

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{b}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) - \nabla \cdot k \nabla T = q'''(\mathbf{r}, t)$$

$$\Delta U = Q - W$$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \phi}{\partial t} - \nabla \cdot D \nabla \phi + \Sigma_a \phi(\mathbf{r}, t) = \nu \Sigma_f \phi$$

# LA INGENIERÍA DE RECARGAS Y SERVICIOS DE ENUSA

J. Riverola

El suministro de combustible nuclear requiere un importante soporte en disciplinas tecnológicas como diseño mecánico, termomecánico, nuclear y termohidráulico. En coordinación con las demás organizaciones de la fábrica de elementos combustibles de Juzbado, la Ingeniería de Operaciones define los elementos combustibles, su posicionamiento óptimo en el núcleo, justifica a priori el comportamiento durante la irradiación y verifica los aspectos relacionados con la seguridad nuclear, tanto en operación normal como en situaciones accidentales hipotéticas. Además, realiza otras tareas complementarias de elevado interés táctico y estratégico relacionado con la gestión del combustible o con el mantenimiento del análisis de seguridad de referencia de las centrales nucleares.

*The supply of nuclear fuel requires a significant support in technological disciplines such as mechanical, thermomechanical, nuclear, and thermohydraulic design. In coordination with other organizations of the Juzbado Factory, the Fuel Operations Engineering department performs the definition of the fuel elements, the optimum positioning in the reactor core, the justification of the behavior in advance to irradiation and verifies aspects of nuclear safety, both in normal operation and in hypothetical accidental situations. It also accomplishes other tasks of great tactical and strategic interest related to fuel management or maintenance of the reference safety analysis of nuclear power plants.*



**JAVIER RIVEROLA GURRUCHAGA**

Jefe de Ingeniería de Operaciones de Combustible

ENUSA INDUSTRIAS AVANZADAS, S.A.

Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona, máster en Ingeniería Nuclear por la University of Florida, EE.UU. Desde su incorporación a Enusa en 1989 ha ocupado responsabilidades técnicas y de gestión en las áreas de diseño nuclear, termohidráulica y seguridad de reactores PWR y BWR.

## INTRODUCCIÓN

La Ingeniería de Operaciones de Combustible depende de la Dirección de Operaciones de Combustible Nuclear de Enusa, y en coordinación con las demás Organizaciones de la Fábrica de Elementos Combustibles de Juzbado, está integrada en todas las fases del proceso productivo.

Con un alcance que depende de cada cliente, en su máxima implicación es responsable de:

- definir los elementos combustibles (diseño mecánico, enriquecimiento, y disposición de venenos consumibles) y generar la lista de materiales para su fabricación,
- diseñar la composición de los núcleos de los reactores para satisfacer las expectativas energéticas y de seguridad de cada cliente y predecir su comportamiento durante la irradiación y,
- realizar el análisis de seguridad de la recarga.

Además, realiza un seguimiento continuo de la evolución del núcleo de cada recarga, desde su puesta en marcha o arranque de ciclo, hasta su terminación y descarga a piscina. Este proceso requiere una alta interacción con los diferentes equipos de trabajo de la Fábrica de Juzbado como se indica más adelante.

La Ingeniería de Operaciones, realiza también muchas otras actividades relacionadas con otras áreas de del ciclo de combustible, bien como ejecutor principal del licenciamiento y mantenimiento del análisis de seguridad de referencia de algunas centrales nucleares, o bien colaborando con otras organizaciones y empresas dentro de proyectos de gran alcance que implican modificaciones ocasionales de diseño tales como sustitución de generadores de vapor o incrementos de potencia tipo MUR o SPU hasta un 8 % sobre la nominal.

Este artículo se centra en las actividades de diseño de recargas, viendo las diferentes etapas del proceso que se realizan de manera autónoma o las que derivan en una necesaria interacción con la fábrica.

## UNA INGENIERÍA MADURA EN CONSTANTE EVOLUCIÓN

Desde la primera recarga diseñada para una central española en julio de 1980 se han diseñado casi 170 recargas completas para reactores españoles y participado en aproximadamente una centena de verificaciones y diseños de otros reactores europeos, con tecnologías PWR y BWR. Actualmente se están editando cada año cerca de 50 informes principales (ITEC) y 1.100 informes y notas técnicas internas y externas de diversa índole. Y esto solamente en el ámbito de recargas; la experiencia acumulada es notable.

A través de sus acuerdos de licencia, Enusa dispone de metodologías de diseño de recargas con patente de Westinghouse para reactores de agua a presión con combustible MAEF y de General Electric GNF/GEH para reactores de agua en ebullición con combustible GE14 y GNF2. Estas metodologías obedecen a filosofías de diseño de elementos combustibles considerablemente diferentes que se abordan con procesos analíticos muy específicos lo que requiere un esfuerzo notable de mentalización y de diferenciación tecnológica, pero que se ha abordado en la ingeniería de Enusa con naturalidad y éxito reconocido por nuestros clientes.

Como otras organizaciones de Enusa, la Ingeniería de Operaciones ejerce sus actividades con un alto compromiso con la seguridad, calidad y satisfacción de las necesidades de los clientes. Ello se realiza de acuerdo a procedimientos de diseño riguro-

sos y con estándares de calidad muy exigentes y por ello se han implementado métodos de gestión de la mejora continua como el 6-sigma de Motorola y General Electric y, últimamente, el *Lean* y el *Management Control Reporting System*. Esto es posible gracias al esfuerzo constante en formación de los ingenieros de diseño participando en actividades tuteladas en la empresa o en las sedes de los socios tecnológicos o con asistencia de personal formador externo, técnicas de transmisión del conocimiento tácito e incluso mediante la reciente utilización de una plataforma *e-learning*.

Las actividades de ingeniería están sometidas a una verificación adicional periódica por parte de nuestros clientes y a la inspección por parte de los diferentes organismos reguladores de España y los países europeos de las novedades y modificaciones presentadas

## CUATRO GRUPOS DE DISEÑO BIEN ARMONIZADOS CON LA FABRICACIÓN

En la Ingeniería de Operaciones de Combustible hay cuatro grupos de diseño que dan respuesta a las necesidades de diseño y licenciamiento de los conjuntos combustibles, componentes del núcleo, esquemas de recarga nucleares y servicios asociados.

El grupo de **Diseño de Producto** tiene encomendada la definición del producto PWR y BWR a fabricar en lo que respecta a planos, especificaciones y listas de materiales. Esta información se genera de manera simultánea en la primera etapa de diseño de una recarga, y alimenta a todo el proceso de fabricación de elementos combustibles en la Fábrica de Juzbado una vez incorporada en la base de datos de diseño ALMA de la que se alimenta la base de datos de fabricación Medea. También realiza la verificación de que

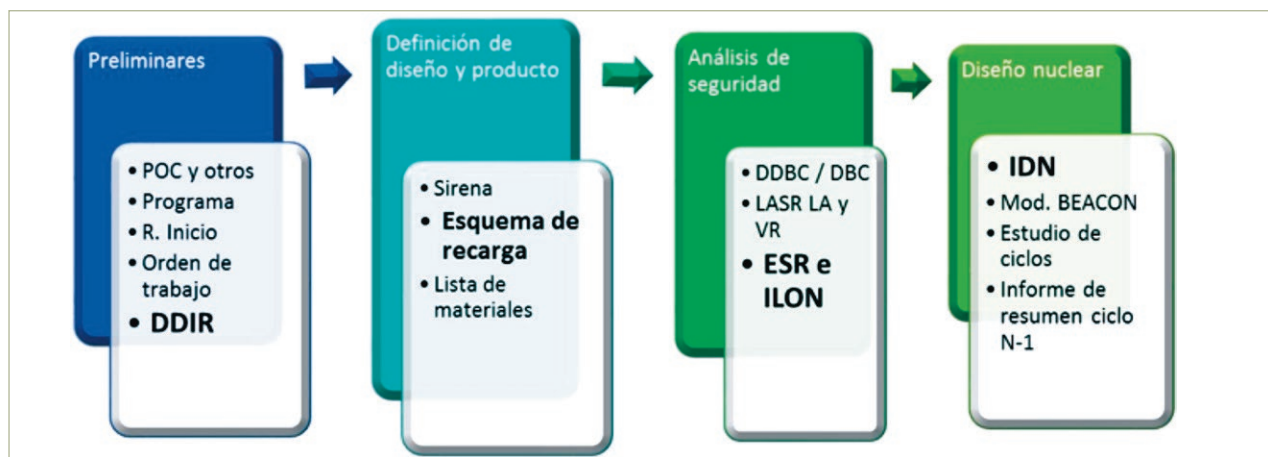


Figura 1. Hitos principales del diseño de una recarga PWR.

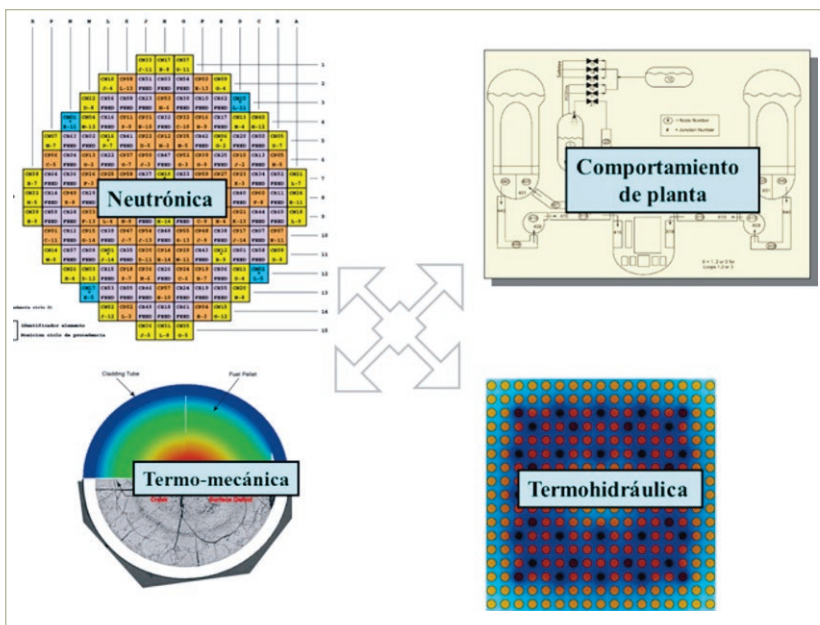


Figura 2. El diseño de recargas es multidisciplinar.

el combustible nuevo, va a cumplir todos los criterios de diseño termomecánicos y mecánicos durante la irradiación en el núcleo hasta su descarga.

Así, es necesario comprobar con cálculos predictivos que la corrosión e hidruración de la vaina, la presión interna y la tensión de la vaina están dentro de determinados límites que garantizan la fiabilidad y seguridad del combustible. Además hay que contemplar aspectos como la deformación de vaina, fatiga y aplastamiento, crecimiento, colapso y temperaturas sumamente variables dentro la barra y a lo largo de su irradiación. Desde el punto de vista mecánico, también hay que refrendar un buen comportamiento frente a la abrasión por rozamiento o vibración entre vaina y rejilla y entre tubo-guía y barra de control, la compatibilidad geométrica con los elementos residentes y entre placas del núcleo, así como la integridad durante accidentes. Se utilizan los códigos de análisis dinámico del núcleo WEGAP, y de análisis termomecánico de barra PAD y TREQ.

Este grupo también da soporte a la fábrica en lo relativo a cualificaciones de proceso y evaluación de incidencias de fabricación garantizando la funcionalidad y el cumplimiento de los criterios mecánicos y termomecánicos. Adicionalmente, miembros de este grupo coordinan y participan activamente en comités estratégicos y de seguimiento de aspectos de diseño tanto en el ámbito de Westinghouse como de General Electric.

El grupo de **Diseño Nuclear** juega un papel muy relevante en todo el proceso de diseño, licenciamiento y seguimiento de una recarga PWR para los reactores españoles de su responsabilidad con alcance total, aproximadamente un hombre-año dedicado en exclusiva a cada recarga.

Partiendo de los requisitos contractuales y específicos del cliente para la recarga recogidos en el *Documento de Datos de Ingeniería de la Recarga* (DDIR), determina y propone varios esquemas de recarga alternativos. Cada esquema procede de un ejercicio exhaustivo de maximización de energía entregada, sujeto a restricciones de índole nuclear, termomecánica y térmica en condiciones de operación normal y accidental. Esta labor requiere la aplicación de reglas heurísticas basadas en la experiencia, así como un alto esfuerzo analítico de modelización con complejos códigos de diseño. Una vez el cliente ha seleccionado el *Esquema de recarga* más idóneo, en coordinación con los otros grupos de diseño, el diseñador nuclear procede a la comprobación sistemática de que el combustible del esquema seleccionado cumple todos los límites nucleares en lo que respecta a distribuciones de potencia axial y radial, reactividad local y global y comportamiento cinético del núcleo, en condiciones de operación normal y en condiciones accidentales. Esta información es determinante y es entrada necesaria para poder evaluar la seguridad de la recarga por el grupo de Análisis de Seguridad. Al menos un mes antes del arranque de la central

se emite el *Informe de Diseño Nuclear* (IDN), compendio detallado de las características del núcleo para el uso por el operador a lo largo del ciclo.

El soporte durante la operación comienza ya desde las mismas pruebas físicas de arranque de la cada recarga, con asistencia presencial o remota. Finalmente, asociado a estos trabajos, se editan otros informes internos y externos que facilitan la monitorización y seguimiento del núcleo.

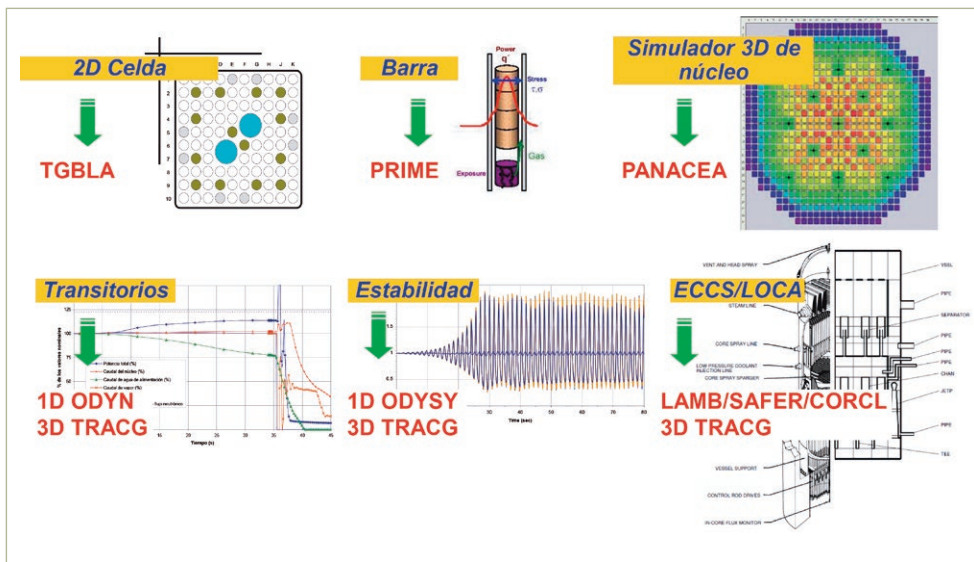
Además, este grupo realiza verificaciones y servicios de alcance parcial para reactores europeos en Bélgica (Doel4 y Tihange3), y en Francia (10 unidades de 900 MWe y 1.300 MWe) dentro del *European Fuel Group* (EFG) en estrecha colaboración con Westinghouse.

La metodología base para todas estas actividades se realiza bajo licencia de códigos y procedimientos de Westinghouse, con el soporte interno del grupo de Tecnología de Combustible Nuclear de Enusa. Los códigos de diseño fundamentales son la serie ALPHA/PHOENIX/ANC, aunque se utilizan muchos otros.

El grupo de **Diseño Termohidráulico y Análisis de Seguridad**, vela por el cumplimiento de la envoltura de seguridad definida por el Análisis de Seguridad de Referencia de cada central nuclear PWR. Así, en cada recarga procede a la comprobación de que el núcleo diseñado no compromete la integridad de las diferentes barreras que contienen a los productos de fisión, a saber la propia pastilla, la vaina, la envoltura de presión y la propia contención.

Con cálculos y verificaciones sistemáticas comprueba el conservadurismo utilizado en el análisis de accidentes de distribuciones de potencia axiales y radiales, ecuaciones de protección del núcleo, valores envolventes de reactividad, características cinéticas, adecuaciones de sistemas, etc., en operación normal y en condiciones accidentales. En las ocasiones excepcionalmente excepcionales en las que se supera alguno de los límites hipótesis o establecidos para el análisis de seguridad, el analista de seguridad evalúa la posible compensación, o establece una penalización cautelar a los márgenes térmicos de la central, asegurándose de que no se violan los criterios de seguridad establecidos por el organismo regulador.

Adicionalmente, ante cambios importantes en la central (subidas de potencia, cambio de combustible o cambios estructurales...), evalúa el impacto de estos cambios mediante



**Figura 3.** Variedad de servicios BWR para la operación segura y económica.

análisis de transitorios con códigos de planta y de núcleo y así determina la evolución global y local de cada uno de los parámetros importantes para la seguridad establecidos en la regulación tales como el coeficiente del límite de ebullición nucleada (CLEN), la presión del sistema, las temperaturas en vaina y combustible, nivel transitorio en el presionador, número de barras falladas, masas y energías asociadas a dosis, refrigeración a corto y largo plazo, etc., en condición normal y en accidentes probables e hipotéticos.

Esta evaluación, con un alcance variable muy dependiente de cómo es cada recarga y de si hay cambios en el diseño de combustible o de las condiciones de operación, es esencial para el dictamen final de la seguridad plasmado en el *Informe de Seguridad de la Recarga (ISR)*, que se emite no más tarde de dos meses antes del arranque del ciclo y resume las evaluaciones efectuadas por cada uno de los grupos de diseño.

Este grupo realiza también labores de soporte a la operación y mantiene el análisis de seguridad de referencia de cada planta PWR española dentro del alcance de Enusa en lo que respecta a análisis de accidentes para licenciar modificaciones de diseño de la planta como señales de disparo, actuaciones y capacidad de las salvaguardias, pruebas especiales y cambios en el hardware de la planta.

Se utiliza la metodología de diseño de Westinghouse, fundamentalmente con el código de análisis de condiciones termohidráulicas de núcleo VIPER-W, y los códigos de análisis

de seguridad Loftran, y WCOBRA/TRAC entre muchos otros.

El grupo de **Diseño de Núcleo BWR**, es un grupo multidisciplinar con capacidad de diseño y autonomía tecnológica en diseño nuclear, termohidráulico y análisis de seguridad (transitorios, LOCA, estabilidad,...) para reactores BWR diseñados por General Electric.

Da soporte a los reactores a los que Enusa suministra combustible en España y en Europa, para Suecia, Finlandia y Alemania en estrecha colaboración con GNF, en la asociación comercial Genusa. Además, realiza servicios analíticos nucleares y de análisis de seguridad para clientes de General Electric en Estados Unidos. El conjunto de actividades comprende desde el diseño nuclear del elemento, estudios de ciclos, definiciones de mapas de carga y operación, bancos de datos para la monitorización, hasta evaluaciones de transitorios operacionales, estabilidad y determinación de límites térmicos. Además, da soporte al cliente en operación y diseño en un amplio rango de cuestiones.

La metodología de diseño es de General Electric, la cual se basa principalmente en el código de celda TGCLA, el código nuclear *Panacea*, el código de análisis realista de transitorios TRACG, y el código de estabilidad ODYSY.

#### INTEGRACIÓN CON LA FÁBRICA DE JUZBADO

La Ingeniería de Operaciones de Combustible no sólo está implicada en el proceso productivo mediante las actividades de diseño y sus interfases, sino que también da so-

porte a la fábrica en lo relativo a cualificaciones de proceso y evaluación de incidencias de fabricación como se indicó anteriormente. Además, participando en el compromiso de Enusa con la Mejora Continua de la calidad, el personal experto en diseño tiene representación en los grupos operativos de calidad (GOC) que se establecen en el ámbito de fabricación, especialmente en las áreas mecánica y cerámica. Ejemplos importantes de esta actividad son un proyecto

en curso de optimización de la longitud de pastilla combustible respetando los límites de diseño, otro proyecto de caracterización complementaria del polvo  $UO_2$  procedente de suministradores.

Esta transversalidad se completa con la participación de los principales responsables de Ingeniería en órganos de decisión tales como el grupo de mejora de calidad de fabricación (GMCD), de suministros (GMCS) y de diseño (GMCD), en el Comité de Calidad y en todas las reuniones de Dirección de Operaciones y Fabricación.

#### CONCLUSIONES

La Ingeniería de Operaciones, con el soporte de la Ingeniería de Desarrollo de Tecnología y Equipos de Enusa, da respuesta a sus clientes en disciplinas de conocimiento tales como Física Nuclear, Tecnología de Reactores, Reglamentación Nuclear, Termohidráulica, Mecánica de Sólidos e Ingeniería de Materiales. Su aplicación se realiza en un contexto competitivo muy exigente y requiere un esfuerzo mantenido de actualización tecnológica, y asimilación de nuevos conceptos y tecnologías que demanda nuestro cometido con la fábrica y con nuestros clientes. Además, la integración de Ingeniería y Fábrica demuestra ser una importante ayuda en el proceso productivo, permite una mutua realimentación de la experiencia y facilita la gestión de las recargas y su fabricación de manera eficaz.

Este equipo humano ha superado con éxito los retos tecnológicos anteriores del pasado, habiendo alcanzado la madurez necesaria para abordar el futuro con plena confianza. ■