

# **NORA: UN PROYECTO INTERNACIONAL DE FISICA DE REACTORES**

Viking Olver Eriksen, Kjeller (Noruega)

Hace cinco años que el proyecto NORA está en curso de ejecución y cabe preguntarse cómo se ha ido desarrollando hasta ahora, qué resultados ha dado y en qué consiste actualmente.

Veamos primero cómo nació este proyecto. En junio de 1959, el Gobierno noruego propuso al OIEA que patrocinara un programa científico para medir, reunir, evaluar y distribuir datos nucleares integrales. Como primera medida el Gobierno puso a disposición del OIEA el reactor de potencia nula NORA, con sus instalaciones auxiliares y su personal científico, para que en cooperación con el Instituto noruego de energía atómica se desarrollase un programa conjunto de física de reactores. Se propuso que el programa conjunto se realizara con personal científico internacional; el Organismo podía desempeñar un papel muy importante facilitando dicho personal, además de combustible para el reactor y servicios de carácter general, y actuando como catalizador para extender el programa a otros países. En febrero de 1961, la Junta de Gobernadores del OIEA aprobó la oferta de Noruega y en abril del mismo año se firmó un acuerdo.

Los puntos principales de este acuerdo son que Noruega aporta el reactor NORA y los servicios de su personal permanente técnico y científico, sufraga todos los gastos necesarios para la utilización y conservación del reactor, y se hace responsable de su funcionamiento en condiciones de seguridad. Por su parte, el Organismo ayuda a Noruega a obtener de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos (USAEC) una carga combustible de dióxido de uranio enriquecido, facilita los servicios de más personal científico de sus Estados Miembros y, en general, asesora sobre cuestiones científicas, de seguridad y de protección de la salud, y otras similares. En ayuda del programa se concedió un contrato de investigación patrocinado por la USAEC.

Supervisa el proyecto un Comité formado por miembros del Instituto y del OIEA. Lo preside desde el principio el Dr. R. Ramanna (India). El reactor NORA se halla en Kjeller, localidad situada a unos 20 kms al este de Oslo. Alcanzó la criticidad en junio de 1961.

## **PROGRAMA CIENTIFICO**

En los diez últimos años ha habido un enorme desarrollo en el campo de la física de reactores. En la parte teórica, las grandes y rápidas calculadoras electrónicas de que disponemos hoy han dado a las técnicas de cálculo de reactores un nivel y un grado de perfección insospechado diez años atrás. En cuestión de experiencia se ha obtenido una enorme cantidad de datos acerca de los diversos sistemas de combustible y de moderador. Se

han desarrollado y mejorado las técnicas experimentales. En cambio, parece existir una escasez de datos experimentales suficientemente exactos para poderlos utilizar como base de comprobación en los complejos y minuciosos programas de calculadoras que hoy se utilizan.

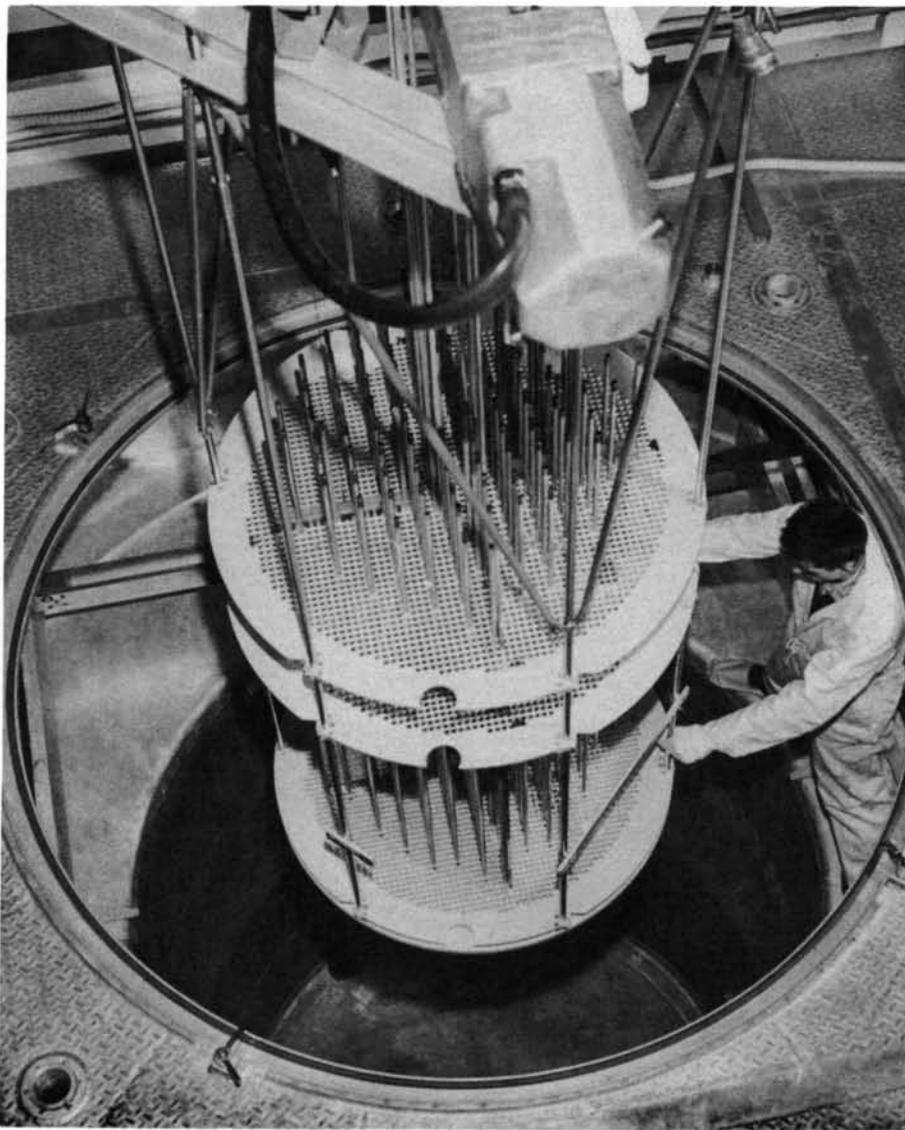
Uno de los objetivos principales del programa NORA era ampliar los conocimientos que se tenían acerca de la física de reactores con núcleos combustibles de dióxido de uranio ligeramente enriquecido, moderados con agua ligera o agua pesada, acumulando para ello datos experimentales sobre estos sistemas, desarrollando técnicas experimentales que sirvieran para ampliar los conocimientos prácticos, y empleando métodos teóricos para analizar los resultados experimentales. Al principio el programa de investigación del proyecto NORA se formuló dando la mayor importancia a la obtención de arreglos experimentales susceptibles de análisis teórico, pero más tarde se hizo hincapié en el estudio de los efectos que se manifiestan también en el núcleo de los reactores de potencia. Las instalaciones auxiliares con que contaba el proyecto para este programa eran el conjunto crítico NORA y el conjunto subcrítico JEEPNIK para las experiencias, y una calculadora Ferranti Mercury, que más tarde se sustituyó por una calculadora CDC-3600 de la Control Data Corporation, para los trabajos teóricos. El programa efectivo que se concibió y ejecutó a continuación se puede dividir en cuatro partes: 1) programa experimental (estática del reactor); 2) análisis teóricos; 3) desarrollo de técnicas experimentales, y 4) cinética del reactor.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

No se mencionarán aquí más que dos series de experimentos. La primera consistió en el estudio de 16 reticulados de combustible de dióxido de uranio enriquecido al 3%, con moderadores mixtos de agua ligera y agua pesada. Se emplearon concentraciones de agua pesada del 99,4, del 81 y del 55%. La segunda serie se realizó con una carga de dióxido de uranio enriquecido al 3,4% con moderador de agua ligera. Con respecto a la primera serie de experimentos se sabe que las variaciones del espectro neutrónico en el núcleo del reactor influyen en su reactividad y que, por tanto, esta última se puede regular alterando las cantidades relativas de deuterio e hidrógeno. En este principio se basa el concepto del reactor de desplazamiento espectral.

Existían muy pocos datos experimentales sobre estos reticulados y el proyecto NORA ha permitido obtener una cantidad importante de información básica sobre ellos. De todos modos, el programa NORA era más general y comprendía el estudio de los núcleos bien moderados al mismo tiempo que el de núcleos fuertemente submoderados como los que se emplean en los diseños de reactores de desplazamiento espectral. Las relaciones volumétricas entre moderador y combustible oscilaban entre 100 y 1,5.

Los experimentos exigían la medición de varios parámetros importantes relacionados con el reactor o, más exactamente, con sus celdas. Por ese motivo se dedicó mucho tiempo a trazar mapas de distribución del flujo



Inserción del cuerpo del reactor NORA.

---

neutrónico en las celdas, para lo que se emplearon técnicas experimentales clásicas como la irradiación de láminas. Algunos parámetros de la celda se midieron con técnicas de separación radioquímica desarrolladas durante el proyecto NORA.

La segunda serie de experimentos comenzó el año pasado y en ella se emplea una carga combustible de dióxido de uranio enriquecido al 3,4% con moderador de agua ligera. Esta serie es continuación lógica de los experimentos anteriores: se miden los mismos parámetros y el objetivo es también obtener información experimental y desarrollar nuevas técnicas de cálculo, pero el modo de enfoque es distinto. Además se efectuarán experimentos con reticulados más complicados, parecidos a los de los reactores de potencia. Una de las finalidades principales será estudiar un núcleo simulado de reactor de potencia con intervalos de agua, barras de control, efectos de temperatura y cavidades simuladas. Esta serie de experimentos tiene mayor interés para la ingeniería.

## **ANALISIS TEORICOS**

El desarrollo de métodos teóricos y las posibles mejoras de las teorías existentes han sido considerados como parte importante del programa de investigación NORA. La labor teórica relacionada con el proyecto ha consistido en parte en seguir métodos y sistemas existentes para la interpretación de los resultados experimentales, en parte en comparar estos métodos entre sí para determinar sus ventajas e inconvenientes, y en parte en desarrollar modelos teóricos más perfeccionados sobre la base de los datos fundamentales.

Se ha trabajado mucho para desarrollar métodos de cálculo de los parámetros del reticulado de las celdas, habiéndose establecido dos claves de cómputo denominadas K-7 THERMOS y BIGG. También se han obtenido buenos resultados comparando diversas claves de cómputo.

El cálculo de la termalización de los neutrones (fase final del proceso de frenado de los neutrones rápidos) y el de las distribuciones de la densidad neutrónica en las celdas del reactor son importantes para los cálculos de reactores y han suscitado interés en muchos países. Este aspecto del proyecto NORA forma también parte de un estudio conjunto de física de reactores que realizan Noruega, Polonia y Yugoslavia (el proyecto NPY, patrocinado también por el Organismo); en los conjuntos críticos de cada uno de estos países se estudian reticulados muy diversos que se analizan conjuntamente empleando diferentes modelos teóricos desarrollados en los tres países. Los trabajos están todavía en curso.

## **DESARROLLO DE TECNICAS EXPERIMENTALES Y CINETICA DEL REACTOR**

El desarrollo de nuevas técnicas experimentales y el perfeccionamiento de las existentes ha sido y es parte esencial del programa de investigación NORA. Desarrollar nuevas técnicas lleva mucho tiempo y cuesta mucho dinero; por eso sólo se iniciaron trabajos de este tipo en los pocos casos en que se contaba con una buena idea como punto de partida. Por ejemplo, se emplearon técnicas radioquímicas para determinar parámetros detallados en el interior de la celda mediante mediciones basadas en capturas neutrónicas en uranio-238 o en fisiones de uranio-235. El neptunio-239 y el producto de fisión molibdeno-99 son indicadores de estas dos reacciones.

También se fabricaron barras de control que se insertan y extraen del reactor a intervalos determinados, modulando así la reactividad y, con ello, la respuesta del reactor en potencia. Otro ejemplo es el empleo de impulsos neutrónicos para medir la cinética del reactor.

Se han construido dos barras moduladoras rotatorias distintas que se emplean para variar la absorción de neutrones en el núcleo del reactor en función del tiempo. Ello da lugar a una variación del flujo neutrónico en el tiempo que se ha medido en núcleos de diversas configuraciones; por ejemplo, agua pesada, agua ligera y cuerpos de desplazamiento espectral. Los resultados han servido para comprobar hasta qué punto se puede predecir por métodos teóricos el comportamiento cinético de estos núcleos. De especial interés fue el estudio de los efectos cinéticos espaciales en núcleos moderados con agua pesada, tan importantes para los grandes reactores de potencia.

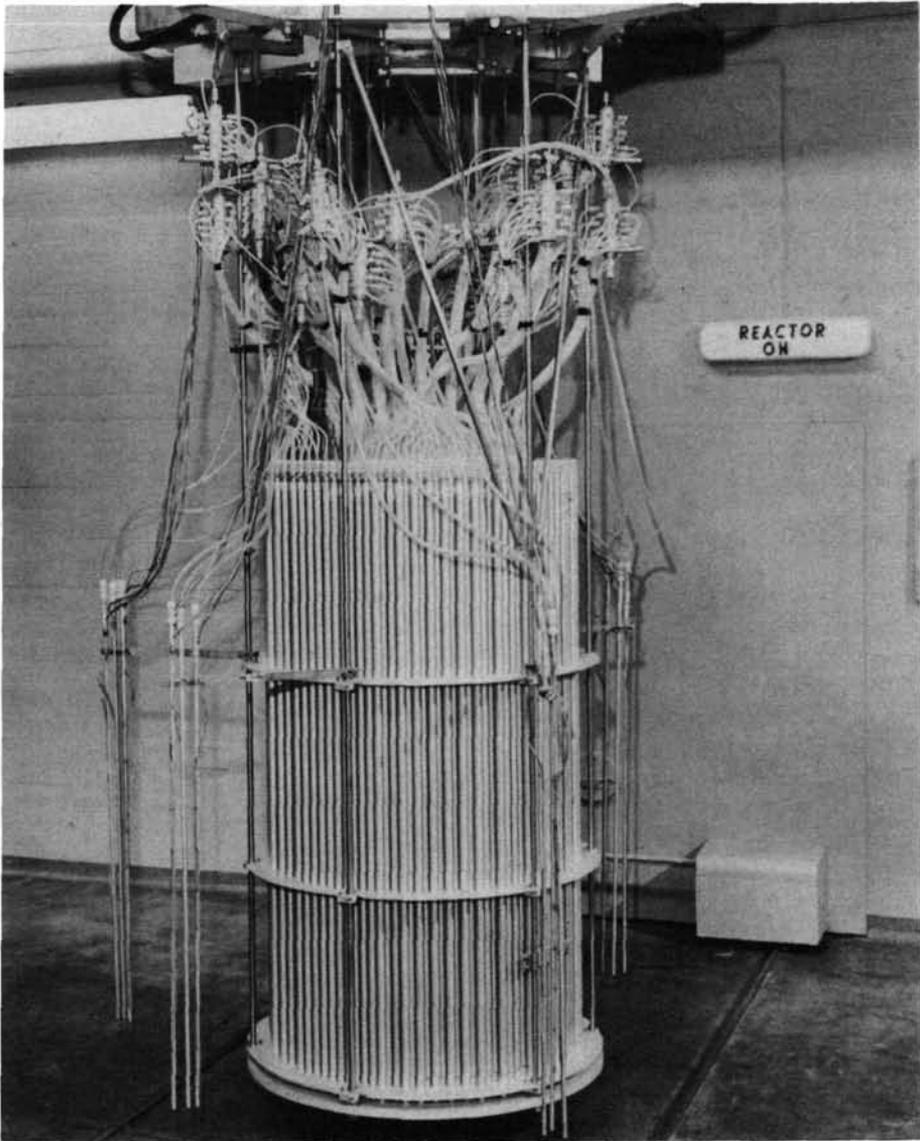
En 1963 se inició un estudio del llamado ruido del reactor, que corresponde a las variaciones estadísticas de la densidad neutrónica. Las primeras mediciones con técnicas corrientes dieron resultados que las teorías actuales no pueden explicar fácilmente. A continuación se perfeccionó el equipo experimental y en 1965 se hizo una serie muy extensa de mediciones empleando varios métodos complementarios. Los nuevos resultados corroboraron las observaciones anteriores. La labor teórica que se ejecutó al mismo tiempo que la experimental ha llevado a formular de nuevo la teoría.

En 1966 se proseguirán los trabajos sobre ruido de reactores y se iniciarán otros con impulsos neutrónicos. En breve se instalará en el reactor NORA un generador de impulsos neutrónicos cuya finalidad principal será desarrollar un método para medir exactamente el valor de la reactividad de las barras de control.

## ALGUNOS RESULTADOS NUEVOS

Los resultados obtenidos con el proyecto NORA no se pueden evaluar adecuadamente sin consultar los numerosos informes y publicaciones a que han dado lugar los trabajos. El autor opina que se ha contribuido mucho al estudio de los reticulados de moderador mixto, tanto respecto al análisis teórico de estos sistemas como al desarrollo de técnicas experimentales relacionadas con esta clase de trabajos. Por su parte, las investigaciones sobre cinética espacial de reactores y sobre el ruido del reactor han dado resultados inéditos de considerable interés.

El éxito del proyecto NORA se debe en gran parte al generoso apoyo de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, que ha suministrado cargas de combustible y personal científico y que ha concedido subvenciones para la investigación. El alto nivel científico alcanzado se debe en gran parte al entusiasmo con que han colaborado tanto la plantilla permanente de científicos y técnicos como los hombres de ciencia de los Estados Miembros del OIEA que han cooperado temporalmente. El Brasil, Canadá, Checoslovaquia, los Estados Unidos, Hungría, la India, el Japón, los Países Bajos, el Pakistán, Polonia y Yugoslavia han facilitado servicios de hombres de ciencia en relación con el proyecto.



Cuerpo de reactor equipado para la realización de experimentos de medición de la reactividad en el vacío en el reactor NORA.

La importancia y la utilidad de establecer un centro internacional de esta clase se ha hecho patente en todo momento. El Centro da a los físicos jóvenes la oportunidad de integrarse en un ambiente activo y muy adelantado, y coadyuva al establecimiento de contactos provechosos entre los laboratorios de cada país.

Se reconoce y agradece la gran ayuda prestada por la Secretaría del OIEA.