estandarizado 14x14 HIPAR, de diseño Westinghouse, caracterizado por estar fabricadas con Inconel-718 todas las rejillas y con acero inoxidable AISI-304 los tubos guía de las barras de control, así como el tubo de instrumentación. Desde la perspectiva mecánica y estructural, dicho combustible era intrínsecamente muy robusto, si bien las características de alta absorción neutrónica del Inconel-718 y del acero inoxidable AISI-304 penalizaban de forma importante la economía neutrónica y, en consecuencia, la economía de explotación global de la Central, por su impacto en el coste del combustible.

Con objeto de paliar las limitaciones económicas del combustible estándar HIPAR, asociadas al material de sus rejillas (Inconel) y de sus tubos guía y de instrumentación (acero inoxidable), Unión Fenosa y ENUSA iniciaron a finales de los años 80 una iniciativa conjunta y continuada de innovación tecnológica, cargando en el ciclo 17 los cuatro primeros elementos combustibles de demostración 14x14 LOLOPAR, diseñados por ENUSA, caracterizados por estar fabricadas con Inconel-718 sólo las dos rejillas extremas, siendo de Zircaloy-4 las cuatro rejillas intermedias, y por sustituir por Zircaloy-4 el acero inoxidable AISI-304 de los tubos guía de las barras de control y del tubo de instrumentación, estando licenciado el nuevo combustible para operar hasta un límite de 45.000 MWD/TU de quemado medio por elemento.

Este nuevo combustible disponía de cabezal inferior con filtro antipartículas, siendo desmontables tanto el cabezal superior como el inferior a los efectos de facilitar su reparación en caso de fallo mecánico, destacando en él las ventajas asociadas a las innovaciones en el diseño y fabricación del producto, a su seguridad frente a los criterios de licenciamiento, a su fiabilidad ante el riesgo de fallo mecánico, a su flexibilidad operativa y a su rentabilidad económica.

El nuevo combustible LOLOPAR, además de cumplir con los criterios de aceptación mecánicos y estructurales, aportaba robustez a la economía neutrónica del núcleo, por la menor absorción neutrónica del Zircaloy-4 frente al Inconel y al acero, en beneficio de la economía de explotación de la Central por su menor coste de combustible.

Tras operar con éxito su primer ciclo los 4 elementos de demostración del nuevo diseño LOLOPAR, se inició la fase

de explotación de recargas completas, pasando a ser el nuevo diseño 14x14 LOLOPAR un nuevo producto estándar para la gestión de combustible nuclear de la Central Nuclear José Cabrera, que siguió evolucionando en el tiempo, como se indica en la figura 2.

Sin embargo, el cambio del combustible HIPAR al LOLOPAR no fue directo, ya que la existencia de combustible HIPAR, parcialmente quemado, tanto en el reactor como en la piscina de almacenamiento de combustible irradiado, dio lugar a la operación de 7 ciclos de transición con núcleos híbridos "HIPAR-LOLOPAR", hasta alcanzar el quemado de descarga en todo el combustible HIPAR de la Central, iniciándose en el ciclo 24 la operación de núcleos homogéneos "LOLOPAR".

Tras la operación del ciclo 18, con objeto de evitar el riesgo de fallo mecánico como consecuencia de cargas hidráulicas transversales sobre los elementos combustibles de la periferia del núcleo, Unión Fenosa y Westinghouse procedieron a modificar el sentido de flujo del bypass del núcleo (conversión "downflow => "upflow"), con lo que se incrementó la seguridad operacional del combustible frente a potenciales daños.

Por otra parte, en lo que se refiere al diseño nuclear, y en aras a optimizar la economía de la primera parte del ciclo de combustible, los ciclos 19 y siguientes pasaron a operar con diseños de fugas moderadas, en principio, y de bajas fugas radiales, a continuación, sin llegar a incorporar diseños de muy bajas fugas por las limitaciones intrínsecas derivadas del pequeño tamaño relativo del reactor de José Cabrera.

Complementariamente, y para evitar potenciales fallos por "debris", a partir de la recarga 20 (operación del ciclo 21), Unión Fenosa y ENUSA emprendieron una segunda fase conjunta de innovación tecnológica, incorporando al diseño del elemento combustible LOLOPAR un cabezal inferior con características de filtro antipartículas (DFBN). Gracias a él, la operación de todos los ciclos subsiguientes (ciclos 21 a 29) han sido de "fugas cero", es decir, que se han caracterizado por la ausencia total de fallos de combustible, lo cual ha redundado en una mayor calidad de la radioquímica del refrigerante primario, menores dosis al personal de explotación, y menor coste económico del combustible, pasando a consolidarse la integración de

DFBN en el diseño estandarizado del elemento combustible LOLOPAR.

LA CONSOLIDACION DEL COMBUSTIBLE OPTIMIZADO

Tras demostrar su viabilidad como combustible nuclear idóneo para la operación del núcleo de La Central Nuclear José Cabrera, el diseño LOLOPAR-DFBN se consolidó como el combustible óptimo para las recargas de dicha Central, sustituyendo al combustible HIPAR (ver figura 3).

Se destacan del combustible LOLOPAR los siguientes aspectos de su robustez intrínseca:

a) Robustez asociada a las innovaciones en el diseño y fabricación del producto:

- Diseño 100% de ENUSA;
- Rediseño de las rejillas intermedias y cambio del material, sustituyéndose el Inconel-718 por Zircaloy-4;
- Rediseño de los tubos guía y del tubo de instrumentación, y cambio del material, sustituyéndose el acero inoxidable AISI 304 por Zircaloy-4;
- Diseño del cabezal inferior con características de filtro antipartículas;
- Diseño con cabezal superior e inferior desmontables, a efectos de facilitar la reparación en caso de fallo del combustible;
- Chorreado del Inconel-600 del tornillo del resorte del cabezal superior, para garantizar su integridad frente a la corrosión bajo tensión intergranular.

b) Robustez asociada a la seguridad del producto:

- Programa de demostración del producto básico LOLOPAR: 4 ciclos de caracterización en operación continua y 1 ciclo de caracterización en operación diferida (quemado medio alcanzado: 37.000 MWD/TU);
- Producto licenciado ante el Consejo de Seguridad Nuclear.
- Quemado medio autorizado por EC: hasta 45.000 MWD/TU.

c) Robustez asociada a la fiabilidad del producto:

- Cero fallos de combustible desde la incorporación del cabezal filtro (DFBN);
- Inexistencia de problemas de enganche de rejillas en la carga y descarga del núcleo;
- Garantía probada del tornillo del muelle en el cabezal superior (prueba con gancho dinamométrico), a pesar de

ser de Inconel-600, por la robustez de su diseño y de las condiciones operativas (química y temperatura del agua);

- 7 ciclos de transición HIPAR – LOLOPAR sin problemas de compatibilidad mecánica, termohidráulica o nuclear.

d) Robustez asociada a la flexibilidad del producto:

- Mayor quemado autorizado de descarga:

- HIPAR: 40.000 MWD/TU,
- LOLOPAR: 45.000 MWD/TU.

- Mayor quemado real de descarga para igual enriquecimiento:

- HIPAR (3.6% ²³⁵U):
34.000 MWD/TU,
- LOLOPAR (3.6% ²³⁵U):
40.000 MWD/TU.

- Versatilidad en la gestión del combustible "out-of-core":

- 4 ciclos de operación (ciclos 17, 18, 19 y 20) con carga de combustible básico LOLOPAR y núcleos híbridos HIPAR / LOLOPAR;

- 2 ciclos de operación (ciclos 21 y 22) con carga de combustible avanzado LOLOPAR-DFBN y núcleos híbridos HIPAR / LOLOPAR / LOLOPAR-DFBN;

- 1 ciclo de operación (ciclo 23) con carga de combustible avanzado LOLOPAR-DFBN y núcleo mixto HIPAR / LOLOPAR-DFBN;

- 4 ciclos de operación (ciclos 24, 25, 26 y 29) con carga de combustible avanzado LOLOPAR-DFBN y núcleos mixtos LOLOPAR / LOLOPAR-DFBN;

- 2 ciclos de operación (ciclos 27 y 28) con núcleos homogéneos cargados con combustible LOLOPAR-DFBN.

- Capacidad para abordar la estandarización del diseño nuclear: operación consolidada de ciclos anuales de equilibrio con esquemas de bajas fugas radiales (ciclos 17 a 27, excepto el 21, que fue hiperanual);

- Versatilidad para acometer diseños nucleares atípicos: operación de un ciclo hiperanual de 15 meses (ciclo 21), con esquema de bajas fugas radiales;

- Capacidad para abordar la desestandarización del diseño nuclear: operación atípica de dos últimos ciclos hiperanuales con esquemas de bajas fugas radiales, para alcanzar la fecha de cierre impuesta por la Administración (ciclos 28 y 29);

- Reparabilidad con volteo o sin volteo, desmontando el cabezal inferior o el superior, respectivamente.

e) Robustez asociada a la economía del producto:

- Mismo precio que HIPAR (a partir de recarga 19), con mejor economía neutrónica y, por tanto, mayor quemado de descarga para igual enriquecimiento, reduciendo el coste del combustible en explotación

De la buena experiencia operativa se derivó la consolidación de las innovaciones tecnológicas aportadas en el diseño del nuevo elemento combustible, de forma que el diseño del producto 14x14 LOLOPAR-DFBN, que supuso una innovación de ENUSA para hacer frente a las limitaciones económicas intrínsecas del combustible HIPAR, quedó caracterizado como un nuevo estándar de combustible robusto para la Central Nuclear José Cabrera, garantizando una operación

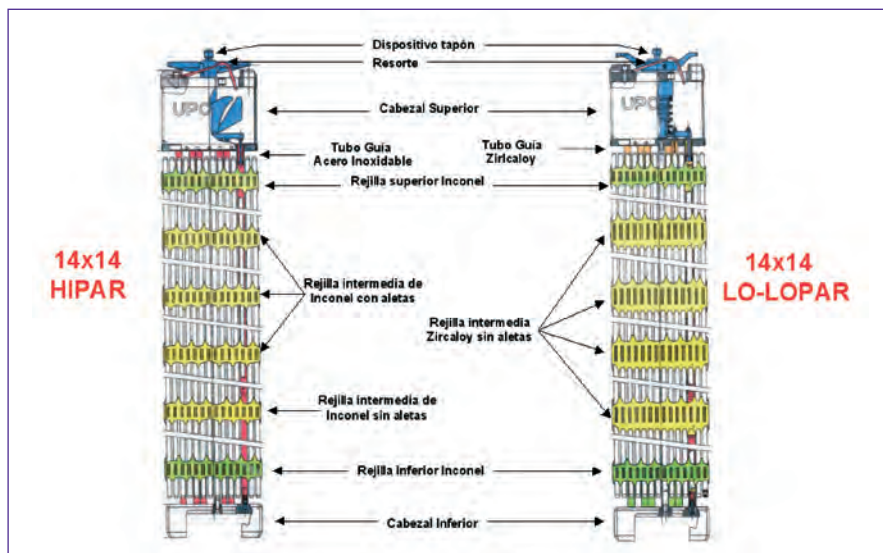


Figura 3. Esquemas de los elementos combustibles de C.N. José Cabrera.

optimizada en cuanto a seguridad, fiabilidad, flexibilidad y rentabilidad económica, características todas ellas requeridas a partir de 1998 por el nuevo marco de desregulación y liberalización de la generación de electricidad en España.

La estandarización de la ingeniería y la fabricación del combustible nuclear se compaginó con la innovación para garantizar flexibilidad en el diseño del núcleo y para optimizar tanto el coste del combustible (incluida la 2ª parte del ciclo) como el coste de O/M frente a condiciones específicas cambiantes a lo largo de la vida de la planta.

En consecuencia, se puede concluir que la innovación se empleó como una "herramienta de mejora", impulsora de la adaptación de avances tecnológicos, en tanto que la estandarización se empleó como una "herramienta de consolidación", de forma que el binomio "innovación-estandarización", más allá que la suma de dos herramientas, se consolidó como la "estrategia de competitividad" de Unión Fenosa respecto al combustible nuclear.

EL CICLO DE EQUILIBRIO

Tras la típica gran longitud del primer ciclo (>500 DEPP) se inició la transición hacia el ciclo de equilibrio anual (330 DEPP), en cuyo entorno se han mantenido todos los ciclos (ver en la figura adjunta la duración de los ciclos), excepto el ciclo 21 (>400 DEPP), que se planificó como hiperanual por razones de explotación, y los tres últimos ciclos (ciclos 27, 28 y 29) que se planificaron como hiperanuales para alcanzar la fecha de cierre. El ciclo 21, que cargó 20 elementos combustibles frescos del 3,60%, contó con dos periodos de operación diferenciados:

a) el primer periodo se operó a carga parcial para poder cumplir con las restricciones impuestas por la temperatura del río Tajo; y

b) en el segundo periodo, tras la conexión de las torres de refrigeración de tiro forzado al sistema de agua de circulación, en abril de 1996, se prosiguió con la operación a plena carga.

Por su parte, los ciclos 27, 28 y 29 cargaron 16, 20 y 16 E.C. frescos del 3,60%, respectivamente, y operaron con un alargamiento de ajuste al final de su vida nominal.

En cuanto a la concentración de boro de equilibrio (ver figura 5), y te-

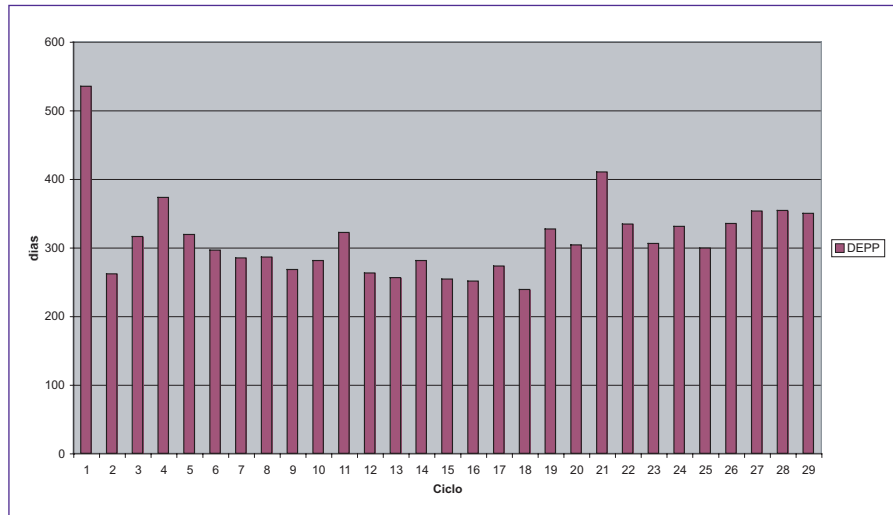


Figura 4. Días equivalentes a plena potencia.

niendo en cuenta que en ningún ciclo de operación se emplearon venenos quemables, cabe destacar la mayor concentración de boro al inicio de los ciclos 1 y 21, debido a que fueron los de mayor reactividad en su arranque, por ser los de mayor longitud.

Por otra parte, para reducir riesgos técnicos y económicos, y eliminar incertidumbres en la explotación, se precisó de una gestión del combustible fiable y madura, basada en ciclos de operación seguros y económicos, por lo que la estandarización del ciclo de combustible nuclear destacó como la mejor manera de mejorar los índices de calidad durante la operación de la Central cuando su fin de vida estaba lejos.

La estandarización del ciclo de combustible nuclear se basó en el siguiente conjunto de características:

- Longitud constante del ciclo de equilibrio,

- Recargas de combustible con igual tamaño y enriquecimiento,

- Esquemas de carga del núcleo de tipo clónico, lo que simplificó el diseño, el licenciamiento, la fabricación y la operación;

- Consolidación de mejoras en seguridad y fiabilidad, basándose en la experiencia operativa previa; y

- Estabilidad de la componente económica del combustible en el coste unitario de la electricidad de origen nuclear.

La estandarización del ciclo de operación y el buen comportamiento del producto y de los diseños, se puede observar gráficamente en la evolución de los quemados máximos alcanzados por ciclo.

En cuanto a la seguridad del núcleo, los factores de vigilancia y seguimiento han evolucionado con las mejoras en el diseño del núcleo y de los elementos combustibles. Así, el factor de canal caliente nuclear - relación entre

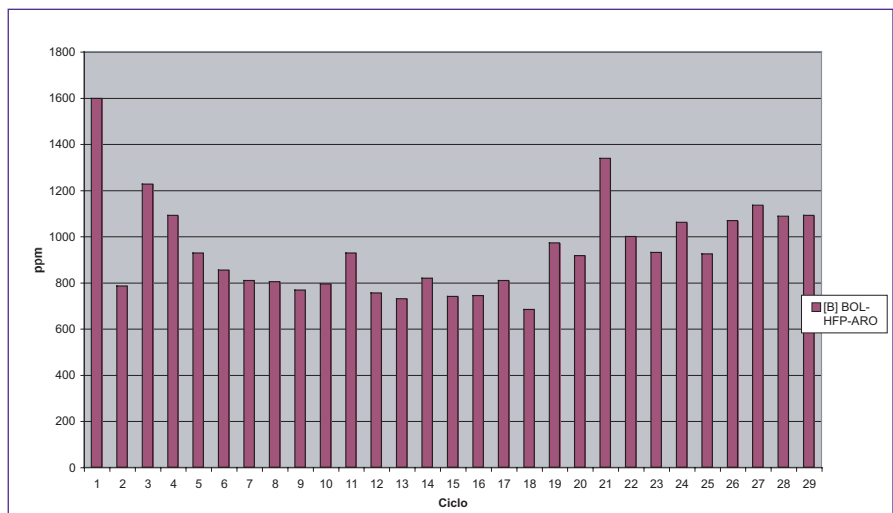


Figura 5. Concentración de boro a BOL-HFP-ARO.

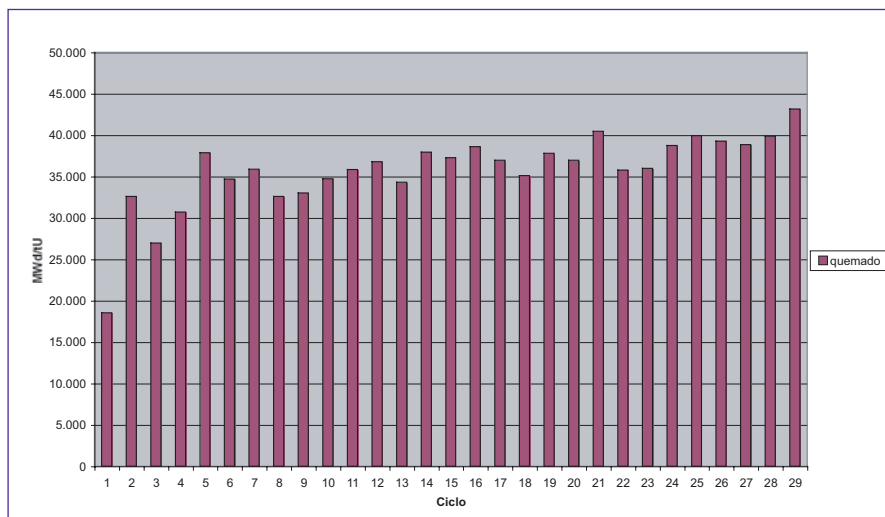


Figura 6. Quemado máximo alcanzado por el elemento más quemado.

la máxima densidad lineal de potencia en el núcleo y la densidad lineal de potencia media - ha evolucionado desde el valor de 1.80 hasta 2.39, en tanto que el factor de canal caliente entálpico - factor de vigilancia de la distribución radial integral de potencia en el núcleo - lo ha hecho desde el valor de 1.28 hasta 1.67, de forma que el efecto de la evolución de ambos factores de pico ha permitido operar ciclos más reactivos y de mayor duración.

La vigilancia del reactor a través de los factores de canal caliente ha tenido por objeto: a) garantizar que en todos los puntos del reactor se estaba suficientemente alejado del límite de ebullición nucleada; b) que en caso de accidente de pérdida de refrigerante primario no se alcanzase en ningún punto la temperatura de fusión de la vaina; y c) que el combustible se estuviese quemando de manera uniforme.

Cabe destacar que se han realizado pruebas y evaluaciones específicas del comportamiento estructural del combustible respecto a problemáticas aparecidas en otras centrales PWR, consistentes en:

- a) Modificación de elementos para evitar daño por "baffle jetting" (introducción de barras de acero en posiciones esquinadas);
- b) Verificación de la insertabilidad de las barras de control;
- c) Caracterización del crecimiento de conjunto combustible, y del crecimiento de barras de combustible;
- d) Análisis de los efectos resultantes de la corrosión de las vainas;
- e) Sensibilización de las soldaduras de los cabezales por IGSCC (corrosión bajo tensión); y
- f) Comprobación de la fuerza de los muelles del cabezal superior.

Finalmente, en lo que respecta a las pruebas nucleares de inicio de cada ciclo, se diseñó con Westinghouse un procedimiento de optimización para que su realización impactase al mínimo en el arranque, generando la mínima indisponibilidad por "camino crítico" (ver figura 7).

LA TRANSICION AL CIERRE DE LA CENTRAL

En Octubre de 2002 se publicó la Orden Ministerial que limitaba la operación comercial de la Central Nuclear José Cabrera a la fecha del 30 de abril de 2006, fecha que pasó a definir el final de la operación comercial del reactor. Por tratarse de un cierre no previsto por Unión Fenosa, como empresa explotadora, que había planificado la operación nominal al menos hasta el año 2008, esta decisión de la Administración obligó a cuestionarse el programa de explotación de la Central, y a proceder a su revisión, lo cual obligó, a su vez, a replantearse la gestión del combustible. Como consecuencia de ello, se alteró el esquema de ciclos, lo que condicionó los programas de aprovisionamiento de uranio enriquecido y de fabricación de las recargas.

En efecto, la estrategia de gestión del combustible con ciclo anual, correspondiendo a once meses de operación a potencia y un mes de parada de recarga, con la que venía operando la Central, con arranques de ciclo en el mes de octubre, como fue el caso de octubre/2002, no resultaba compatible con la planificación de una parada definitiva en el mes de abril de 2006, a menos que se renunciase a los últimos seis meses de operación, tras

la finalización del ciclo 29, o a que se iniciase la operación de un ciclo 30 que se detuviese a su mitad, incurriendo en ambos casos en significativas penalizaciones económicas por lucro cesante (pérdida de producción) o por daño emergente (excedente de combustible), respectivamente.

Dado que ya se encontraba cargado en el reactor el núcleo del ciclo 27, que arrancaba en octubre de 2002, con carácter inmediato a la publicación de la Orden Ministerial, teniendo prevista su parada de recarga para octubre de 2003, los grados de libertad en la optimización de la transición al cierre se limitaban a la gestión de la operación en el periodo de dos años y medio comprendido entre octubre de 2003 y abril de 2006.

Con objeto de identificar y orientar la gestión del combustible óptima en la transición desde el ciclo de equilibrio hasta el cierre de la Central, y establecer la estrategia requerida de aprovisionamiento de uranio enriquecido y de fabricación de recargas de combustible, Unión Fenosa realizó un estudio de optimización técnico-económica de los ciclos de transición al cierre, que se complementó con otros estudios realizados por ENUSA y SOLUZIONA. Dicha estrategia de gestión de combustible, que consideraba como un coste hundido el valor energético-económico existente al alcanzarse la condición de EOL del último núcleo, se basó en minimizar el coste del combustible durante la transición al cierre, simultáneamente a minimizar el valor económico contable del combustible en el núcleo residual. Como consecuencia, se determinó la estrategia óptima de gestión de combustible a seguir, identificando la provisión anual de fondos requerida, durante los ejercicios previos al cierre, para dotar de unas reservas contables que compensasen el valor remanente de las existencias de combustible al cierre.

Del estudio se concluyó la longitud óptima, con alargamiento, del ciclo 27, así como la planificación de las recargas en los dos ciclos de transición al cierre -ciclos 28 y 29-, identificando tanto el número de elementos combustibles frescos de cada una de ellas, y su enriquecimiento, como la longitud nominal y de alargamiento de dichos ciclos de transición.

Para garantizar la producción hasta la fecha de cierre se consideraron diversas opciones, entre las que cabe

citar como referentes básicas las dos siguientes:

a) operación de dos ciclos anuales y un ciclo de seis meses, afrontando el coste de dos Recargas y perdiendo dos meses de producción; y

b) operación de dos ciclos de quince meses, con una parada de recarga entre ellos en la que se perdería un mes de producción.

La segunda opción, sin duda la más atractiva económicamente, implicaba afrontar la desestandarización del diseño nuclear, abordando dos ciclos hiperanuales con mayor reactividad en su arranque. En lo que se refería al comportamiento del combustible como producto en tales ciclos, la excelente experiencia operativa acumulada por el combustible 14x14 LOLOPAR-DFBN, de diseño robusto y probada fiabilidad operativa, permitía augurar un buen comportamiento al someterle a condiciones demandantes de una mayor flexibilidad operativa.

El diseño de los dos ciclos de transición al cierre siguió un doble proceso de optimización:

a) técnica, orientada a la definición del tamaño y enriquecimiento de sus dos recargas atípicas, y al control del máximo quemado de descarga, parámetro determinante del tiempo de enfriamiento del combustible tras el cierre, que condicionaría la descarga del combustible gastado a los contenedores de almacenamiento en seco;

b) económica, orientada a la Cuenta de Resultados, haciendo máximo el resultado de considerar los conceptos

de ingresos por venta de electricidad, gastos de Recargas, y gastos por consumo de combustible; y al Balance de la empresa, haciendo mínimo el valor económico del inventario de existencias de combustible nuclear, a compensar con las provisiones de fondos de los años previos junto a la liquidación final al cierre.

La experiencia de los tres últimos ciclos de operación, de similar longitud, que han permitido a Unión Fenosa alcanzar la fecha de cierre con mínimo daño emergente (mínimas existencias de combustible no quemado al cierre) y mínimo lucro cesante (mínimas pérdidas en generación de electricidad en la transición al cierre), ha demostrado el acierto en la gestión del combustible para optimizar la transición al cierre de la Central.

LA GESTIÓN DEL COMBUSTIBLE IRRADIADO

La gestión del combustible irradiado de la Central se ha ido modificando a lo largo de su vida.

Inicialmente, los diseños originales contemplaban la salida del combustible para su reprocesamiento. Entre 1973 y 1982, se enviaron a las instalaciones de BNFL en Windscale (Reino Unido), 16 envíos, cada uno de ellos con 1, 2 ó 3 contenedores que almacenaban 7 elementos combustibles refrigerados por agua (ver figura 8). Estos contenedores se transportaban por carretera hasta Bilbao o Santander, de donde salían embarcados con destino a Inglaterra. En total, se enviaron por este procedimiento 216 elementos.

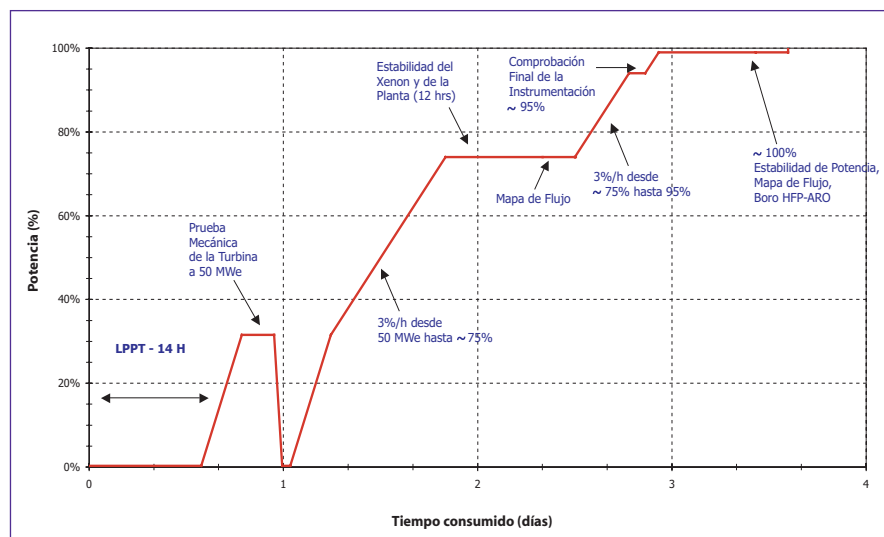


Figura 7. Programa mejorado de arranque.

Con objeto de mantener la capacidad suficiente de la piscina de combustible gastado, se realizaron dos compactaciones (*re-racking*) de los bastidores en los que se almacenan los elementos combustibles en la piscina. El primero se realizó en 1981, y el último terminó en 1997.

Con su configuración actual, la piscina de José Cabrera tiene capacidad para alojar hasta 548 elementos, disponiendo de 142 posiciones en las que se puede almacenar cualquier elemento con independencia de su quemado. En las 406 posiciones restantes se almacenan aquellos elementos parcialmente irradiados que cumplan un requisito de quemado mínimo. Después de terminada la vida operativa de la Central, hay 377 elementos combustibles en la piscina, lo que representa un 69% de ocupación de la misma.

Con objeto de identificar el estado mecánico del combustible irradiado, se ha realizado una caracterización completa del inventario total de combustible irradiado para su posterior almacenamiento en seco. En esta caracterización, además del combustible, se han incluido los aditamentos (mezcladores de flujo, dispositivos tapón, barras de control, ...) que irán finalmente solidarios a los elementos combustibles en los contenedores de almacenamiento en seco. Para el análisis de caracterización se ha seguido un proceso sistemático que incluye el análisis de fugas y el análisis de integridad estructural del combustible. Estos análisis consideran toda la información disponible del combustible, incluyendo los aspectos siguientes

- Entorno de operación,
- Diseño mecánico y nuclear,
- Seguimiento radioquímico del refrigerante primario,
- Seguimiento nuclear con los datos de mapas de flujo y del programa de reactividad,
- Análisis de experiencia operativa interna del comportamiento de cada ciclo por parte del fabricante del combustible y diseñador del núcleo,
- Análisis de experiencias operativas externas para la aplicabilidad a los diseños propios del combustible de José Cabrera,
- Registros de inspecciones y pruebas de fugas,
- Inspecciones visuales,
- Análisis de datos y tendencias a partir de los registros de las pruebas de medida de fuerza de arrastre y



Figura 8. Contenedor antiguo de combustible gastado (en agua).

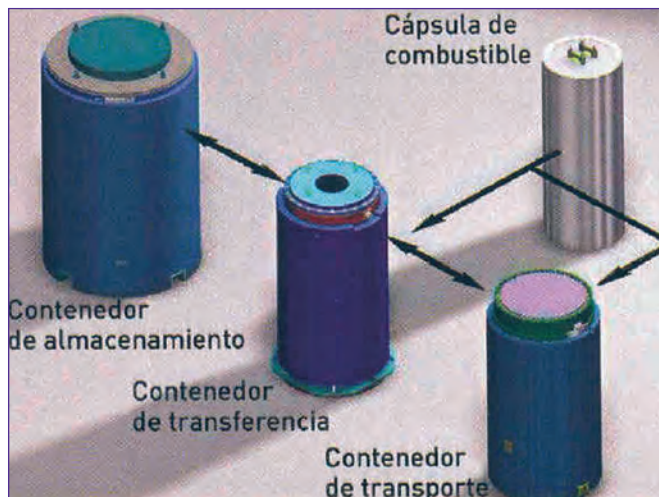


Figura 9. Esquema básico de funcionamiento del sistema HI-STORM 100Z.

tiempos de caída de barras de control, y

- Experiencia propia en el movimiento y manejo del combustible irradiado.

La gestión del combustible irradiado de José Cabrera en los próximos años está orientada a su almacenamiento en seco para poder realizar el desmantelamiento completo de la instalación en las fechas previstas. Para ello, se ha seleccionado un sistema de almacenamiento en seco de pa-

tente norteamericana, Holtec, de amplia experiencia anterior para este tipo de aplicaciones. El sistema es el denominado HI-STORM 100Z (una adaptación de su diseño genérico a las características especiales del combustible de José Cabrera) cuyo diseño ha sido sometido por ENRESA al proceso de licenciamiento reglamentario y cuyo esquema básico de funcionamiento se presenta en la figura adjunta.

Adicionalmente a las actividades propias del almacenamiento, la planta ha abordado y está realizando otras necesarias para la adecuada gestión del combustible irradiado:

1. Modificaciones en la piscina para mejorar la fiabilidad de la refrigeración del combustible bajo agua, así como el desarrollo de programas de mantenimiento y vigilancia de los sistemas, estructuras y componentes de seguridad e importantes para la condición de parada en la fase previa al desmantelamiento de la central.

2. Mejoras de la grúa pórtico del recinto de contención para garantizar su cumplimiento con el "criterio de

fallo único". Estas modificaciones garantizarán la seguridad del movimiento de cargas pesadas en la piscina.

3. Limpieza y acondicionamiento del pocete de la piscina, para conseguir una superficie adecuada, que permita realizar la carga del combustible en la cápsula del contenedor de almacenamiento en seco.

4. Realización de las interfases para las maniobras de carga, secado y manejo de los contenedores de almacenamiento en seco en las instalaciones interiores de la central.

Todas estas actividades y la construcción prevista de las estructuras de almacenamiento en la propia Central, se han realizado o se realizarán próximamente.

CONCLUSIONES

Adicionalmente a las conclusiones parciales expuestas con anterioridad, del balance histórico de la gestión del combustible de la Central Nuclear José Cabrera se puede extraer la conclusión principal de que la estrategia dual de innovación y estandarización seguida, que consolidó en un diseño optimizado de elemento combustible 14x14 LOLOPAR-DFBN, junto a la prudencia nuclear de velar por la seguridad del combustible, le ha reportado a UFG la satisfacción tecnológica y medioambiental de operar dicha instalación con "fugas cero" durante sus últimos diez ciclos de vida, lo cual ha redundado en la excelencia de la explotación global de la Central y en la rentabilidad económica de su generación de electricidad.

Con respecto al desmantelamiento de la Central, Unión Fenosa mantiene planes coordinados con ENRESA para la gestión del combustible irradiado almacenado en la piscina de combustible.



Luis Rebollo, Jefe de Aprovisionamiento y Gestión del Combustible Nuclear, Dirección de Combustibles, Unión Fenosa Generación, S.A.

Jorge Benavides, Jefe de Ingeniería de Producción de C. N. José Cabrera, Dirección de Generación Nuclear, Unión Fenosa Generación, S.A. y actualmente pertenece al Departamento de Combustible Nuclear de la A.I.E. Trillo-Almaraz

Julio Blanco, Coordinador de Generación Nuclear y Jefe de Soporte Técnico de José Cabrera, Dirección de Generación Nuclear, Unión Fenosa Generación S.A.