

ASPECTOS TERMOHIDRAULICOS DEL PROYECTO OCDE-LOFT

Alfredo LOPEZ, Fernando PELAYO, Juan J. PEÑA, José PUGA,
Asunción QUEROL y Luis REBOLLO.

PROYECTO LOFT

Los ocho experimentos realizados dentro del proyecto fueron planeados por expertos de todos los países participantes, excepto España que, como se sabe, se incorporó cuando el programa ya estaba avanzado. Los experimentos se eligieron para obtener información necesaria para conocer el comportamiento del reactor ante una pérdida de agua de alimentación, roturas grandes y roturas pequeñas.

En este artículo se presenta un resumen de los aspectos termohidráulicos de los experimentos, así como de los cálculos realizados en España, hasta la fecha, por los distintos grupos de análisis que se han organizado dentro del proyecto. También se referencian los aspectos de desarrollo y validación de códigos y asimilación de tecnología inherentes al mismo.

INTRODUCCION

El material de trabajo básico para analizar los resultados de cada experimento, lo constituyen:

- Los datos medidos en la instalación durante el desarrollo del experimento.
- Las herramientas de cálculo; en general, códigos de ordenador.

Ambas cosas han sido adquiridas dentro de la participación en el programa OCDE-LOFT: los datos como una consecuencia inmediata y los códigos como una aportación del Consejo de Seguridad Nuclear, gracias a sus acuerdos con la USNRC.

EL PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa OCDE-LOFT es confidencial, con la excepción del experimento LP-02-6 que se describe al final.

Los datos experimentales se han recibido como ficheros en cintas magnéticas.

Dado el carácter experimental de la instalación LOFT, ésta disponía de una instrumentación buena y adecuada. Todos los parámetros importantes y con posibilidad de ser medidos, han quedado registrados por el sistema de adquisición de datos de la planta. No obstante, en el desarrollo real de un experimento hay sucesos imprevistos y, por tanto, no está programado su registro; así, ha habido fallos en el cierre de determinadas válvulas, de las que no se dispone de medidas de caudal, lo que dificulta la interpretación de algunos resultados experimentales.

En los experimentos de productos de fisión, los fenómenos termohidráulicos, por su menor importancia relativa en este

caso, tienen carencias en el registro de variables importantes para su análisis.

LOS CODIGOS DE ORDENADOR

Gracias a la participación española en el proyecto LOFT, los grupos de cálculo han tenido acceso a los códigos termohidráulicos más avanzados de análisis de transitorios. Todos ellos son de naturaleza «best estimate», es decir, tratan de simular los fenómenos de una manera realista, sin utilizar modelos simples y de naturaleza conservadora como hacen los códigos de licenciamiento actuales. En la Tabla I, se resumen las características más importantes de los códigos empleados en los análisis.

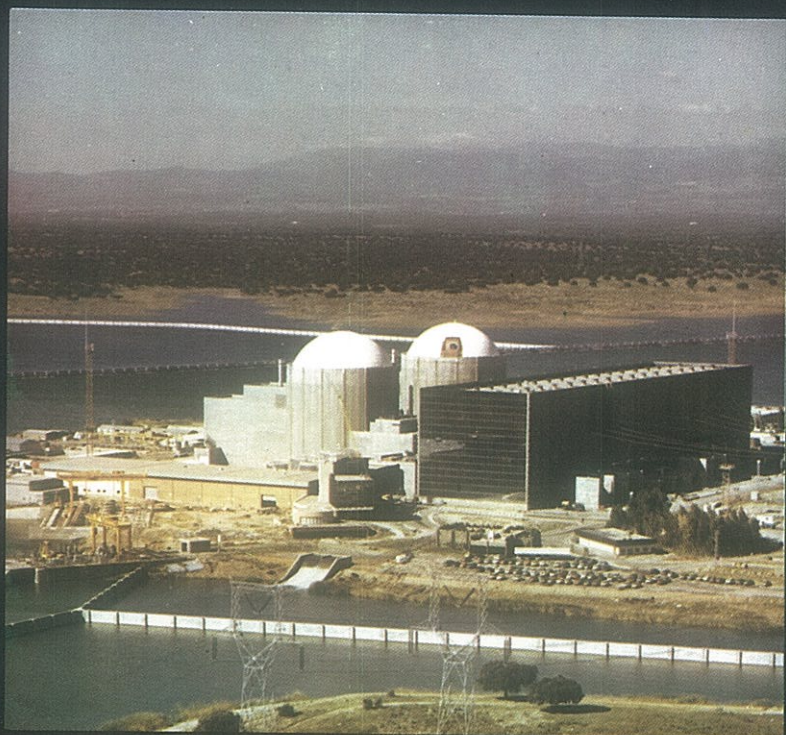
En la Tabla II aparecen los códigos que se han utilizado o se están utilizando por cada grupo.

Conviene recordar que las últimas versiones de los códigos están aún en fase de desarrollo, por lo que tienen errores de programación; carencias, en algunos casos, de modelos significativos y deficiencias en la documentación. Para afrontar estos problemas se ha organizado, dentro del proyecto, un grupo de documentación de códigos con la misión de completar la documentación disponible para cada código, clarificando su estructura informática y exponiendo sus carencias y los límites dentro de los que debe de aplicarse. Conocidas las limitaciones y la estructura informática, el usuario lo maneja con más seguridad e, incluso, puede abordar las modificaciones que considere necesarias.

ANALISIS TERMOHIDRAULICO DE LOS EXPERIMENTOS

La metodología general empleada para analizar los experimentos ha sido la misma para todos los grupos. Ha consistido en la realización de unos cálculos con datos establecidos, el análisis de estos cálculos y, a partir de él, hacer modificaciones al modelo para conseguir un cálculo final lo más ajustado posible al experimento. El resultado se materializa en un informe final y en las notas de cálculo e informes necesarios para la buena documentación del trabajo.

Por cálculo con datos establecidos se entiende la repetición de los ya realizados por INEL para la predicción del experimento, usando el mismo código de ordenador y los mismos datos de entrada. Con ésto se pretende conseguir una familiari-



MONCASA

Montajes industriales

MONCASA ha realizado trabajos, dentro del Sector Energético, en las Centrales siguientes:

Centrales Nucleares:

- Almaraz I y II
- Cofrentes
- Valdecaballeros
- Vandellós II
- Trillo
- Ascó I y II
- Lemoniz I y II
- Santa María de Garoña
- Zorita de los Canes

Centrales Convencionales:

- Compostilla II, Grupo 4
- Anllares
- Litoral de Almería
- Puentes de García Rguez.
- Aceca
- Jinamar
- Gomera
- Las Salinas
- Arrecife de Lanzarote

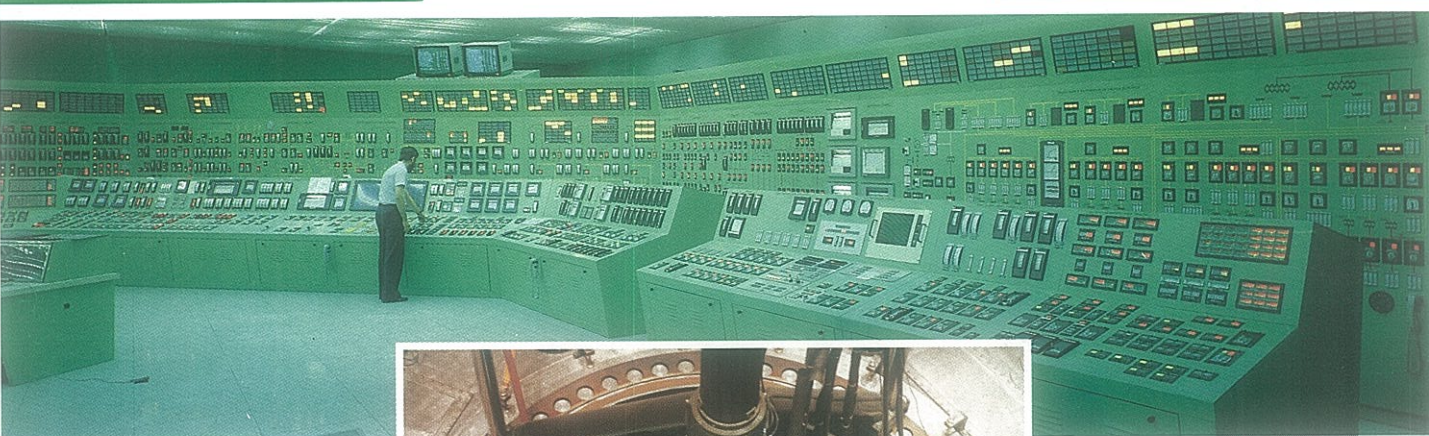


Oficina Central:
 Paseo de la Castellana, 93
 6.ª Planta Teléfono: 455 91 92
 Telex: 43530 MONC e
 MADRID-16



TECNATOM

INGENIERIA DE SERVICIOS



SERVICIOS DE ADIESTRAMIENTO

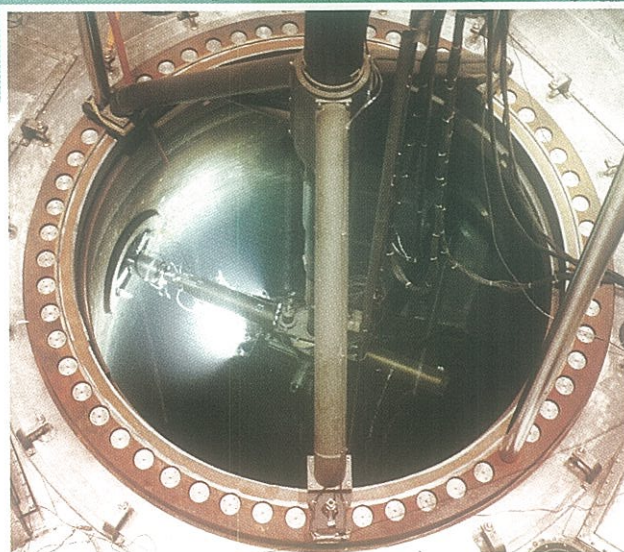
Tecnatom imparte cursos y seminarios para personal de centrales de generación de energía, disponiendo de instructores altamente cualificados y utilizando los más avanzados medios didácticos, incluyendo simuladores de alcance total de centrales nuclear BWR / PWR, así como un simulador compacto de centrales térmicas convencionales. Suministra, asimismo, servicios de apoyo a la explotación.

Los cursos y seminarios incluyen, entre otros:

- Adiestramiento inicial de personal con licencia de operación.
- Adiestramiento de personal sin licencia
- Programas de reentrenamiento
- Química y radioquímica
- Protección radiológica
- Instrumentación y control
- Mantenimiento

Servicios adicionales

- Procedimientos de operación normal y de emergencia
- Revisión del diseño de salas de control
- Revisión de incidentes operativos
- Sistemas de visualización de parámetros de seguridad
- Respuesta a emergencias
- Pruebas de arranque y preoperacionales



Durante los últimos quince años Tecnatom ha dado servicios a:

Centrales nucleares

Angra I (Brasil) • Almaraz I y II (España) • Ascó I y II (España) • Atucha (Argentina) • Biblis (RFA) • Caorso (Italia) • Cofrentes (España) • Döel (Bélgica) • Garigliano (Italia) • José Cabrera (España) • Laguna Verde (México) • Lemóniz I y II (España) • Leibstadt (Suiza) • Loviisa (Finlandia) • Santa M.ª de Garroña (España) • Trillo (España) • Trino (Italia) • Vandellós (España) • Valdecaballeros (España).

Centrales convencionales

Alucia II • Aboño • Bahía Algeciras • Cádiz • Candelaria • Compostilla • Cristóbal Colón • Ginamar • Guanarteme • Guardo • Lada • La Robla • Litoral de Almería • Los Barrios • Málaga • Melrama • Narcea • Pasajes • Puente Nuevo • Puentes • Puertollano • Sabón • San Adrián • Santurce • Soto de Ribera • Teruel.

Otras organizaciones

Association Vinçotte (Bélgica) • Consejo de Seguridad Nuclear (España) • Comisión de Energía Nuclear de Chile (Chile) • Comisión Federal de Electricidad (México) • Empresa Nacional de Electricidad (España) • Empresa Nacional de Fertilizantes (España) • Empresa Nacional de Petróleos (España) • Instituto de Estudios Nucleares (España) • Instituto de Investigaciones Eléctricas (México) • International Atomic Energy Agency (IAEA) • KWU (RFA) • Rheinisch-Westfälisches-Elektrizitätswerk (RFA).

SERVICIOS DE INGENIERIA

Dentro de este área destacan por su importancia las tareas de inspección preservicio, previas al arranque inicial de las centrales de generación de energía, así como las inspecciones en servicio que se realizan durante las paradas periódicas, en las que se utilizan equipos especiales, incluyendo sistemas robotizados operados a distancia, habiendo sido algunos de ellos diseñados y contruidos por Tecnatom.

Los servicios de inspección y pruebas incluyen:

- Ensayos no destructivos convencionales y especiales
- Pruebas con corrientes inducidas (mono y multifrecuencia)
- Ensayos de soportes y amortiguadores
- Pruebas de válvulas
- Ensayos de fugas
- Pruebas de fugas de contención (ILRT y SIT)
- Pruebas de sistemas de ventilación (HVAC)

Servicios adicionales:

- Diseño y fabricación de equipos para ensayos especiales
- Cálculos neutrónicos y mecánica de fractura
- Estimación de la probabilidad del riesgo (PRA)
- Ingeniería de cualificación ambiental de componentes
- Gestión integral de mantenimiento y almacenes
- Calibración de equipos de inspección y pruebas
- Programas especiales y aplicaciones mecanizadas de sistemas de gestión
- Garantía de calidad

tecnatom, s.a.

T I

CARACTERISTICAS DE LOS CODIGOS TERMOHIDRAULICOS

CODIGO DIMENSIONES	MODELO HIDRAULICO BASICO ESQUEMA NUMERICO	MODELO TERMICO BASICO ESQUEMA NUMERICO	RESTRICCIONES INHERENTES A LOS MODELOS BASICOS	CARACTERISTICAS ESPECIALES	APLICACIONES
RELAP-5/MOD-1 (INEL) 1D	- No homogéneo y no equilibrio - C(G+L), C(G-L), M(G+L), M(G-L), E(G+L) - Númerica semi-implícita	- Transmisión de calor en 1D totalmente implícito - Acoplamiento explícito con el modelo hidrodinámico	$T_K = T_{SAT}$ K = L, G $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{MAX(V_L, V_G)}$ - Control de error máximo por el usuario - No estratificación vertical - No modelo de LFCC	- Modelo de flujo crítico - Tratamiento del boro y los no condensables	- Código de planta «Best Estimate» - PWR - LOCA y algunos transitorios
RELAP-5/MOD-2 (INEL) 1D	- No homogéneo y no equilibrio - C(G+L), C(G-L), M(G+L), M(G-L), E(G+L), E(G-L) - Númerica semi-implícita y casi implícita	- Transmisión de calor en 1D ó 2D totalmente implícito (modelo de reinundación) - Acoplamiento explícito o casi-implícito con el modelo hidrodinámico	- No modelo de LFCC - El modelo de reinundación del núcleo no es aplicable a presiones elevadas	- Control automático del error máximo - Modelo de flujo crítico - Boro y no condensables - Secundario completo - No límite de courant para transitorios lentos	- Código de planta «Best Estimate» - PWR y BWR en algunos casos - LOCA, ATWS y transitorios operacionales
TRAC-PD2/MOD-1 (LASL) Vasija-3D Lazos: 1D	- Vasija (3D) - C(G), C(L), M(G), M(L), E(G), E(L) - Semi-implícito - Lazos (1D) - C(m), C(G), M(m), E(G), E(L) - Semi-implícito	- Transmisión de calor en 1D ó 2D totalmente implícito (modelo de reinundación) - Acoplamiento explícito con la hidrodinámica	$V_K = F_K (V_m, V_r)$ (Drift-Flux) en los lazos - No flujo crítico - No estratificación	Modela la reacción metal-agua	- Código de planta «Best Estimate» - PWR - LOCA
TRAC-FF1/MOD-1 (LASL) Vasija-3D Lazos: 1D	- C(G), C(L), M(G), M(L), E(G), E(L) - Númerica semi-implícita y casi-implícita	- Transmisión de calor en 1D ó 2D (reinundación) totalmente implícito - Acoplamiento explícito o casi-implícito con la hidrodinámica	El modelo de reinundación del núcleo no es aplicable a presiones elevadas	- Modelo de flujo crítico - Boro y no condensables - Secundario completo - No límite de courant para transitorios lentos - Reacción metal-agua - Posibilidad de vasija unidimensional	- Código de planta «Best Estimate» - PWR - LOCA, ATWS y transitorios operacionales
FRAP-T6 (INEL) 1D	- Homogéneo y equilibrio en un canal de sección constante - C(m), E(m) - Númerica semi-implícita	- Transmisión de calor en 1D ó 2D (r, e) totalmente implícito - Acoplamiento explícito con la hidrodinámica	- Precisa condiciones de contorno de un código de planta - Únicamente simula daño al combustible hasta rotura de vainas $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{MAX(V_m)}$	- Modela el comportamiento mecánico de la barra combustible - Determina la probabilidad de rotura de la vaina - Modelo de liberación de productos de fisión - Reacción metal-agua	- Código de barra - PWR y BWR - LOCA, ATWS y transitorios
SCDAP/MOD-1 (INEL) 1D	- No homogéneo y equilibrio en estado cuasi-estacionario - Modelo de flujo de arrastre (Drift-Flux)	- Transmisión de calor en 1D y 2D, incluyendo radiación - Acoplamiento explícito con la hidrodinámica	- Precisa condiciones de contorno de un código de planta - Supone integridad de la estructura inferior que soporta el núcleo	- Modelo mecánico de todo el núcleo - Modelos de fusión y resolidificación de los materiales del núcleo - Reacción metal-agua - Liberación de productos de fisión	- Código de daño severo al núcleo «Best Estimate» - PWR y BWR

NOTACION:

C Ecuación de continuidad
M Ecuación de conservación de momento
E Ecuación de conservación de energía

G Vapor
L Líquido
m Mezcla
r Relativa (G-L)
SAT Saturación

T_1 Temperatura
V Velocidad
 Δt Paso de tiempo
 Δx Malla espacial
LFCC Limitación de flujo en Contra-Corriente
INEL Idaho National Engineering Laboratory
LASL Los Alamos National Laboratory

zación con el ordenador y con los códigos y una validación de la instalación del código en el ordenador.

EXPERIMENTO LP-FW-1

El experimento LP-FW-1 simulaba un transitorio de pérdida de agua de alimen-

tación, con el objetivo de evaluar la efectividad de la maniobra de inyección y sangrado para la recuperación de la planta.

Los cálculos se han hecho con el código RELAP-5/MOD-1 [1] y a partir de unos datos de entrada suministrados por INEL.

Tanto las presiones como las temperaturas calculadas coinciden, aceptablemente, con las medidas del experimento. Asimismo, la simulación predijo adecuadamente la capacidad de la maniobra de inyección y sangrado para llevar la planta a una situación segura. Se produjeron, sin

T II

CODIGOS TERMOHIDRAULICOS UTILIZADOS EN CADA EXPERIMENTO

EXPERIMENTO	CODIGOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS
LP-FW-1	RELAP-5/MOD-1
LP-SB-1/2	RELAP-5/MOD-1, RELAP-5/MOD-2 y TRAC-PF1
LP-02-6	RELAP-5/MOD-1 y TRAC-PD2
LP-SB-3	RELAP-5/MOD-1
LP-FP-1	TRAC-PD-2, TRAC-PF-1 y FRAP-T6
LP-FP-2	RELAP-5/MOD-2 y SCDAP

T III

MODIFICACIONES AL MODELO INICIAL DEL EXPERIMENTO LP-FW-1

PARAMETRO MODIFICADO	EFEECTO
ESTADO ESTACIONARIO	
Diámetro hidráulico de los tubos del generador de vapor.	Mejora la transferencia de calor primario-secundario tanto en el estacionario como en el transitorio.
Grado de apertura de la válvula de vapor principal y caudal de agua de alimentación.	Adecuar el caudal de vapor principal a la potencia generada en el núcleo.
Velocidad de las bombas del primario.	Ajustar el caudal del primario a su valor experimental.
Puntos de actuación de las duchas y de los calentadores del presionador.	Ajustar la presión del primario.
Historia de potencia del reactor.	Fijar el valor real de la potencia y lograr un cálculo adecuado de la potencia residual durante el transitorio.
TRANSITORIO	
Sistema de inyección de seguridad.	Ajustar el cálculo a los valores experimentales.
Características de la válvula de alivio del presionador.	Ajustar el caudal evacuado por la válvula.
Puntos de actuación de las duchas del presionador.	Ajustar el instante del disparo de las barras de control.
Simulación de la fuga del generador de vapor.	Ajustar la presión en el secundario.

embargo, divergencias que pueden resumirse en los puntos siguientes:

1. Las condiciones iniciales del experimento diferían ligeramente de las calculadas en la simulación.
2. El caudal a través de la válvula de alivio fue un 30 % inferior a lo calculado.
3. La potencia del reactor, en la fase anterior al disparo, sigue una evolución que no se corresponde con la del experimento.

El análisis de estas divergencias condujo a las modificaciones del modelo inicial que se esquematizan en la Tabla III. Las conclusiones del informe final [7] son:

1. El código RELAP-5/MOD-1 calcula razonablemente bien el comportamiento del sistema.
2. La aproximación conseguida en el cálculo de las condiciones del estado estacionario, es especialmente buena.
3. El descenso del nivel de líquido en el generador de vapor es más rápido en los cálculos que en las medidas. Esto puede deberse a que la distribución

de huecos calculada no coincide con la medida o, incluso, al propio medidor, que no incluye compensación de densidad, y a la forma en que calcula el código.

4. Con las modificaciones introducidas en el cálculo de transferencia de calor, el comportamiento del generador de vapor hasta el momento del disparo es excelente. A largo plazo, la presión calculada tiende a superar a la medida, por lo que el caudal de fuga calculado es insuficiente.
5. La cinética del reactor fue correctamente calculada por el código en todo momento. Las principales diferencias observadas, se achacan al desajuste entre los valores medidos y calculados de la temperatura del agua en la rama fría.
6. El principal problema encontrado para la simulación correcta del transitorio ha sido en el caudal de descarga a través de la válvula de alivio. Esto es debido a las carencias de la versión del código utilizada: las deficiencias del modelo de arrastre entre fases y las limitaciones del uso de una sola ecuación de energía.

7. Los cálculos del inventario de masa del primario dieron valores inferiores a los medidos. Ello es debido, esencialmente, al error de masa del código que, al final del cálculo, llega a ser del 8 %.

EXPERIMENTOS LP-SB-1 y LP-SB-2

Los experimentos LP-SB-1 y 2 se programaron a raíz del accidente de TMI, para comprobar el efecto de la operación de las bombas en el caso de una rotura pequeña. Ambos experimentos parten de las mismas condiciones iniciales y se diferencian por el momento en que se paran las bombas del primario; mientras que en SB-1 se disparan al producirse la rotura, en SB-2 lo hacen al cabo de 3.600 segundos.

Este grupo, ha comenzado los cálculos en el mes de junio de 1986, por lo que, en el momento en que se escribe, los resultados son todavía preliminares. Se han terminado los cálculos con datos establecidos, y su análisis, y se está en la fase de modificación del modelo, para abordar los cálculos finales.

Se están utilizando los códigos RELAP-5/MOD-1, RELAP-5/MOD-2 [2] y TRAC-PF1 [5].

El cálculo del estado estacionario para LP-SB-1 se ha realizado con RELAP-5/MOD-1. Para ello, con objeto de amortiguar las inestabilidades que se producían en la generación de vapor y adecuar la transmisión de calor primario-secundario, se ha modificado la nodalización del generador de vapor recibida de INEL.

El análisis de los datos de las bombas puso de manifiesto, asimismo, su inadecuación al tratamiento del flujo bifásico.

Se han preparado los datos de entrada para RELAP-5/MOD-2 con cambios en la nodalización y se ha realizado un estudio detallado del separador.

Con TRAC-PF1 se ha calculado el estacionario y realizado una pasada completa del transitorio para LP-SB-2, habiéndose estudiado con detalle el resultado a corto plazo de la simulación.

EXPERIMENTO LP-SB-3

El experimento LP-SB-3 simulaba una rotura pequeña en la rama fría de un reactor PWR, estando impedida la actuación de la inyección de seguridad a alta presión. El tamaño de la rotura era tal que la fuga energética por ella no compensaba la energía residual generada. Esto, unido a la operación de las bombas, originó el descubrimiento del núcleo a presiones elevadas, de forma que no pudo descargar el acumulador. El objetivo del experimento era demostrar que, en tales circunstancias, la operación de inyección y sangrado del generador de vapor es capaz de reducir la presión en el primario hasta el punto de inyección de los acumuladores, recuperando, de esta manera, la planta.

Las diferencias entre los valores calculados con los datos establecidos y los medidos experimentalmente, se deben tanto al desarrollo del experimento como a las

POR DELANTE DEL TIEMPO

UITESA



UITESA aporta sus medios y experiencias en:

- DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR GRAFICO INTERACTIVO: TUBERIAS DE CENTRALES NUCLEARES Y SUBESTACIONES ELECTRICAS
- GESTION INTEGRADA POR ORDENADOR DE DISEÑO, MATERIALES Y MONTABILIDAD DE ELEMENTOS
- ANALISIS DE EXPLOTACIÓN DE SISTEMAS ELECTRICOS
- ESTUDIOS DE FIABILIDAD, DISPONIBILIDAD Y GESTION DE MANTENIMIENTO.
- ANALISIS RADIOLOGICO Y AMBIENTAL.
- ANALISIS DEL NUCLEO DE REACTORES NUCLEARES
- TERMOHIDRAULICA Y ANALISIS DE TRANSITORIOS DE CENTRALES NUCLEARES.



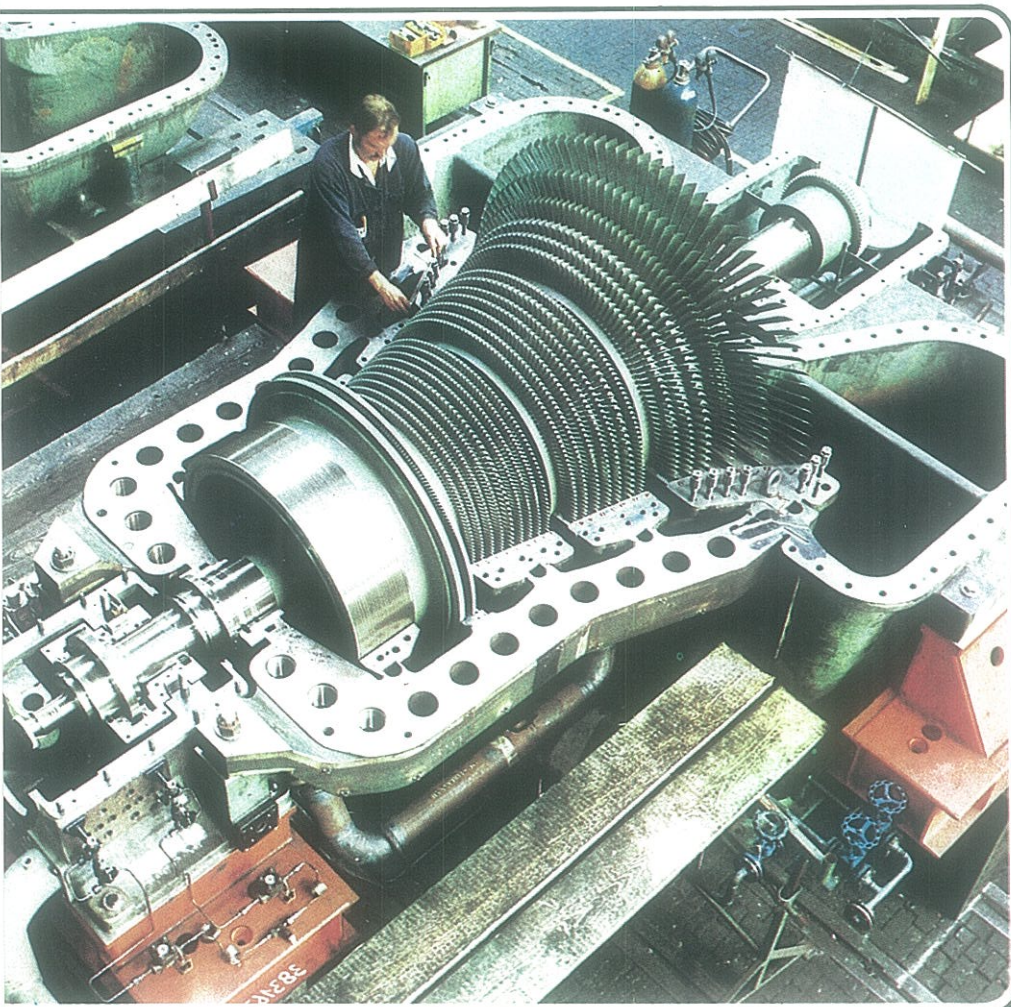
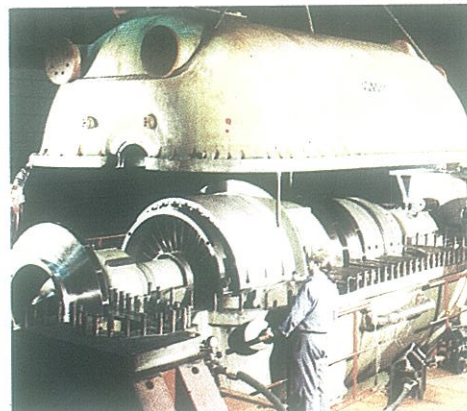
UNION IBEROAMERICANA DE TECNOLOGIA ELECTRICA, S.A.

UITESA - Serrano, 43-45 - 28001 MADRID - Tel.: 4215624 - 4215805

Turbinas y compresores para gases difíciles

Junto con nuestra gama para aire, disponemos de una importante serie concebida especialmente para gases industriales que presenten algunas dificultad, tales como corrosivos, polimerizables, reactivos, etc.

En cada caso, diseñamos el compresor axial o radial más adecuado a las condiciones de trabajo, eventualmente accionados por turbinas o "expander" de fabricación propia.



PASCH Y CIA S.A.

BILBAO
48009

Alameda de Mazarredo, 47
Tel. (94) 424 28 06
Telex 32720 pasch-e

MADRID
28020

Capitán Haya, 9
Tel. (91) 455 37 00
Telex 22696 pasch-e

BARCELONA
08006

Tuset, 8 - 6.º
Tel. (93) 217 19 63
Telex 53063 pasch-e

T IV

MODIFICACIONES AL MODELO INICIAL DEL EXPERIMENTO LP-SB-3

PARAMETRO MODIFICADO	EFEECTO
ESTADO ESTACIONARIO	
Diámetro hidráulico de los tubos del generador de vapor.	Ajustar la transmisión de calor primario-secundario tanto en el estacionario como en el transitorio.
Grado de apertura de la válvula de vapor principal.	Corregir el error que existía en los datos iniciales y que afectaba a la operación a plena potencia del reactor.
Renodalización del separador del generador de vapor.	Reducir las oscilaciones de caudal.
Diseño de un sistema estabilizador.	Ajustar los parámetros principales del estado estacionario.
TRANSITORIO	
Simulación del caudal de sellado de las bombas del primario, puntos de actuación de los sistemas y calor residual medido.	Ajustar las condiciones de contorno del experimento.
Disparo de las bombas del primario.	Ajustar el instante del disparo al inventario medido en el primario.
Reducción del coeficiente de descarga bifásico por la rotura.	Compensar el exceso de densidad calculado en la rama fría, ajustando el caudal de descarga.
Simulación de la fuga en el generador de vapor.	Ajustar la evolución de la presión en el secundario.
Temperatura máxima de vaina a la que se aísla la rotura y se inicia la operación de inyección y sangrado.	Tener en cuenta que sólo se ha considerado un canal medio para representar al núcleo.
Control del error másico.	Mejorar la respuesta global del sistema.

T V

MODIFICACIONES AL MODELO INICIAL DEL EXPERIMENTO LP-FP-2

PARAMETRO MODIFICADO	EFEECTO
ESTADO ESTACIONARIO	
Coefficiente de pérdida de presión en los plenos superior e inferior del reactor.	Ajustar la caída de presión en la vasija.
Rugosidad de los tubos del generador de vapor.	Ajustar la caída de presión en el primario del generador.
TRANSITORIO	
Geometría y coeficientes de la línea del LPIS.	Ajustar la presión del primario.
Fuga del generador de vapor.	Ajustar la presión del secundario.
Caudal de agua de alimentación.	Ajustar el nivel de líquido en el generador de vapor.
Renodalización del pleno inferior.	Evitar flujo inverso en el elemento central.

limitaciones del código utilizado, el RELAP-5/MOD-1; de estas, las más significativas son:

1. Los modelos de transferencia de calor entre la vaina y el refrigerante resultan conservadores.
2. El modelo de acumulador del RELAP-5/MOD-1, produce una descarga excesivamente oscilatoria.
3. El modelo hidrodinámico del código es incapaz de predecir la existencia de vapor recalentado en la rama caliente.

Las modificaciones hechas al modelo para realizar los cálculos finales se presentan esquemáticamente en la Tabla IV.

Las conclusiones más notables del Informe final [8] son:

1. La maniobra de inyección y sangrado del generador de vapor es eficaz para la recuperación de la planta en el caso de una rotura pequeña en el primario, sin actuación del sistema de inyección de seguridad de alta presión.
2. La descarga del acumulador es eficaz para inundar el núcleo, incluso ante condiciones adversas de baja presión diferencial respecto al primario y alto contenido de huecos en la región activa.
3. Pese a sus limitaciones, el código RELAP-5/MOD-1 ciclo 18 modificado por INEL produce una respuesta muy aceptable.
4. Las deficiencias del modelo del generador de vapor han sido corregidas con la modificación de la nodalización.
5. Destaca la importancia que tiene una simulación correcta de los coeficientes de pérdida de presión en el circuito, tanto con circulación forzada como natural.
6. El resultado del cálculo es muy sensible al valor simulado del calor residual y a las pérdidas térmicas al ambiente.

EXPERIMENTO LP-FP-1

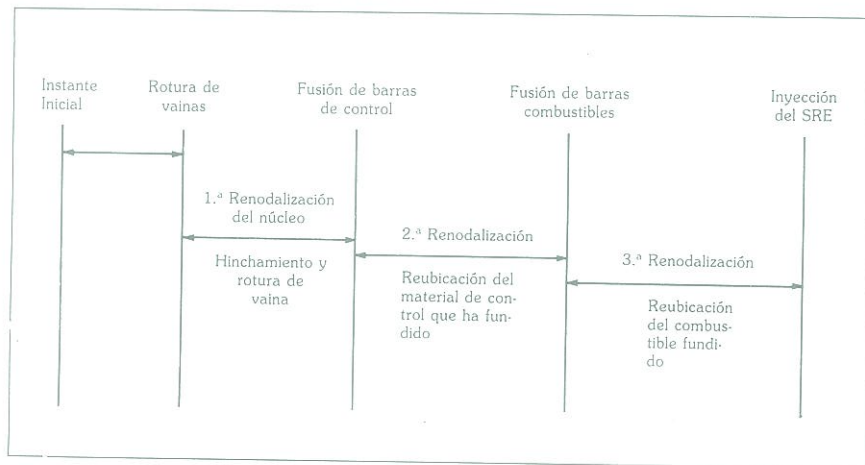
El experimento LP-FP-1 fue el primero de los de productos de fisión; simulaba una rotura tipo guillotina en la rama fría, con un retraso en la actuación del sistema de refrigeración de emergencia de modo que se produjera rotura de vainas. La reinundación del núcleo se realizó según el modelo KWU, con inyección combinada por el pleno superior y por la rama fría.

Se han realizado los cálculos con los datos establecidos y utilizando los códigos TRAC-PD2 [3] y FRAP-T6 [4]. Este último modela el comportamiento de la barra combustible, utilizando como condiciones de contorno las calculadas por el TRAC.

Las principales conclusiones que se obtienen de la comparación de los cálculos con el experimento son las siguientes:

1. Se rompieron menos barras de las calculadas a causa de una inyección, no programada, por el pleno superior.
2. El elemento combustible central, con su diseño especial, produce diferencias entre el comportamiento hidráulico calculado y real del núcleo.

FI Esquema seguido para el cálculo de LP-FP-2 con RELAP-5.



- Las diferencias en el comportamiento hidráulico del sistema, ponen de manifiesto la sensibilidad de los cálculos a la nodalización, especialmente, del bypass del núcleo.

Este experimento se está empezando a calcular con el código TRAC-PF1 [5], pero aún no hay resultados que nos permitan sacar conclusiones.

EXPERIMENTO LP-FP-2

El objetivo fundamental del experimento LP-FP-2 es proporcionar datos sobre la liberación y el transporte de los productos de fisión en un accidente con daño importante del combustible.

Las condiciones termohidráulicas del experimento LP-FP-2 son las de un LOCA pequeño, con fallo en las válvulas de aislamiento del sistema de inyección a baja presión que origina una nueva rotura con descubrimiento del núcleo. Se retrasa la actuación del sistema de inyección de emergencia para producir la fusión limitada del elemento central.

Debido al deterioro del elemento combustible central, se hace necesario utilizar el código SCDAP para simular su comportamiento. Las condiciones de contorno, requeridas por SCDAP, se toman de los resultados proporcionados por el código RELAP-5/MOD-2. La utilización de RELAP es más compleja que en otros casos porque el desarrollo del experimento obliga a efectuar renodalizaciones, a lo largo del cálculo, que sigan la evolución del estado físico del núcleo, tal como se esquematiza en la Fig. 1.

Las conclusiones principales que se sacaron de los cálculos con datos establecidos se enumeran a continuación:

- La tasa de despresurización del primario se ajusta a los datos hasta el momento en que se simula el fallo de las válvulas de aislamiento de la línea del sistema de inyección a baja presión. A partir de ese instante, se desajusta debido al exceso de caudal por la línea calculado por RELAP.
- La evolución de las temperaturas en el núcleo se ajusta bien a las medidas excepto en los niveles superiores, donde el exceso de caudal por la línea de inyección reduce la cantidad de vapor disponible para la reacción metal-agua limitando, así, la excursión de temperaturas calculada.
- El instante en que se rompe la vaina y se liberan los productos de fisión es calculado correctamente por SCDAP.

Las modificaciones efectuadas al modelo inicial se resumen en la Tabla V.

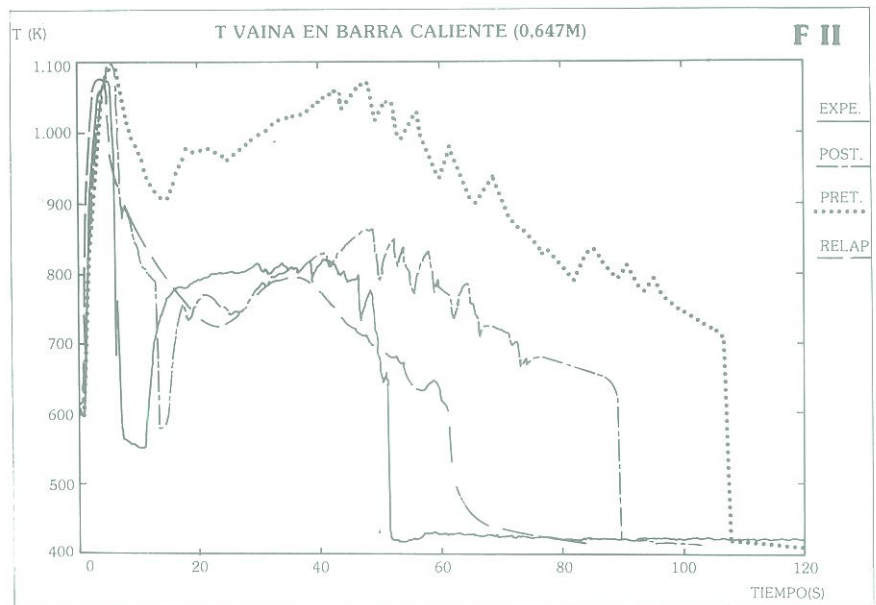
Se han iniciado los cálculos finales, pero sólo con el código RELAP-5/MOD-2 y las conclusiones provisionales más significativas son las siguientes:

- Las características del caudal por la línea del sistema de inyección de seguridad a baja presión afectan por completo al curso del transitorio. Todavía no se han resuelto las incertidumbres experimentales a este respecto.

T VI

MODIFICACIONES AL MODELO INICIAL DEL EXPERIMENTO LP-02-6 CON EL CODIGO TRAC-PD2

PARAMETRO MODIFICADO	EFEECTO
ESTADO ESTACIONARIO	
Potencia inicial.	Ajuste de la potencia experimental y el salto de temperatura en el núcleo.
Puntos de actuación de la válvula de vapor principal.	Ajuste de la presión en la cúpula del generador de vapor.
Diámetro hidráulico y coeficientes de pérdida de presión en la vasija.	Mejorar la caída de presión en la vasija.
Coefficiente de pérdida de presión en el primario.	Mejorar la caída de presión en el resto del circuito.
Modificación de la geometría y presión del presionador.	Ajustar la presión del primario.
TRANSITORIO	
Características del acoplamiento rotor-volante de las bombas del primario y multiplicadores bifásicos del par de la bomba.	Ajustar la evolución temporal de las velocidades de las bombas del primario.
Renodalización del acumulador.	Mejorar la descarga del acumulador.
Inyección de seguridad de alta y baja presión.	Simular correctamente las condiciones de contorno.
En el código, cambio de las subrutinas de transmisión de calor adecuándolas a las del TRAC-PF-1/MOD-1.	Predicción más realista de las temperaturas en la vaina durante el transitorio.
En el código, cambio del modelo de temperatura mínima de ebullición en película (Sakurai) para alta presión.	Predicción del enfriamiento de la vaina en la fase de despresurización y ajuste de la temperatura máxima de vaina durante la fase de reinundación.

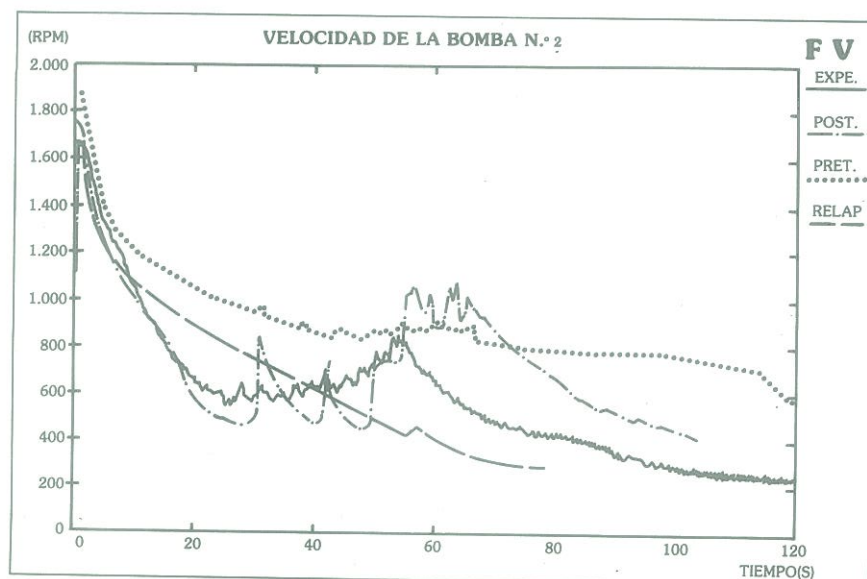
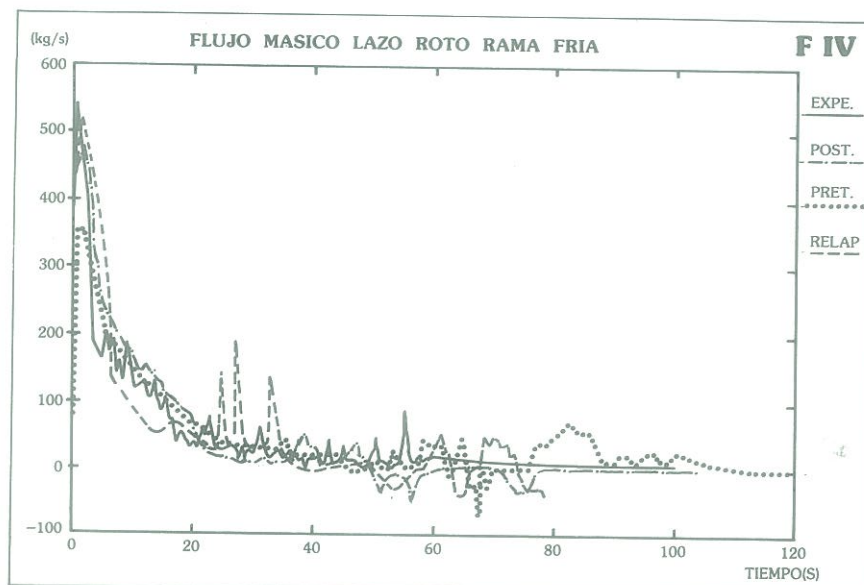
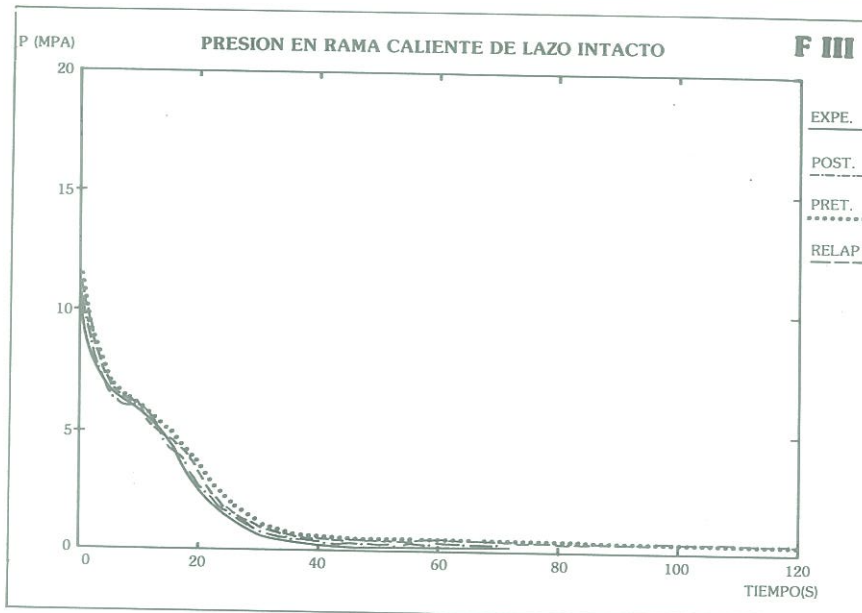


- El instante de inicio del calentamiento del núcleo se retrasa significativamente de los resultados experimentales. Se debe, fundamentalmente, a deficiencias en el modelo de arrastre entre las fases que tienden a homogeneizar el nivel de líquido en el núcleo.
- Las tasas de calentamiento del núcleo, se ajustan bien a los resultados experimentales, teniendo en cuenta las limitaciones de RELAP. Las diferencias observadas en el elemento central esperan resolverse con el cálculo de SCDAP.

EXPERIMENTO LP-02-6

Se trata de una rotura en guillotina de la rama fría de un reactor de agua a presión, al que se le han impuesto las condiciones del apéndice K de la 10 CFR 50. Esto es, con pérdida del suministro eléctrico, coincidente con la rotura, e inyección mínima del sistema de refrigeración de emergencia.

Se han realizado dos cálculos independientes, uno con TRAC-PD2 y otro con RELAP-5/MOD-2, y se va a iniciar un tercero, con TRAC-PF1.



Cálculos de LP-02-6 con TRAC-PD2

El trabajo de este grupo ha abarcado tanto al experimento y su cálculo como al análisis y la modificación del código. Los resultados logrados son el fruto de ambos esfuerzos.

En la Tabla VI se indican las principales modificaciones que se han introducido en el modelo, a partir de los cálculos iniciales, tanto en el estado estacionario como en el transitorio, para mejorar los resultados de los cálculos finales [9].

Un logro destacable del cálculo final es la predicción del remojado inicial de las vainas, conseguido introduciendo en el código la correlación de Sakurai para el cálculo de la temperatura mínima de ebullición en película. Esto produce una mejora notable en la predicción de la temperatura de la vaina, como puede apreciarse en la Fig. II.

Las conclusiones más notables del Informe final son:

1. El código TRAC-PD2/MOD-1 predice bien el comportamiento termohidráulico general.
2. Se han detectado y corregido errores del código y de los datos de entrada.
3. Se han adaptado nuevas subrutinas de transmisión de calor que mejoran los resultados.
4. La presión del primario calculada, se mantiene siempre por encima de la medida, Fig. III, porque, debido a la ausencia en el código de un modelo de flujo crítico, la predicción del caudal subenfriado que descarga por la rotura no es buena, Fig. IV.
5. Pese a las bruscas variaciones de velocidad, el instante calculado de la desconexión del volante de inercia de las bombas del primario se aproxima mucho al experimental, Fig. V.
6. Se ha creado una infraestructura gráfica para facilitar la tarea de presentación y análisis de los resultados.

Cálculos de LP-02-6 con RELAP-5/MOD-2

En este apartado, se quiere destacar la importancia de ciertos modelos en los cálculos «best estimate» de un transitorio.

Como se ha dicho en el apartado anterior, el TRAC-PD2 no puede calcular con suficiente precisión el caudal de descarga por la rotura, ya que carece de un modelo de flujo crítico. Este modelo se incluye tanto en RELAP-5/MOD-2 como en TRAC-PF1. Empleando cualquiera de los dos códigos [10], el cálculo de los caudales de descarga se ajusta más a los resultados experimentales y mejora el cálculo de la presión del primario, como puede verse por las Figs. III y IV.

CONCLUSIONES

Las etapas que deben cubrirse en el desarrollo completo de cualquier experimento son:

1. Conocimiento del problema.