

INTRODUCCION

La participación en el diseño, construcción y explotación de centrales nucleares entraña la aceptación de responsabilidades de naturaleza económica y legal, que han de ser satisfechas a través de nuevos conocimientos, que sólo pueden adquirirse por medio de la investigación y el análisis de la experiencia de explotación de las instalaciones. La investigación, el desarrollo y la demostración de la ciencia y tecnología nucleares requieren inversiones e infraestructura sólo asequibles a los países más desarrollados. El análisis de la experiencia de operación es un proceso de aprendizaje muy lento, aunque imprescindible.

Países como España pueden captar y desarrollar tecnología nuclear de los más avanzados, participando en programas de investigación multinacionales. Una de las principales tareas de la Agencia de Energía Nuclear (NEA) de la OCDE es promover programas y ejercicios de investigación conjuntos a realizar por los países miembros; de entre estos sobresale el Proyecto LOFT-OCDE, que fue diseñado en 1982 por la NEA contando con la instalación LOFT en Idaho Falls, que había sido ofrecida a este fin por el DOE de EUA.

El ofrecimiento interesó a España desde el primer momento. Sin embargo, decisiones de última hora llevaron a la retirada de la candidatura española. Esta situación fue reconsiderada en 1984 con el resultado de la adhesión de España al Acuerdo, efectiva desde el 8 de Febrero de 1985.

En su forma actual, el Acuerdo está suscrito por las siguientes instituciones de diez países:

- Studsvik Energiteknik AB, Suecia.
- Office Federal de l'Energie, Suiza.
- United Kingdom Atomic Energy Authority, Reino Unido.
- United States Department of Energy, EUA.
- United States Nuclear Regulatory Commission, EUA.
- Oesterreichisches Forschungszentrum Seibersdorf GmbH, Austria.
- Bundesministerium für Forschung und Technologie, República Federal de Alemania.
- Finnish Ministry of Trade and Industry, Finlandia.
- Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative, Italia.
- Japan Atomic Energy Research Institute, Japón.
- Consejo de Seguridad Nuclear y Junta de Energía Nuclear (ahora CIEMAT), España.

La participación española se enmarca dentro de un Convenio suscrito por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la Junta de Energía Nuclear (ahora CIE-MAT), la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA), Unidad Eléctrica (UNESA) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y, recientemente, ENRESA.

En el texto que sigue se describe la participación española en el Proyecto, organización de la contribución española concebida para hacer óptimos el esfuerzo realizado y los frutos conseguidos, y se exponen las características fundamentales del Proyecto y del programa experimental, a fin de valorar su idoneidad para satisfacer las necesidades españolas. Finalmente, se identifican los beneficios directos e indirectos, a corto y largo plazo, que el país está obteniendo y puede adquirir a través de su participación en este Proyecto.

En otros artículos de este mismo número de Nuclear España se analizan en detalle las actividades realizadas por los investigadores españoles en el marco de este programa.

EL PROYECTO LOFT

LOFT (Loss-of-Fluid Test) se ha concebido para simular el comportamiento de los modernos reactores nucleares de agua a presión cuando son perturbados por sucesos iniciadores que den lugar a secuencias operativas, previsibles y accidentales. La potencia del reactor LOFT es de 50 MWt y está diseñado a escala para simular el comportamiento termohidráulico de una planta comercial de 3.000 MWt. Se han realizado análisis detallados a fin de garantizar que los diversos parámetros del modelo hagan que la respuesta de LOFT resulte muy similar a la que cabría esperar de los reactores comerciales ante estímulos equivalentes.

Entre 1976 y 1979 se llevaron a cabo en LOFT los experimentos de la serie L1 y L2, todos ellos pertenecientes a la simulación de grandes roturas de la barrera de presión, con calentamiento eléctrico en la serie L1 y con combustible nuclear en el núcleo para las restantes series. Como resultado del accidente de la central TMI-2, la propia NRC decidió iniciar un

(*) Forman el Comité de Dirección:

Agustín Alonso (Director Científico).
Manuel Cortizas (Secretario).
José de Carlos (Representante en el M.B.).
Emilio de Matías.
Adolfo González de Ubieta.
Alberto López (Presidente).
José Puga (Director de Proyecto).

nuevo programa experimental, con mayor énfasis en el análisis de los transitorios provocados por roturas pequeñas, pérdidas del sumidero del calor y control de la reactividad o combinaciones de tales causas primarias. Nacieron así las series L3, relativas a roturas pequeñas; L5 sobre roturas intermedias; L6 que contemplaban transitorios operativos y previsibles; L8 transitorios severos; y L9 en la que se analizaron ATWS (transitorios sin inserción de barras).

La nueva serie de experimentos sirvió, entre otros aspectos:

- a) Para conocer mejor los fenómenos físicos desencadenados por una variedad de transitorios previsibles.
- b) Para demostrar la importancia de los sumideros de calor y de la circulación natural.
- c) Para identificar los límites de aplicabilidad de los modelos teóricos y desarrollar otros más ajustados a la realidad.

Conviene recordar estos hallazgos ya que el Acuerdo LOFT-OCDE incorpora tales conocimientos, que pueden así ser transferidos a las partes.

Por último, en 1982 el Departamento de Energía de los EUA ofreció a la OCDE la instalación experimental, que permitió la definición del Proyecto LOFT-OCDE, en el que se incluían cuatro grandes series de experimentos:

- a) Transitorios producidos por la pérdida de agua de alimentación a los generadores de vapor.
- b) Transitorios producidos por roturas grandes.
- c) Transitorios producidos por roturas pequeñas.
- d) Análisis del comportamiento del combustible y de los productos de fisión en caso de deterioro del núcleo.

En este caso no se pretendía simplemente repetir estudios sobre pérdida de refrigerante, sino comprobar el comportamiento de diferentes concepciones de los sistemas de emergencia de algunos países participantes.

EL ACUERDO LOFT-OCDE

El Acuerdo LOFT-OCDE, establecido bajo el marco de la OCDE/NEA, define tres niveles responsables del cumplimiento de los distintos términos del Acuerdo. Se trata de:

1. La Junta de Gobierno (Management Board).

2. El Grupo de Revisión del Programa (Programme Review Group).

3. El Explotador de la Instalación (The Operating Agent).

En términos muy generales, las misiones de cada nivel se pueden resumir como sigue:

- Corresponde a la *Junta de Gobierno* la aprobación del programa experimental y del presupuesto anuales, así como las normas, directrices y reglas de procedimiento que sirvan mejor al desarrollo del Acuerdo. Cada parte en el Acuerdo nombra un representante, de entre los que se elige un Presidente y un Vicepresidente con mandato anual.
- El *Grupo de Revisión de Programas* actúa como cuerpo asesor técnico de la Junta de Gobierno. Está formado por un representante de cada parte en el Acuerdo y elige de entre sus miembros un Presidente y un Vicepresidente con mandato anual. Su misión fundamental consiste en analizar los informes relacionados con el Proyecto, valorar los resultados de los experimentos realizados y asesorar sobre cómo se han de realizar los experimentos siguientes.

El mecanismo establecido para documentar el Proyecto es el utilizado tradicionalmente e incluye los documentos siguientes:

1. Predicción del experimento, (EPD; Experiment Prediction Document).
2. Informe Preliminar (QLR, Quick Look Report); contiene un análisis somero de los resultados experimentales obtenidos y un análisis teórico basado sobre las condiciones reales del experimento.
3. Resumen y análisis del experimento, (EASR, Experiment Analysis and Summary Report), que incluye el análisis del experimento, la predicción teórica realizada de acuerdo con las condiciones reales del experimento y el análisis de los resultados experimentales.
4. El informe de comparación (CR, Comparison Report), en el que se incluyen los resultados de todas las partes e instituciones que hayan contribuido a la predicción de los resultados a partir de los datos experimentales.

EL CONVENIO LOFT-OCDE-ESPAÑA

Al objeto de participar en el desarrollo de las investigaciones del Proyecto LOFT-OCDE y a fin de garantizar la asimilación de conocimientos y de tecnología, el Ministerio de Industria y Energía instó a las organizaciones españolas con potencial interés a participar en el Proyecto y a trabajar de forma coordinada en el mismo.

Las bases de esta colaboración fueron plasmadas en un Convenio, fechado el 6 de noviembre de 1984, en el que se regula la contribución de cada una de ellas, así como las responsabilidades y asignación de representaciones ante los órganos de gobierno del LOFT-OCDE. Las partes incluyen el Consejo de Seguridad Nuclear, la Empresa Nacional de Uranio, S. A., Unidad Eléctrica, S. A., la Junta de Energía Nuclear y la Universidad Politécnica de Madrid, representada por la Cátedra de Tecnología Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, y ENRESA.

El Convenio crea un Comité de Dirección, al que asigna responsabilidades concretas en lo que respecta a la gestión y explotación del Proyecto. Crea también, y pone bajo la jurisdicción del Comité de Dirección, una Dirección del Proyecto con funciones ejecutivas y una Dirección Científica con funciones asesoras. El Comité de Dirección ha creado su propio reglamento de funcionamiento y se han establecido procedimientos que cubren los distintos aspectos del Proyecto.

EL PROGRAMA EXPERIMENTAL

El Acuerdo incluye la realización y análisis de ocho experimentos que se describen con detalle en otros artículos de este número de NUCLEAR ESPAÑA. Los investigadores españoles analizan los experimentos y contribuyen al contenido de los informes finales de comparación. A fin de garantizar tal participación se han asignado responsabilidades a cada institución participante y se han creado grupos de trabajo con un total de hasta treinta especialistas.

Al mismo tiempo, y de acuerdo con las cláusulas del Acuerdo, distintos investigadores se han desplazado a la instalación experimental, donde se ha seguido el desarrollo de los experimentos pendientes, se ha recogido información experimental y se ha participado en los análisis pre y post-experimentales. También se ha participado en las tareas de distintas instituciones europeas, en especial NIRA (Italia), Gesellschaft für Reaktor Sicherheit, (República Federal de Alemania), y Winfrith (Reino Unido) donde se trabaja en los informes de comparación.

En el momento actual se ha dado por concluido el programa experimental previsto inicialmente y se ha negociado una ampliación, o segunda fase, que consiste en el estudio detallado, a partir de ensayos no destructivos y destructivos, del combustible utilizado en el experimento LP-FP-2, en el que se alcanzaron de forma intencionada condiciones de presión y temperatura que supusieron la destrucción de algunas varillas combustibles bien instrumentadas.

EXPERIMENTO LP-FW-1. TRANSITORIO POR PERDIDA DE AGUA DE ALIMENTACION

El experimento consiste en provocar la pérdida de agua de alimentación al secundario e impedir la entrada en funcionamiento del sistema auxiliar de agua de alimentación. Entre los objetivos del experimento se encuentran:

- Determinar la eficacia de la operación inyección-laminado como procedimiento para extraer el calor residual.
- Verificar los modelos de cálculo utilizados para precedir la extracción de energía, y la evolución del inventario de refrigerante.
- Definir el procedimiento de operación idóneo para hacer frente a transitorios con pérdida del agua de alimentación.

El experimento se realizó con éxito el 20 de febrero de 1983.

En España el análisis se encomendó a UNESA, quien lo realizó a través del Departamento de Ciencias Aplicadas a la Ingeniería de la Universidad de Cantabria, contando con el apoyo técnico e informático de NUCLENOR. El ejercicio de evaluación ha concluido. Los análisis numéricos se han realizado con el código RELAP-5/MOD-1 Ciclo 19, con el que se ha reproducido, con aproximación razonable, la variación real de la mayor parte de los parámetros experimentales. El grupo de análisis estaba constituido por cinco técnicos.

EXPERIMENTO LP-SB-3. ROTURA PEQUEÑA EN EL PLENO INFERIOR

El experimento consiste en provocar una pérdida de refrigerante en el pleno inferior, equivalente a la rotura de una tubería de un diámetro de 2,5 a 5 cm. Las condiciones del experimento corresponden a requisitos reguladores impuestos en determinados países, como la República Federal de Alemania. El experimento persigue:

- Conocer los fenómenos físicos asociados y el comportamiento del sistema en caso de una pérdida de refrigerante a través del pleno inferior.
- Determinar la eficacia del sistema de inyección a alta presión para mantener el inventario de refrigerante.
- Validar los modelos de cálculo utilizados en la predicción de la evolución temporal de las distintas variables de interés.

El experimento se realizó el 5 de marzo de 1984. La responsabilidad del análisis

en España ha sido asumida por UNESA a través del grupo de Análisis de Accidentes de Unión Eléctrica-Fenosa. El Grupo de Análisis incluyó ocho titulados superiores, que han reproducido de forma muy satisfactoria los resultados al experimento.

EXPERIMENTO LP-O2-6. PERDIDA GRANDE DE REFRIGERACION EN RAMA FRIA

El experimento consiste en provocar una rotura tipo guillotina en la rama fría, con pérdida de energía eléctrica e inyección mínima de refrigerante de emergencia, de acuerdo con los requisitos establecidos en el documento 10CFR50 Appendix K de la NRC de los EUA. El objetivo del experimento reside en valorar el grado de conservadurismo que existe en los límites base de diseño que se especifican en el mencionado documento. Como en todos los casos anteriores, es también un objetivo fundamental la validación de los modelos matemáticos que se utilizan para precedir tales transitorios.

El experimento se realizó el 3 de octubre de 1983. El análisis de resultados se encomendó en España a la Cátedra de Tecnología Nuclear de la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid. El equipo de trabajo incluyó cinco titulados superiores, dos de ellos investigadores del Proyecto PIACR de UNESA/UPM. Se utilizó el código TRAC-PD2 y los resultados teóricos predicen bien los experimentales.

EXPERIMENTOS LP-SB-1 Y LP-SB-2. ROTURAS PEQUEÑAS EN LA RAMA CALIENTE CON FUNCIONAMIENTO RETARDADO Y CONTINUO DE LA BOMBA

Esta pareja de experimentos consiste en provocar una rotura pequeña equivalente a un círculo de 5 a 8 cm. de diámetro en la rama caliente. El experimento tiene como objetivo fundamental analizar los fenómenos físicos que tienen lugar en tales circunstancias, y la capacidad de los modelos matemáticos para predecir la evolución de los parámetros más significativos.

El experimento LP-SB-1 se realizó el 23 de junio y el LP-SB-2 el 24 de julio de 1983. El análisis de este experimento se ha encomendado en España al Consejo de Seguridad Nuclear, quien lo realiza con la colaboración de UNESA a través del Grupo Termohidráulico de la central nuclear de Almaraz. El equipo de trabajo incluye seis titulados superiores, uno de los cuales se halla desplazado a Winfrith (Reino Unido). Se utilizan diversos códigos de las series RELAP y TRAC.

EXPERIMENTOS LP-FP-1 Y LP-FP-2. COMPORTAMIENTO DE PRODUCTOS DE FISION

El experimento LP-FP-1 consistió en provocar una rotura grande con inyección de refrigerante de emergencia en la rama fría y retardo en la actuación de los sistemas de aportación de refrigerante. El experimento LP-FP-2 incluyó el establecimiento de condiciones de explotación más extremas, hasta llegar al deterioro del combustible, con liberación de productos de fisión y generación de aerosoles.

Entre los objetivos fundamentales de ambos experimentos se incluyen:

- Conocer los fenómenos físicos asociados al comportamiento de los productos de fisión en el interior del combustible, su transporte hasta el huelgo, escape a través de las vainas deterioradas y comportamiento en el interior de la vasija, sistema de presión y sistema de contención.
- Conocer los fenómenos físicos asociados a los aerosoles generados como consecuencia del daño catastrófico producido en la sección de ensayo.
- Validar los modelos teóricos utilizados para predecir el comportamiento de los productos radiactivos y aerosoles en caso de accidente.

El experimento LP-FP-1 se realizó el 19 de diciembre de 1984 con éxito razonable y el LP-FP-2 el 16 de julio de 1985, también con éxito. La responsabilidad del análisis en España del experimento LP-FP-1 se ha asignado a la Junta de Energía Nuclear, ahora CIEMAT. La del FP-2 a ENUSA, con participación de especialistas suministrados por UNESA y la UPM. A causa de la naturaleza de ambos experimentos se han establecido relaciones formales entre ambos grupos y cabe esperar también una mayor participación de otras instituciones.

VALORACION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos por España como consecuencia de su participación en el Acuerdo LOFT-OCDE pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Los derivados directamente.
- Los de naturaleza indirecta.

Entre los primeros cabe contar con:

- El conocimiento adquirido por los participantes sobre los fenómenos físicos que tienen lugar en los reactores de agua ligera en caso de transitorios de naturaleza termohidráulica, con y sin deterioro del combustible, y que no

habían sido objeto anteriormente de tratamiento experimental.

- b) El acceso a códigos de cálculo complejos y validados para analizar dichos fenómenos.
- c) La formación de usuarios validados de tales códigos, tanto desde el punto de vista técnico como informático.

Entre los beneficios de naturaleza indirecta cabe contar con los siguientes:

- a) El establecimiento de relaciones directas de naturaleza científica y técnica con instituciones de otros países tecnológicamente más avanzados del área de la OCDE.
- b) El establecimiento de relaciones institucionales dentro del propio país, con una mejor definición de las misiones y responsabilidades de cada parte institucional.
- c) La definición de futuros programas de investigación, desarrollo y demostración óptimos en cuanto a la participación y objetivos.

En este momento los expertos españoles conocen con precisión los códigos termohidráulicos de las series RELAP y TRAC, que utilizan en el análisis de plantas reales, y participan con autoridad en congresos nacionales e internacionales. De igual forma se está adquiriendo una maestría considerable en el análisis y conocimiento de los modelos de cálculo relativos al comportamiento de productos de fisión en condiciones extremas.

Es claro que la *cuenta de beneficios* haya de ser función, por una parte, de las características, situación actual y perspectivas futuras del desarrollo nuclear del país. Por otro lado, deberá depender de la organización institucional del país.

De entre las *características más salientes* de nuestro desarrollo nuclear se ha de destacar la importancia de ser España un país que ha alcanzado cotas muy elevadas en cuanto a la participación nacional y que es responsable de la explotación, en todos sus sentidos, de su parque nuclear; que es significativo.

Desde el *punto de vista institucional*, la situación española incluye cinco componentes bien diferenciados:

- a) El organismo regulador.
- b) La institución estatal responsable de la investigación.
- c) La industria de suministro eléctrico.
- d) Las empresas estatales responsables del ciclo del combustible.
- e) Las instituciones docentes.

En esta relación no se incluyen las em-

presas de ingeniería y servicios que no participan directamente en el Convenio.

Los beneficios de la participación de España en el Acuerdo LOFT-OCDE se han de medir, por tanto, dentro de la matriz institucional y de características que se ha descrito.

ADQUISICION DE CONOCIMIENTOS

La adquisición de conocimientos se puede valorar en función de la capacidad para explicar resultados discordantes, la creatividad y la aplicación de los conocimientos a otros casos de interés, cuyos resultados se pueden contrastar con otros, en principio más competentes. En este campo se puede decir que los investigadores españoles han entrado en la intimidad de los fenómenos físicos y de los modelos matemáticos, y han explicado las razones de algunas discrepancias encontradas entre los resultados experimentales y los teóricos, habiendo así definido los límites de validez de algunos códigos de cálculo.

La creatividad ha quedado también demostrada en los ejercicios que se han realizado para simplificar la nodalización de algunos experimentos, sugerir modificaciones en algunos códigos, participar en la caracterización teórica de especies químicas y desarrollar enlaces informáticos para obtener soluciones gráficas. Desde el lado de la aplicación de conocimientos a casos prácticos merece destacar los cálculos realizados por el grupo de análisis del experimento LP-SB-3 al caso de las centrales nucleares José Cabrera y Trillo, que se exponen en otro artículo de este número de NUCLEAR ESPAÑA.

DISPONIBILIDAD DE CODIGOS DE CALCULO

Uno de los objetivos fundamentales que busca el Convenio es la validación de códigos de cálculo. Por su propia complejidad, España no ha desarrollado códigos propios, si bien dispone de los que puede obtener a través de la Agencia de Energía Nuclear u otras instituciones internacionales. Se ha de entender que instituciones españolas individuales dispongan de códigos de naturaleza comercial y uso restringido.

Para el análisis de los aspectos termohidráulicos, los investigadores españoles disponían del RELAP-5/MOD-1 y del TRAC-PD2/MOD-1 que se encontraba a punto en diversas instituciones antes de la firma del Acuerdo. Sin embargo, se sabía que existían otras versiones o ciclos de dichos códigos más avanzadas o específicas que tenían carácter restringido y no eran asequibles. De entre ellas cabe

destacar RELAP-5/MOD-2, TRAC-PF-1/MOD-1 y TRAC-BD1/MOD-1, entre otros.

Aunque la validación de los códigos directamente asequibles constituía en sí misma un beneficio considerable, el valor de la participación crecía en el caso de tener acceso a dichas nuevas versiones. Aunque la participación en el Acuerdo no significaba el acceso directo, éste ha estado garantizado a través del Acuerdo bilateral en materia de investigación en seguridad nuclear, suscrito entre el Consejo de Seguridad Nuclear de España y la Nuclear Regulatory Commission de los EUA. Ello permite poner en manos de los investigadores españoles versiones no públicas de los códigos termohidráulicos.

El análisis del comportamiento del combustible, productos de fisión y aerosoles generados en caso de daño catastrófico al combustible se lleva a cabo utilizando códigos complejos, algunos de los cuales se encuentran todavía en desarrollo y validación parcial. En este campo, los investigadores españoles disponían de una fracción muy pequeña de códigos, de entre los que destacan ORIGEN-2, FRAPCON-2 y FRAP-T6. Sin embargo, el análisis de los experimentos LP-FP-1 y LP-FP-2 no podría llevarse a cabo con sentido sin contar con códigos de cálculo tales como TRAP-MELT, SCDAP, SOLGASMIX y TIGER, que ya son asequibles a través del mencionado Acuerdo.

BENEFICIOS A LARGO PLAZO

Los beneficios que cabe esperar a largo plazo están fundamentalmente ligados a la explotación del parque nuclear español. Estos beneficios se podrían medir por parámetros, tales como:

- a) Mejor conocimiento de los márgenes de diseño y características de explotación de las centrales nucleares españolas.
- b) Mayor contribución de la industria española en el diseño y fabricación de los sistemas hidráulicos de las futuras centrales nucleares.
- c) Mayor contribución en el diseño de los elementos combustibles y de los núcleos de recarga, con mejoras en la utilización y en la seguridad.
- d) Puesta en práctica de programas de investigación y desarrollo en áreas de termohidráulica, comportamiento del combustible, física de aerosoles y desarrollo de la tecnología de la descontaminación entre otros aspectos.

Aunque todo lo anterior son valores futuros, sin embargo, por parte del Comité de Dirección del Convenio LOFT-OCDE-ESPAÑA, se están analizando e impulsando estos aspectos.