



Ricardo SALVE GALIANA es Ingeniero Industrial, Especialidad Técnicas Energéticas, por la ETSII (1985) y Master en Dirección de Producción por la Cámara de Comercio e Industria de Madrid (1993). Comenzó su actividad profesional en Empresarios Agrupados en el departamento mecánico, colaborando en los proyectos de Trillo y Valdecaballeros. En 1986 se incorporó a UNESA para trabajar en el proyecto LOFT como investigador. Desde 1987 ha colaborado en la gestión del Plan de Investigación en Accidentes Severos de UNESA asumiendo la dirección técnica de los proyectos PHEBUS, LACE y ACE. En la actualidad es Secretario del Grupo de Investigación Nuclear de UNESA.

EL MODELO DE INVESTIGACION DE HALDEN

R. SALVE

Por varios motivos, el proyecto Halden constituye un buen ejemplo de colaboración internacional e interinstitucional que puede reportar beneficios claros a los participantes. Los orígenes del proyecto, su evolución posterior y su estado actual, ya consolidado tras 36 años de funcionamiento, ilustran sobre el **porqué**, el **para qué** y el **cómo** establecer alianzas multiorganizacionales en la I+D nuclear.

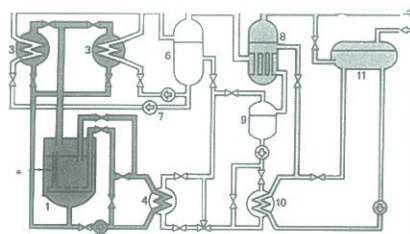
PORQUE

En primer lugar, la iniciativa del proyecto allá por 1955, fue nacional, no prove-

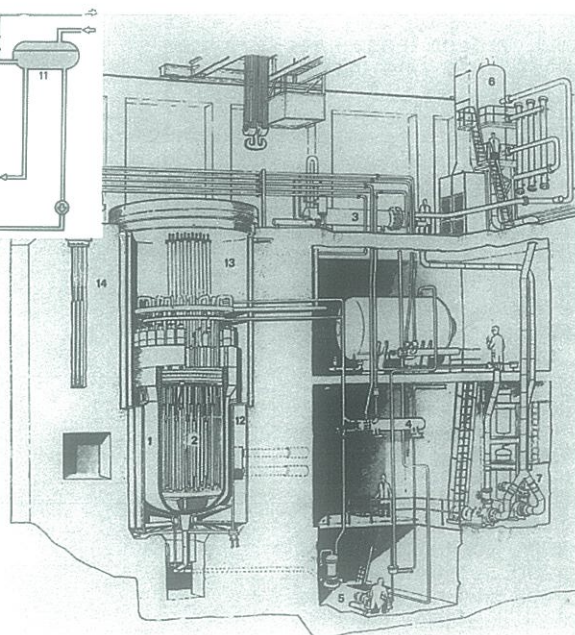
niente de un estímulo externo, demostrando con ello que una cultura investigadora arraigada, un apoyo político decidido e, incluso, un liderazgo técnico-científico personal, constituyen el punto de partida adecuado. En efecto, el proyecto nació en el seno del IFA (Institute for Atomic Energy) de Noruega, con el impulso de destacadas personalidades del ámbito científico, el apoyo económico de la industria (de agua pesada, papelera) y disfrutó de una tramitación político-administrativa rápidamente resuelta.

Sólo una vez en marcha el proyecto a nivel nacional comenzó a tomar cuerpo

FI Reactor Halden



1. Vasija del reactor
2. Núcleo
3. Cambiador de calor
4. Subenfriador de D₂O
5. Bomba del Subenfriador
6. Calderín
7. Bombas de La Mont
8. Generador de vapor
9. Depósito caliente
10. Subenfriador de H₂O
11. Tanque de agua de alimentación
12. Blindaje
13. Mecanismo de accionamiento de barras de control
14. Foso de almacenamiento de combustible



la idea de abordarlo en el marco de la cooperación internacional. La dimensión técnico-económica del mismo y el ambiente político favorable, condujeron al establecimiento de acuerdos internacionales bien definidos en coste y plazo. Así, en junio de 1958 se firman los acuerdos bilaterales de Noruega con los participantes: el Euratom (Bélgica, Francia, Alemania, Inglaterra, Luxemburgo y Holanda), el Reino Unido, Suecia, Suiza, Austria y Dinamarca, todo ello en el marco de la OCDE. Se financia un programa de tres años de duración y se establece un esquema organizativo. Como después veremos este es un modelo que, tras casi cuarenta años, es válido y continúa utilizándose.

Como resultado de todo ello, un país pequeño (hoy aún sin CC.NN. en funcionamiento), en un plazo breve (la decisión parlamentaria preliminar tuvo lugar en Junio de 1955 y el reactor tuvo su primera criticidad en Junio de 1959) fue capaz de obtener la financiación de 11 países para contar con una instalación propia de tecnología punta. Digamos pues que Halden nació porque en Noruega existían el clima, el interés y el apoyo necesarios, porque la dimensión del proyecto sobrepasaba la capacidad propia y porque la situación internacional lo propiciaba. Esta secuencia, y no la inversa, parece la más lógica.

PARA QUE

La explotación rentable y segura de una instalación de producción durante el mayor tiempo posible, es el objetivo natural de cualquier industria, tanto más de la nuclear. En nuestro caso, hay dos circunstancias adicionales que aumentan el interés por este objetivo:

- Un futuro indefinido de la actividad
- Una dificultad previsible para encontrar nuevos emplazamientos.

Básicamente, la tecnología incorporada en la mayor parte de las CC.NN. actualmente en operación, es de los años setenta. La mejora de los índices de explotación y seguridad del parque actual y el alargamiento de su vida útil, pasan por el establecimiento de programas de I+D que faciliten la incorporación las nuevas tecnologías atendiendo a criterios de coste-beneficio. Como reconoce el PEN, la situación es generalizada a nivel internacional y el coste asociado es alto, lo cual conduce inevitablemente a programas internacionales de cooperación.

Las peculiaridades de cada parque, e incluso de cada diseño, hacen que la respuesta deba adaptarse a cada caso. Por este motivo, la participación en programas internacionales no es suficiente para satisfacer las necesidades propias. Aquella debe completarse con proyectos nacionales. Este enfoque es fundamental para el éxito de la investigación: la participación en programas interna-

cionales debe concebirse como un medio, no como un fin en sí mismo. La investigación a través de proyectos internacionales no puede sustituir a la investigación nacional. Deben por lo tanto instrumentarse mecanismos de absorción, transformación y aplicación de la tecnología obtenida a través de la cooperación internacional.

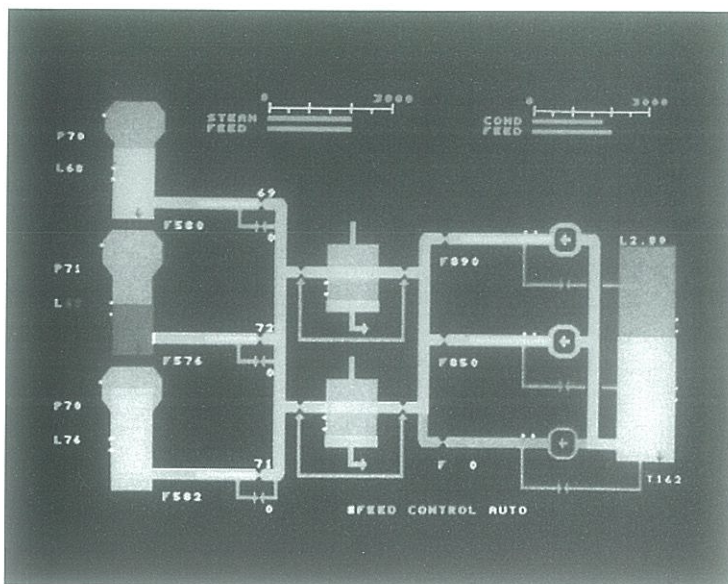
Para una industria de las características de la nuestra (no puntera en tecnología nuclear) y en un entorno como el actual (moratoria nuclear), la consecución de cierto grado de liderazgo tecnológico en el área de la explotación y la seguridad, ofrece la oportunidad de competir en los mercados internacionales, "rentabilizando" así los recursos puestos a disposición del mercado nacional, muy limitado, y buscando la plena ocupación y permanente actualización de esos recursos. Cabe señalar que la situación de la tecnología en nuestro país es tal que, si bien no permite detenerse en todos los aspectos de la investigación básica, sí puede dar respuesta a gran parte de las necesidades de desarrollo tecnológico que en buena medida se basan en software.

En lo que se refiere a Halden, éste da respuesta a una serie de necesidades concretas relacionadas con la explotación:

- Mejorar la economía de la explotación

Los costes asociados al ciclo del combustible nuclear tienen un peso relativamente pequeño en el coste total de generación. Existe sin embargo interés en buscar su máxima economía, siendo uno de los medios para ello el incremento del grado de quemado, reduciendo así a la vez el volumen de residuos. Este objetivo económico es parejo al de aumentar al máximo la fiabilidad del combustible de modo que, como en otras actividades industriales, se impone la filosofía de "cero defectos", lejos de los actuales 10 o más fallos por año por cada millón de barras.

La operación del combustible a mayor temperatura, durante más tiempo o con químicas del agua del primario diferentes, comporta mayores riesgos de co-



F II Sistema HALO

rosión en la vaina y de fallos por PCI ("Pellet Cladding Interaction"). Por otro lado, en la búsqueda de mayor flexibilidad (seguimiento de carga) se somete al combustible a unas condiciones cuyos efectos deben conocerse con precisión.

- Prologar la vida útil de las CC.NN.

El conocimiento y cuantificación de los fenómenos de degradación de componentes y sistemas es esencial, tanto para operar de forma segura como para gestionar la vida remanente. Al ambiente agresivo en el que trabajan los materiales -no sólo los de las barras combustibles- se añade la irradiación neutrónica.

Halden presenta, como una de sus características más destacadas y de especial interés para nuestro país, la de ser un banco de pruebas experimental en el que se puede someter a los materiales en estudio a unas condiciones de trabajo iguales a las reales (en PWR's o BWR's), incluida la irradiación neutrónica.

- Aumentar la seguridad en la operación.

Mediante la incorporación de los recientes avances en materia de instrumentación y control de procesos -área esta en la que se hace más evidente la obsolescencia tecnológica- se puede, por un lado, aumentar su fiabilidad y, por otro, minimizar las probabilidades de errores humanos.

Pueden obtenerse mejoras sustanciales en la monitorización de procesos, en el procesamiento de datos -incluyendo capacidades predictivas- y en la fiabilidad de la información presentada. En las salas de control convencionales la información disponible para el opera-



F III ISACS - 1

dor es superabundante y está excesivamente distribuida físicamente, requiriendo desplazamientos continuos por parte de la tripulación. Mediante la concentración, selección y presentación amigable de esta información se puede reducir al riesgo de errores por parte del operador.

Medios para todo ello son la exhaustiva utilización de CRT's (táctiles o no), la implantación de sistemas de filtrado de alarmas, la utilización del control distribuido para minimizar fallos del equipo de control y la automatización de acciones rutinarias del operador. El uso de la tecnología digital puede conducir a una mayor abundancia de información, por lo que se hace necesario integrarla en sistemas compactos. Por su parte, el software y el hardware utilizados precisan ser validados metódica y exhaustivamente.

COMO

La participación internacional en el proyecto ha presentado ligeras variaciones a lo largo de 12 acuerdos de vigencia trianual. La representación es fundamentalmente oficial (institutos de investigación, organismos reguladores o ministerios). El acuerdo decimosegundo, que cubre el período 1994-1996, contará con la participación de instituciones de Noruega, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Alemania, Italia, Japón, España, Suecia, Suiza, Reino Unido y EE.UU. En cinco de estos doce países, se han constituido consorcios o firmado acuerdos nacionales con otras organizaciones. En el caso español, la organización signataria del acuerdo internacional es CIEMAT, habiéndose constituido un consorcio nacional con el CSN, ENUSA y UNESA, al que recientemente se ha incorporado TECNATOM.

Nuestro país cuenta ya con una cierta

experiencia en el terreno de la colaboración internacional en I+D. Basta con recordar, en el pasado reciente, a proyectos como LOFT (también en el ámbito de la OCDE), ICAP, LACE o ACE que, atendiendo a necesidades técnicas diferentes, presentan características muy similares a Halden.

En particular, el esquema

organizativo, tanto a nivel internacional como a nivel nacional es bastante típico y consiste en:

- A nivel internacional.

- Un órgano rector del proyecto (Halden Board of Management, HBM), compuesto por delegados de los países participantes, que aprueba los programas y presupuestos que le son presentados. El HBM informa de sus actividades a la NEA de la OCDE.
- Un órgano técnico (Halden Programme Group, HPG), en donde participan los responsables técnicos de las instituciones signatarias y que tiene la responsabilidad de la formulación de los programas y la supervisión técnica de su desarrollo.
- Una dirección del proyecto perteneciente al personal del centro y responsable de la ejecución del programa.
- El personal técnico puesto a disposición del programa, que incluye técnicos desplazados de las instituciones participantes.

El presupuesto para el trienio 1994-96 asciende a 225 millones de coronas noruegas (4300 Mpta aproximadamente) y es financiado por todos los países. La contribución noruega es la mayor (38%) y la española supone un 3,1%. Comparando el esquema con el de otros proyectos ya mencionados, se observa que, por las características del país anfitrión (país de pequeño peso específico en el concierto internacional y sin CC.NN en operación), por el sistema de votación (un país, un voto y mayoría de 2/3) y por la duración de los programas (limitada a 3 años), la adopción de decisiones y el establecimiento de líneas de actuación tienen lugar de forma bastante equilibrada.

En otros proyectos en los que no concurren las anteriores circunstancias, (por ejemplo, son promovidos por "grandes" instituciones nacionales como la NRC o EPRI, con grandes apor-

taciones económicas propias y con un liderazgo tecnológico evidente) es inevitable cierto sesgo en las decisiones, incluso en proyectos al abrigo de la OCDE (TMI-2 VIP, LOFT).

No obstante, la experiencia demuestra que, en prácticamente todos los casos, las decisiones suelen adoptarse por consenso o por muy amplia mayoría y no suele recurrirse a votaciones. El papel predominante del "anfitrión" suele ponerse únicamente de manifiesto en decisiones con un impacto presupuestario importante ya que, en la práctica, la dirección del proyecto (generalmente del país anfitrión), es la responsable de su cumplimiento. En estas condiciones las "habilidades" (de comunicación, tecnológicas) o peso específico personal de los representantes en los órganos internacionales, juegan un papel fundamental.

- A nivel nacional

La participación en proyectos internacionales de I+D hace posible un posicionamiento tecnológico tal que evita acudir a los mercados internacionales de tecnología para comprarla. Esta ventaja puede perderse si no se produce el adecuado retorno tecnológico como consecuencia de la participación y éste, a su vez, es función de la "predisposición" tecnológica nacional (o sectorial, para ser más concretos). Todo ello conduce a la necesidad de instrumentar adecuadamente la participación. De la misma forma que la organización internacional de Halden responde a un patrón bien establecido y consolidado, la organización nacional responde a un esquema también típico para este tipo de proyectos:

- Se constituye un consorcio nacional con aportaciones económicas de las instituciones interesadas y se forma un "pool" de recursos (económicos y humanos, fundamentalmente). De esta forma se facilita la difusión de la tecnología adquirida y se sientan las bases de una aplicación futura "armónica" (binomios proveedor/cliente, regulador/regulado).
- Existe una organización "líder" del proyecto. Este liderazgo puede provenir de:

- Una mayor aportación económica
- Un interés técnico claro por el tema
- "Otros motivos" (por ser la organización homóloga del convocante internacional, por ejemplo).

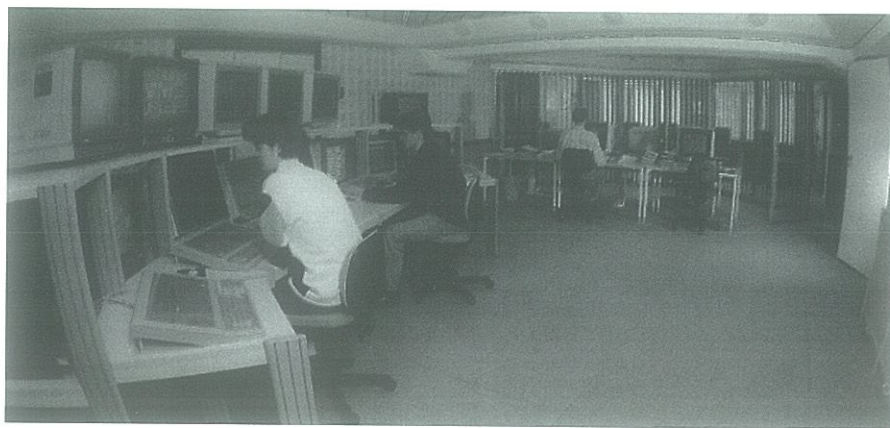
Lo ideal es que las tres motivaciones coincidan, de lo contrario es previsible la aparición de tensiones que dificultarán el normal desarrollo del proyecto. También esto puede desembocar en un total desinterés por el mismo.

La traducción práctica de este esquema se materializa en:

- Un Comité de Dirección con representación de todas las partes, presidido por un alto responsable de la organización líder que, a su vez, es el representante en el máximo órgano internacional. La presidencia a cargo

del MINER es otra solución habitual, igualmente deseable.

- Una jefatura de proyecto, que se responsabiliza de la representación en el órgano técnico internacional.
- Un Grupo de proyecto, constituido por personal de las organizaciones participantes.
- Unos técnicos desplazados al centro extranjero donde se realiza la investigación.



F IV Laboratorio HAMMLAB

En el caso particular de Halden:

- Las aportaciones se distribuyen igualitariamente entre las partes.
- Hay dos jefes de proyecto, uno por cada área de trabajo (interacción hombre-máquina y combustible-materiales), pertenecientes al CSN y ENU-SA respectivamente.
- Hay dos Grupos de proyecto (Comités de seguimiento)

El reconocimiento de la necesidad de arbitrar medios para "absorber" y aplicar adecuadamente y con garantías de éxito la tecnología a la que se tiene acceso en el proyecto internacional ha conducido, en el caso de Halden, al establecimiento de otros proyectos de investigación específicos, promovidos por las organizaciones interesadas y que veremos más adelante.

Desde la perspectiva del Sector Eléctrico (que promueve 3 de los proyectos antes aludidos), el proceso de gestación de un proyecto es largo y en la práctica consume varios meses, sobre todo para un proyecto de este tipo. En la fase inicial del proceso se elabora una memoria de proyecto o documento base que va sufriendo un trámite de aprobación por etapas. En cada etapa hay que buscar el consenso de posturas, en ocasiones bastantes distintas. Por un lado, deben confluir los intereses de las organizaciones españolas participantes, lo cual obliga a adquirir compromisos en la negociación que deberán ser ratificados interiormente por cada parte. Por otro lado, a nivel internacional ocurre otro tanto. Aunque el planteamiento de un proyecto internacional supone la existencia de un objetivo común, la cuantificación del mismo y la forma de llevarlo a efecto es "país-dependiente". Esto obliga, a su vez, a asumir compromisos y a disminuir el nivel de concreción de la propuesta inicial. En el caso de nuestro país, dada su capacidad tecnológica, los elementos fundamentales de la negociación suelen ser la aportación económica española y el esquema participativo a seguir. La participación en proyectos internacionales ya en curso, aunque constituye

un caso no deseable desde el punto de vista técnico, en lo que a la agilidad de la tramitación de la incorporación al mismo se refiere, supone una situación más favorable.

Es decir, en algunos casos, antes de que la memoria del proyecto se proponga para la aprobación interna del Sector, ya ha sido sometida a modificaciones transaccionales respecto a la idea original, adoptadas con criterios técnicos o de eficiencia funcional (si los criterios iniciales eran de otro tipo, el resultado final es imprevisible). De esta forma, la estructura decisoria del Sector se encuentra con un dilema inicial: Asumir los compromisos transaccionales adoptados hasta esa fecha, o reabrir el proceso de negociación. Lo primero implica, entre otras cosas, aceptar puntos de vista ajenos al Sector, posiblemente limitar el espectro de colaboradores o subcontratistas y asumir cierto grado de dificultad en la "traceabilidad" o seguimiento del proyecto y su control por un doble motivo: el grado de definición del proyecto es menor y el poder de decisión está más distribuido. Lo segundo -reabrir el proceso de negociación- implica introducir mayores retrasos en la tramitación y asumir el riesgo de no aceptación por parte de terceros.

En el Comité de Aplicación confluyen todas las propuestas que buscan financiación con cargo a los fondos del PIE administrados por OCIDE, no sólo los proyectos del área nuclear, provenientes del Grupo de Investigación de UNESA. De nuevo es necesario conjugar diversos intereses y opiniones, resultando incluso posible que, existiendo consenso sobre el proyecto entre especialistas de todas las empresas y centrales, sus representantes en el Comité de Aplicación lo desestimen. En el caso de que el Comité se pronuncie favorablemente, la propuesta pasa a OCIDE quien realiza a su vez otra valoración y dictamina si se financia o no y, en el primer caso, en qué proporción. Antes de ello, suele darse un proceso negociador, en ocasiones largo, en donde se

solicitan aclaraciones o se imponen condiciones para su aprobación. Este trámite, por sí sólo, puede llegar a consumir períodos de tiempo de hasta 20 meses (es el caso de Halden) y es la etapa más delicada del proceso. Resulta ilustrativo comparar este proceso y sus plazos asociados con el descrito al comienzo del artículo en relación con el nacimiento del propio proyecto internacional Halden en los años 50.

LAS POSIBILIDADES DE HALDEN

Halden ofrece la posibilidad de dar respuesta a buena parte de las necesidades descritas en este artículo. Para ello cuenta básicamente con los siguientes medios materiales:

- Un reactor de agua pesada en ebullición (HBWR)
- Unos dispositivos de irradiación de materiales
- Una instrumentación de desarrollo propio
- Unos laboratorios de análisis de muestras irradiadas
- Una sala de control experimental y un simulador.

El reactor es de circulación natural y alcanza una potencia térmica de 25 MW con una temperatura del agua de 240°C a una presión de 33,3 bar. El circuito contiene 14 toneladas de agua pesada que actúa como refrigerante y moderador. El agua mezclada con vapor asciende por el interior de unas cápsulas semisumergidas que contienen el combustible, descargándose la mezcla en la zona superior de la vasija (por encima del nivel del líquido) a través de unas perforaciones practicadas en la propia cápsula. El vapor condensado regresa a la masa líquida y vuelve a penetrar en las cápsulas por su parte inferior. El vapor saliente de la vasija transfiere su calor a un circuito de agua ligera a través de un cambiador de calor. Existe un tercer circuito adicional que finalmente genera vapor de proceso que es utilizado por una industria cercana.

Los dispositivos de irradiación constituyen circuitos cerrados de agua ligera a las condiciones de operación de los PWR y BWR (hasta 165 bar y 340°C) y están aislados del agua pesada. Una parte del circuito es una cápsula sumergida en el agua pesada de la vasija que puede contener en su interior elementos combustibles LWR para su prueba. Estos dispositivos ofrecen la

oportunidad de estudiar el comportamiento de materiales en condiciones reales de operación, de especial interés para un país como el nuestro que no cuenta con reactores experimentales.

Desde sus orígenes, el proyecto ha desarrollado numerosos dispositivos de medida para determinar parámetros básicos en el estudio del comportamiento del combustible y otros materiales. El hecho de ser un reactor moderado por agua pesada permite disponer de mayor espacio en la vasija para alojar instrumentación. Termómetros gamma, detectores de neutrones, termopares de alta temperatura (hasta 2.500°C), extensómetros y diferentes tipos de sensores, son ejemplos notables.

La sala de control experimental HAMMLAB (Halden Man-Machine Laboratory) puede conectarse al simulador PWR de alcance total NORS. En este entorno pueden validarse diversos desarrollos del área hombre-máquina, aspecto este fundamental y previo a su aplicación a planta. Como ejemplo de aquellos pueden citarse varios COSS (Computerized Operator Support Systems): el sistema de gestión de alarmas HALO (Handling Alarms using Logic), el sistema de detección temprana de fallos, el sistema computerizado de procedimientos COPMA y el sistema de vigilancia del núcleo SCORPIO. Otros desarrollos no son totalmente originales, sino evolución de versiones cedidas a Halden (por ejemplo el SPMS, Success Path Monitoring System).

La profusa utilización de CRT's (incluso táctiles) conduce a un exceso de información presentada al operador que puede ser el origen de más errores humanos. Mediante el desarrollo del sistema integrado de vigilancia y control ISACS, se estructura, concentra y prioriza la información disponible.

La propuesta de actividades a realizar en nuestro país contempla el seguimiento global del programa internacional y la concentración de esfuerzos en algunos aspectos específicos de la oferta Halden.

En el área de combustible-materiales, los participantes españoles han considerado prioritario centrarse sobre los siguientes temas: los efectos de alto quemado (degradación de la conductividad térmica del UO_2 , la liberación de gases de fisión, el hinchamiento de la pastilla), el comportamiento del combustible con gadolinio, los efectos de las inestabilidades sobre el combustible BWR, la fluencia mecánica de la vaina, la corrosión e hidruración de la

vaina, el efecto de diversas químicas del primario, la fragilización de aceros de vasija y el envejecimiento de materiales estructurales del combustible (incluyendo irradiación).

Con el objeto de aprovechar al máximo la participación en el programa internacional, el Sector Eléctrico propone examinar la problemática particular de interés para cada CCNN en lo relacionado con la corrosión asistida por irradiación, bajo un nuevo proyecto: "Corrosión asistida por irradiación en materiales estructurales y vaina de combustible". Los materiales de los "internals" considerados serán algunos de los no estudiados en el Proyecto PICI, tal como el inoxidable AISI 348 y el metal de soldadura AISI 308. Se propone realizar ensayos de mecánica de fractura para la obtención de datos de velocidad de crecimiento de grieta en condiciones simuladas de operación del reactor y a potenciales de corrosión semejantes a los utilizados para los ensayos de materiales irradiados.

Dado que la segregación de elementos en el borde de grano provocada por la irradiación puede contribuir al fallo de algunos materiales en principio no susceptibles a corrosión bajo tensión, es importante disponer de

técnicas de análisis capaces de detectar este fenómeno. Por tanto se pretende poner a punto la técnicas de análisis por microscopía Auger para la detección de elementos en bordes de grano en material no irradiado. La simulación de la segregación de elementos provocada por irradiación se realizará mediante tratamientos térmicos de los materiales.

Una propuesta adicional en el área de combustible-materiales, aún no totalmente definida, es la investigación del comportamiento del termómetro gamma desarrollado en el marco del PIE.

En el área de interacción hombre-máquina se propone prestar mayor atención a la identificación de problemas, pruebas y evaluación de COSS, a análisis y modelización de errores humanos y al desarrollo de bases técnicas para la formulación de guías de evaluación de COSS. Por los mismos motivos apuntados en el área de combustible-materiales, el Sector Eléctrico ha propuesto el proyecto "Programa en sistemas hombre-máquina" que, en varias fases, pretende adaptar COSS a plantas españolas. Estas fases contemplan la adaptación del sistema HALO a los simuladores PWR y BWR españoles, su validación con población de instructores y su validación final con población de operadores.

Animado del mismo objetivo, el CSN emprende un proyecto específico para la adaptación de la herramienta COPMA (Computerización de procedimientos de operación) a los procedimientos de una central ejemplo.

CONCLUSIONES

El Proyecto Internacional Halden nace de una voluntad decidida a nivel local (Noruega) y se ve favorecido por un clima adecuado dentro y fuera del país: se trata de un ejemplo ilustrativo. El modelo de investigación representado por Halden no es nuevo ni exclusivo, se ha aplicado en otros proyectos tanto en el extranjero como en nuestro país. La experiencia demuestra que el esquema es válido con tal de que concurren una serie de condiciones, tales como la concepción de la participación como un medio (no como un fin) y la instrumentación adecuada de la asimilación, adaptación y transformación de la tecnología a la que se tiene acceso. Los proyectos nacionales propuestos al socaire del proyecto internacional Halden permiten ser optimistas al respecto.

FV Esquema del dispositivo de irradiación para el estudio de la corrosión de la vaina.

