SIMULADOR INTEGRADO DEL NÚCLEO PARA VIGILAR Y OPTIMAR LA OPERACIÓN Y EL COMBUSTIBLE

C. AHNERT - J.Mª. ARAGONÉS

Los cambios y avances incorporados en el diseño del combustible de reactores refrigerados por agua, seguido de unas mayores demandas en cuanto a sus prestaciones, así como la operación de las centrales nucleares con seguimiento de carga y con un aumento de su potencia nominal, hace mas necesaria la disponibilidad de un simulador integrado en 3D para la vigilancia del núcleo y del combustible durante la operación y para planificar las maniobras de forma óptima.

Dada la mayor capacidad actual de computación de los equipos informáticos, el simulador de núcleo puede ser un "simulador integrado" y tridimensional, que integre las capacidades de: análisis del diseño nuclear del ciclo, vigilancia en línea de la operación, planificación óptima de las maniobras operacionales y, posiblemente, su integración en "analizadores de planta" de alcance total para su ejecución en tiempo real. El seguimiento en línea del estado tridimensional neutrónico y termohidráulico del núcleo, proporciona las condiciones detalladas y realistas de operación del combustible, que pueden ser utilizadas en modelos de simulación termo-mecánica para análisis realistas del comportamiento de los materiales.

INTRODUCCIÓN

Los avances incorporados en los últimos años al diseño del combustible de los reactores nucleares refrigerados por agua, han ido unidos a unas mayores demandas en cuanto a sus prestaciones en la operación de las centrales, en particular a un mayor grado de quemado de descarga, mayores factores de pico para reducir las fugas, cambios de carga y aumentos de la potencia nominal *(uprating)*.

Las mayores solicitaciones térmicas y mecánicas sobre el combustible, a altos quemados, con potencias y temperaturas de vaina localmente mayores, junto con las modificaciones estructurales introducidas, han hecho que resulte de gran importancia el realizar un seguimiento de las condiciones locales a que es expuesto el combustible durante los distintos ciclos de operación en que permanece en el núcleo, así como de su evolución con el tiempo.

El disponer de herramientas de simulación detallada y realista del núcleo que se ejecuten en línea durante la operación de la central, es de gran utilidad para disponer de la información necesaria, con suficiente precisión y detalle tridimensional y por barra combustible, sobre las variables neutrónicas y termohidráulicas de interés y en tiempo real, para una vigilancia y control extendidos de las condiciones de trabajo real del combustible. De este mayor y mejor conocimiento se pueden derivar recomendaciones de mejora de la operación, a través de la planificación óptima de las maniobras, y del diseño y gestión del combustible para las recargas, a través de la utilización de absorbentes consumibles. Las condiciones detalladas y realistas de la operación en línea pueden también utilizarse en análisis termomecánicos del comportamiento de los materiales del combustible.

Esta información calculada puede ser contrastada de forma continua o periódica con las medidas de la instrumentación nuclear externa e interna al núcleo; determinando las desviaciones y, en su caso, modulando o calibrando los modelos de cálculo o revisando las calibraciones de la propia instrumentación.

El simulador del núcleo puede además utilizarse para planificar las maniobras operacionales de manera óptima, en cuanto a mayor disponibilidad de la planta, reduciendo el tiempo de vuelta a plena potencia, mínima generación de residuos de baja actividad, y menor impacto en el comportamiento mecánico del combustible; al reducir los picos y variaciones locales de potencia, especialmente en las zonas con mayores temperaturas de vaina. Solo con una herramienta refinada y probada, y aplicada siguiendo procedimientos de planificación muy estudiados y automatizados, pueden obtenerse las trayectorias óptimas, en el espacio del sistema de control del núcleo (rampa de potencia, boración/dilución e inserción del banco de control), que mejor satisfacen todos los requisitos previos de forma simultánea y dentro de las especificaciones técnicas de operación aplicables (ritmos de cambio de potencia, caudales de boración/dilución, límites de inserción del banco de control y banda de asimetría axial de potencia).

Las maniobras operacionales que pueden planificarse, con antelación y/o desde el estado actual en línea, son los cambios de carga de cualquier duración y ritmos de bajada y/o subida de potencia y las recuperaciones de potencia tras rechazos de carga, disparos automáticos o paradas programadas o no programadas.

OBJETIVOS DE LA PLANIFICACIÓN DE MANIOBRAS OPERACIONALES

Durante las maniobras operacionales es cuando es más interesante el programar con

antelación el modo óptimo de operar la central, ya que es cuando van a producirse cambios significativos en el nivel de potencia, inserción del control, concentración de Boro, y en las distribuciones de potencia.

Los objetivos de esa optimización serán varios:

- Maximizar la disponibilidad de la planta, reduciendo el tiempo de estabilización al nivel de potencia en que se desee operar, evitando el tener que realizar esperas a potencias parciales cuando se está subiendo potencia, para cumplir con la ETF de vigilancia de la asimetría axial de potencia.
- Evitar las penalizaciones impuestas por la estrategia de control del Axial Offset constante (CAOC).
- Minimizar la generación de residuos de baja actividad, evitando dentro de lo posible los cambios en la concentración de ácido bórico disuelto en el refrigerante primario.
- Preservar la integridad mecánica del combustible, minimizando la aparición de valores pico y oscilaciones en las distribuciones de potencia axial y radial, para reducir los ciclados térmicos y condiciones límite a los que se somete el combustible.
- De manera que la maniobra óptima es, la que no provoca o reduce al mínimo las asimetrías axiales de potencia, es decir, se realiza con el valor de ΔI en su valor objetivo o lo más próximo posible a él, o en todo caso con desviaciones en ΔI hacia el lado negativo a altas potencias, evitando así aumentar el flujo calorífico en las zonas calientes de las vainas (parte superior del núcleo a la que corresponde una asimetría axial de potencia y ΔI positivos).
- Además hemos observado en las simulaciones realizadas, que el permitir que durante las fases de cambio de carga de las maniobras el ΔI se desplace dentro de la banda permitida, aunque no viola la ETF de vigilancia, no ahorra las boraciones o diluciones que hay que hacer en paralelo, simplemente las retrasa, y sin embargo el combustible está siendo sometido a oscilaciones de potencia y temperaturas no deseables para su mejor conservación mecánica.

COMPLEJIDAD DE LA PLANIFICACIÓN

La forma óptima de realizar la maniobra, es decir, la actuación del sistema de control (ácido bórico y/o banco de control) durante el cambio de nivel de potencia, para atender a los objetivos expuestos en el apartado anterior, depende de las condiciones en que se encuentre el núcleo en el momento de iniciarla, y en concreto de:

- **Grado de quemado** medio del núcleo, ya que influye en el coeficiente de reactividad por temperatura del moderador y de potencia, y en el ΔI inicial de la distribución axial de potencia y del Xenón-135.
- **Inserción de los bancos de control**, ya que influye en el ΔI inicial de potencia y en la concentración de ácido bórico.
- **Historia previa de operación**, si es que ha habido disparo automático, parada programada ó tramos de operación a potencial parcial; ya que influye en el nivel total del Xenon-135 y en su asimetría axial.
- Una vez iniciada la maniobra, **la rampa de potencia** empleada ya sea en subida o en bajada, influye también en la evolución del nivel del Xenon-135.

La combinación de todas estas circunstancias da idea de las distintas situaciones que se pueden producir, y nos indica la complejidad del problema de su optimización; problema para el que se pueden dar unas pautas generales de actuación óptima, pero que únicamente disponiendo en línea de un simulador de núcleo que tenga en cuenta la situación real de inicio de la maniobra y que disponga de procedimientos de búsqueda automática con diferentes modos de control y las restricciones de las ETF, se puede abordar con total fiabilidad.

MODELOS DE SIMULACIÓN DEL NÚCLEO

El simulador de núcleo que permita las simulaciones mencionadas y con el detalle precisado, debe disponer de un modelo tridimensional del núcleo con *neutrónica, cinética y termohidráulica* acopladas y con posibilidad de suministrar información a nivel de barrita combustible; además de poder ejecutarse con distintos modos de búsqueda de criticidad por control, dentro de las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento, en cuanto a las inserciones máximas de los bancos de control en función del nivel de potencia, y el valor de la asimetría axial de potencia (A.O.) permitida.

Además de permitir la simulación de transitorios temporales rápidos, que suceden en escalas de milisegundos o segundos, y que se tratan mediante la cinética neutrónica; debe también tratar de forma explícita la evolución temporal de los productos de fisión ^{135}I, ^{135}Xe, ^{149}Pm y ^{149}Sm para simular los transitorios más lentos que suceden en una escala de horas o días, ya que son las situaciones que se dan durante la operación real.

Un simulador de núcleo debe también ser capaz de determinar la respuesta en la instrumentación incore y en las cámaras excore, para que pueda ser contrastada en línea con las medidas adquiridas, y permitir si se desea la obtención de los parámetros de calibración de la instrumentación excore frente a la incore.

El desarrollo en los modelos de simulación realista del núcleo, ha estado en los últimos años ligado a la mayor capacidad de computación, y a la reducción en el coste de los equipos informáticos, de manera que si antes se empleaban modelos muy simplificados del núcleo, reducidos a una dimensión axial, para el seguimiento de la operación del núcleo, ahora es posible la utilización de un modelo de núcleo 3D para realizar esta tarea, con unos tiempos de cálculo muy aceptables y que en ciertos casos pueden llegar al tiempo real, tal como se requiere para los "analizadores de planta" que se utilizan en simulaciones de transitorios para formación y entrenamiento.

Además antes era necesario, después de realizar los cálculos del diseño nuclear de un ciclo de quemado con modelos detallados, preparar una base de datos genérica (ó específica de ciclo), con geometría del núcleo menos detallada, para entrada a los modelos de núcleo de los "analizadores de planta". Ahora es factible utilizar los mismos modelos detallados de núcleo para hacer el seguimiento real durante la operación, si es que se realiza el acoplamiento del simulador a los datos de planta en línea; y podría incluso utilizarse también el simulador como modelo de núcleo en los "analizadores de planta", mediante el acoplamiento del simulador de núcleo a un simulador de planta tipo RELAP, tanto para aplicaciones de entrenamiento, como de simulación "best-estimate".

La ventaja de la utilización del mismo simulador de núcleo para las distintas aplicaciones, aparte de la precisión y fiabilidad que se obtiene en el seguimiento real del núcleo, es la poder usar la misma base de datos del ciclo para las distintas aplicaciones, lo que facilita su garantía de calidad y la posibilidad de utilizar lo que puede denominarse un "simulador multifuncional e integrado".

NECESIDAD DE UN SIMULADOR DE NÚCLEO PARA VIGILAR Y PLANIFICAR LA OPERACIÓN

Se han mencionado los tipos de maniobras operacionales que pueden presentarse durante la operación de las centrales nucleares y las ventajas que se pueden obtener de su planificación optimizada, mediante un simulador de núcleo; siendo por tanto la disponibilidad de una herramienta de este tipo de una gran utilidad como apoyo a la operación en-línea.

En este contexto se debe además mencionar la función que puede cumplir mediante su utilización off-line, como herramienta de entrenamiento y formación de los operadores de las centrales nucleares.

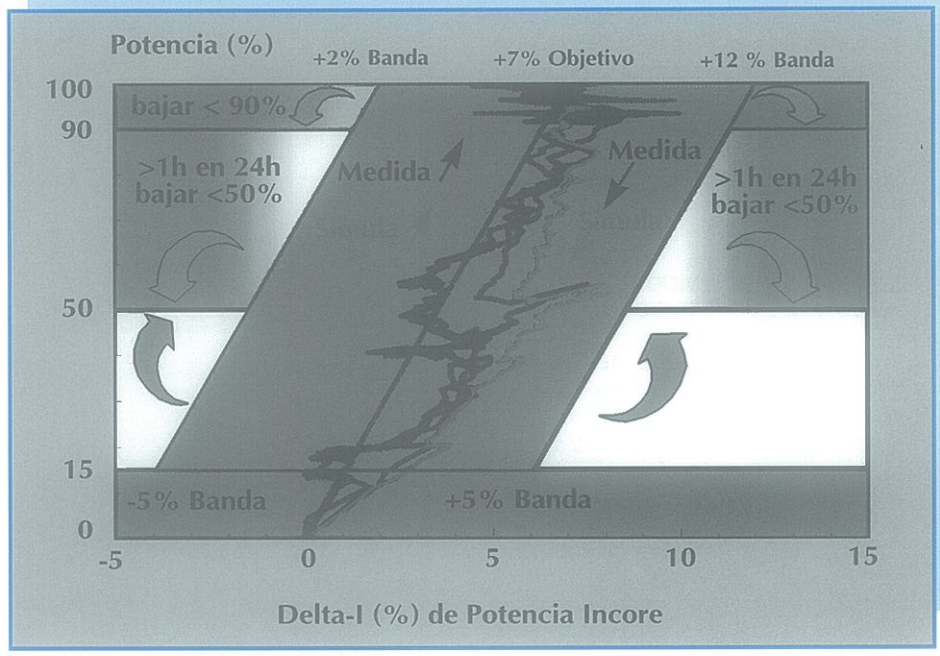
Otro aspecto a tener en cuenta en este apartado, es que así como en nuestro país y en el pasado las centrales nucleares han estado operando en base, es decir a su potencia nominal, siempre que era posible, en los últimos meses algunas de ellas han estado operando durante algunos períodos de tiempo a potencia parcial, y es posible que esto siga ocurriendo en ocasiones en los próximos años, en función de la demanda eléctrica y del reparto de la generación.

Esta circunstancia, más cambiante o menos estable que la anterior, hace especialmente interesante e incluso necesario el disponer de un simulador de núcleo, para como ya se ha citado vigilar el combustible durante la operación, planificar las maniobras con el menor impacto en la disponibilidad, generación de residuos y en las propiedades mecánicas del combustible, y servir como apoyo a la operación de la central en toda la variedad de situaciones que se pueden producir.

Se debe mencionar además que otra circunstancia adicional es que algunas de las centrales españolas utilizan actualmente ciclos de quemado más largos de un año, y que el efecto en las variables nucleares de que se alargue el ciclo de quemado es, en general el de producir una mayor variedad de situaciones posibles en el núcleo, además de unos coeficientes de reactividad por temperatura, y por tanto de potencia de mayor valor absoluto, con unas situaciones a potencia parcial o HZP, más alejadas del valor objetivo en cuanto a la asimetría axial de potencia, y con unas necesidades de cambios en las boraciones y diluciones del ácido bórico en el circuito primario de mayor magnitud.

También hemos observado que en el diseño actual del sistema de control de los reactores PWR tipo Westinghouse, el solape que debe mantenerse entre los bancos de control produce una variación de la asimetría axial (AO) con la inserción de los bancos que no es regular, presentando a partir de unos 6.000 MWd/t de quemado del ciclo, una forma con dos valores mínimos, y por tanto con un valor máximo entre ellos, que hace muy difícil el mantener el ΔI dentro de la banda de AO permitida, durante las maniobras de subida de potencia tras paradas breves.

F II - *Vigilancia de la Asimetría Axial de Potencia en la Subida a Potencia tras una Parada Breve*



EL SIMULADOR INTEGRADO DEL SEANAP

El **S**istema **E**spañol de **A**nálisis del **N**úcleo a **A**gua a **P**resión desarrollado por los autores en el DENIM, bajo los auspicios, en parte de su desarrollo, de las centrales nucleares españolas, está siendo utilizado por varios grupos de apoyo técnico de las centrales españolas como herramienta alternativa a la del diseñador del núcleo, y para realizar otros estudios de interés por parte de esos grupos. El código de cálculo del núcleo en 3D, que dispone de la neutrónica, termohidráulica y cinética acopladas, así como de la modelización de la instrumentación incore y excore, puede ser utilizado como simulador del núcleo para las aplicaciones mencionadas anteriormente, tratándose por tanto de un simulador que puede ser empleado como "simulador integrado" [1].

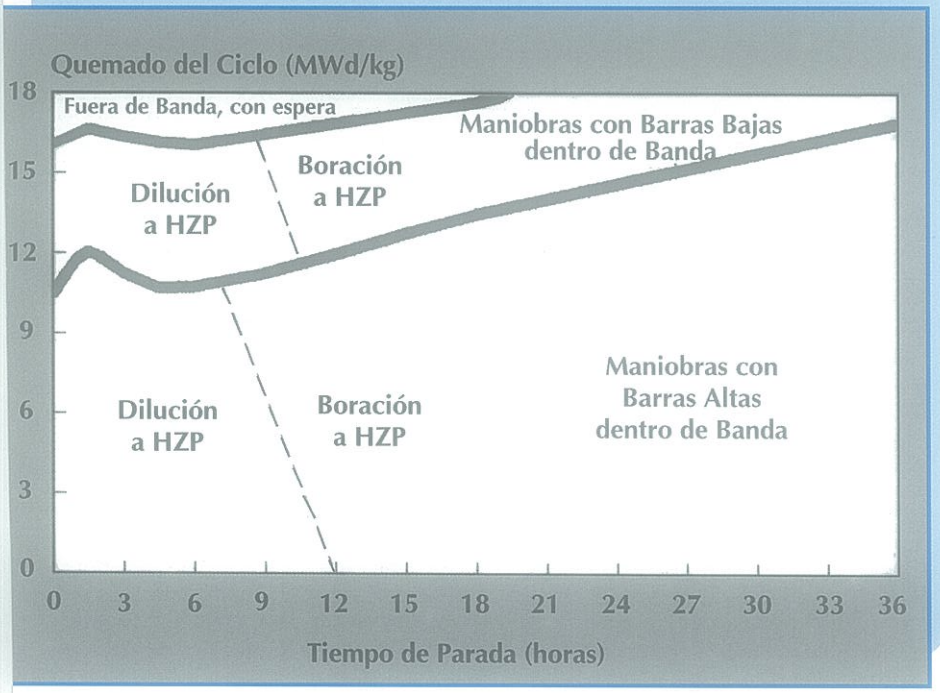
El simulador además de ser utilizado como simulador en-línea en las centrales PWR españolas, Vandellós II y Ascó I y II, ha sido empleado para el análisis y optimización de las maniobras operacionales, y con él se ha realizado un estudio muy sistemático de las distintas situaciones que se pueden presentar, y la planificación óptima de los distintos tipos de maniobras posibles, dentro de las ETF's de funcionamiento, habiendo elaborado una información muy exhaustiva que nos ha servido de base para entrenamiento de los técnicos de tecnología nuclear y los operadores de las centrales nucleares citadas.

Todas las maniobras analizadas se han documentado y se dispone de los resultados obtenidos en forma gráfica, representando en cada caso: la evolución del nivel y ΔI de potencia, del nivel y ΔI del Xenón; la posición de los bancos de control y la concentración crítica de boro en función del tiempo; los diagramas de vigilancia de ΔI, y posición de los bancos, en función del nivel de potencia; y el diagrama modal de evolución de las asimetrías axiales de potencia y Xenón, que indican el valor de la variable y su tendencia, y por tanto su grado de estabilidad. De manera que también indican el modo de actuación del operador para llevarlo a estabilidad.

Un resumen metodológico y de los resultados de este análisis han sido publicados y presentados en la conferencia PHYSOR-96 [2], y han sido transferidos a algunas de las centrales nucleares españolas.

Del análisis sistemático de las maniobras operacionales, se han extraído conclusiones y recomendaciones de posible incorporación a los procedimientos operativos de las centrales nucleares PWR, y que aunque en este estudio

F I - *Espacio de las Maniobras Operacionales de Subida a Potencia tras Disparos*



son genéricas, ya que están forzosamente planteadas para unas determinadas situaciones de partida, se particularizan a cada situación real con la implantación del simulador en línea en la central. Un ejemplo de los resultados de este análisis, se recoge en la Figura I, para ciclos de 18 meses de centrales de agua a presión como C.N. Ascó y C.N. Vandellós.

EXPERIENCIA DE APLICACIÓN DEL SIMULADOR INTEGRADO

El simulador integrado del sistema SEANAP está funcionando en línea, y con todas las capacidades funcionales descritas, en la C.N. Vandellós durante los ciclos 8, 9 y 10 de operación, utilizando las interfases desarrolladas por la central para la adquisición automatizada de las variables de proceso y la interfase gráfica de usuario. También se ha implantado en C.N. Ascó, recuperando el seguimiento completo de los ciclos 11 y 13 de las unidades II y I, respectivamente, con seguimiento automático en línea desde julio de 1998. En estos casi 5 ciclos, se ha realizado el seguimiento y contrastación de la operación real, cada 5 minutos, con un período total de mas de 5 años, incluyendo todas las maniobras de arranques tras recargas y paradas, bajadas de carga breves (para pruebas operacionales) y prolongadas (exigidas por el despacho centralizado de carga). Asimismo se han contrastado las tasas de reacción 3-D en los mapas de flujo mensuales y durante las pruebas y calibraciones.

Los resultados obtenidos han sido de una gran fiabilidad y precisión, con diferencias entre la simulación y las medidas muy inferiores a las de los criterios de diseño del núcleo. En particular, las diferencias en las concentraciones de Boro han sido inferiores a las 5 ppm durante todo el ciclo y maniobras, con los procedimientos de calibración previstos para tratar de forma realista el efecto del quemado isotópico del Boro. Las diferencias en la asimetría axial de potencia han sido inferiores al 1 % en la mayor parte de los ciclos y maniobras operacionales.

En la figura II se recoge un ejemplo del seguimiento de las asimetrías axiales de potencia simuladas y medidas (mediante la calibración incore-excore) registradas en una maniobra de bajada y subida de potencia durante la parada no-programada que tuvo lugar al principio del ciclo 10 de C.N. Vandellós. Puede observarse la fidelidad y pequeñas desviaciones entre los valores simulados y medidos a lo largo de toda la maniobra (5 días cada 5 minutos).

CONCLUSIONES

Se ha demostrado la utilidad, mucho mayor en la actualidad, junto con la fiabilidad y precisión, de disponer de un simulador integrado del núcleo en 3D, para vigilancia del núcleo y del combustible, y para la optimización de la operación con el menor impacto en las características mecánicas del combustible, así como para apoyo a la operación de las centrales en los cambios de carga y recuperaciones de potencia tras paradas o disparos automáticos. El simulador de núcleo del SEANAP reúne todas las características de un simulador multifuncional integrado, y así lo ha demostrado durante el análisis y la operación de 5 ciclos en 3 unidades PWR españolas.

Con la experiencia adquirida, compartida con los técnicos y operadores de las centrales que utilizan el sistema SEANAP, puede abordarse no solo actividades avanzadas de reingeniería y de optimación de la operación de la central, basadas en el mejor conocimiento y formación, que han incidido y podrán incidir aun mas en la reducción de costes y excelencia de operación, sino que también se pueden abordar actividades de innovación, con un impacto potencial mayor, en las áreas del diseño del combustible y de las recargas del núcleo, reducción de los residuos de baja y alta actividad, especificaciones técnicas de funcionamiento y procedimientos de control y vigilancia en maniobras. Para ello se ha de trabajar en colaboración con los técnicos de las centrales y propiedad, de las ingenierías del combustible, de formación y de gestión de residuos, así como del organismo regulador.

Ante el reto actual de mayor competitividad, las innovaciones serán a medio plazo mas rentables y sostenibles que las meras reducciones de costes y los cambios menores en los productos y procedimientos. Las áreas del núcleo y combustible, y su operación óptima, ofrecen la ventaja de ser aplicables a centrales similares a las que operan en España y a centrales avanzadas o pasivas. Además de las mejoras evolutivas, ciertas innovaciones, de mayor impacto en la fiabilidad y reducción del volumen del combustible irradiado, también deben investigarse y cualificarse, en su caso, por su mayor impacto económico y de aceptabilidad social.

Carol AHNERT IGLESIAS es Profesora Titular del Departamento de Ingeniería Nuclear y del Instituto de Fusión Nuclear en la ETS Ingenieros Navales de la Universidad Politécnica de Madrid.
Fue investigadora de la Junta de Energía Nuclear, hoy CIEMAT. Ha sido consultora de la OCDE/NEA Data Bank e investigadora principal de varios proyectos de investigación coordinados por la División de Reactores de Potencia de la OIEA (1980-93).
Desarrolla su actividad investigadora en el Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid, desarrollando códigos de cálculo avanzado para Fusión Inercial, combustible y dinámica del núcleo de reactores PWR, y reactores para propulsión naval y espacial. Ha publicado 15 artículos en revistas internacionales y presentado 25 ponencias en conferencias internacionales.

José Mª ARAGONÉS BELTRÁN es Catedrático del Departamento de Ingeniería Nuclear y del Instituto de Fusión Nuclear en la ETS de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.
Fue Jefe del Grupo de Cálculo y Teoría de Reactores de la Junta de Energía Nuclear, hoy CIEMAT (1974-75). Ha sido Director del Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (1988-95). Director científico de proyectos de investigación internacionales coordinados por la OIEA (1981-92). Desde 1980 es consultor de la OCDE/NEA Data Bank y de la División de Reactores de la OIEA. Desde 1990 es miembro del comité editor de la revista "Nuclear Engineering and Design" y del Nuclear Science Committee de la OCDE/NEA. Desde 1994 es miembro de la International Nuclear Academy.
Es autor de sistemas de cálculo avanzado para el diseño de blancos de Fusión Inercial, y de análisis dinámico y de gestión del combustible para reactores PWR, este último usado por las centrales españolas desde 1981.
Ha publicado 35 artículos en revistas científicas internacionales y ha presentado más de 50 ponencias en conferencias internacionales, siendo miembro de los comités científicos en varias de ellas, y ha publicado 75 informes técnicos y de investigación.

REFERENCIAS

[1] J.M. Aragonés, C. Ahnert, O. Cabellos, "Methods and Performance of the 3D PWR Core Dynamics SIMTRAN on-line Code", Nuclear Science and Engineering, 124 (1996).

[2] J.M. Aragonés, C. Ahnert, D. Cano y N. García-Herránz, "Planning of Operational Maneuvers with the 3D PWR Core Dynamics SIMTRAN on-line Code", PHYSOR-96, Mito, Japón (1996).