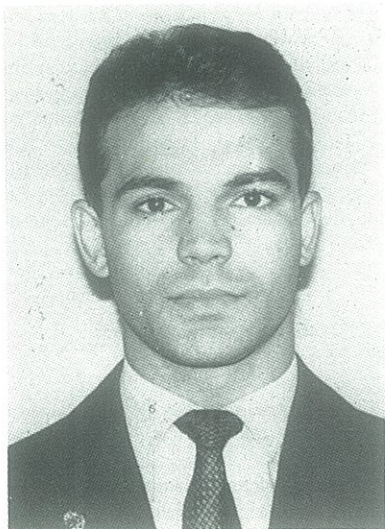


UTILIZACION DEL CODIGO RETRAN-02 PARA EL ESTUDIO DE TRANSITORIOS OPERACIONALES

Iván CLEMENTE SIMON, José Juan MARTINEZ CABALLERO
y Luis Felipe IBÁÑEZ GONZALEZ



Iván CLEMENTE SIMON es Ingeniero Industrial, especialidad en Técnicas Energéticas por la ETSII de Madrid (1982). Desde 1983 a 1985 coordinó e impartió en Tecnom, S. A., diversos cursos sobre Tecnología de centrales nucleares. En la actualidad es Ingeniero de proyectos del Departamento Nuclear de Unión Iberoamericana de Tecnología Eléctrica, S. A. (UITESA).



José Juan MARTINEZ CABALLERO es Ingeniero Industrial por la ETSII de Madrid (1983). Ha participado como investigador en el Proyecto de Fusión por Confinamiento Inercial del Departamento de Energía Nuclear de la ETSII. En la actualidad presta sus servicios en el Departamento Nuclear de Unión Iberoamericana de Tecnología Eléctrica, S. A. (UITESA).



Luis Felipe IBÁÑEZ GONZALEZ es Doctor en Física de Plasmas por la Universidad de Columbia (USA), M.Sc. en Ingeniería Nuclear por la Universidad de Florida (USA), diplomado en Ingeniería Nuclear por la JEN y licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense. Ha sido colaborador en la ETSII de Madrid, Investigador Asociado en el Instituto Courant de Ciencias Matemáticas, Nueva York (USA), en la división de Fusión e Ingeniero de Licenciabilidad y Protección Radiológica e Hidroeléctrica Española, en cuyo período fue Ingeniero visitante con General Electric en San José (USA). En la actualidad es Jefe del Departamento Nuclear de Unión Iberoamericana de Tecnología Eléctrica, S. A. (UITESA).

INTRODUCCION

El código de cálculo RETRAN es una herramienta de amplia utilización para la evaluación realista de transitorios. A diferencia de otros códigos, como TRAC, RELAP5, CATHARE y PHOENICS, que cubre una gama más amplia de accidentes con unos modelos de flujo bifásico más complejos, RETRAN se caracteriza, en líneas generales, por una mayor facilidad de uso y su amplia contrastación con pruebas operacionales y experimentos.

RETRAN se desarrolló para cubrir las necesidades del sector eléctrico estadounidense en relación a la evaluación realista de transitorios en las centrales nucleares. Con tal fin se partió del RELAP-4/003.

El desarrollo de RETRAN a partir de entonces se caracterizó por dotarlo de versatilidad y facilidad de uso, además de incluir el control de la planta y una serie de modelos especiales. La primera versión del RETRAN, RETRAN-01, tenía una serie de limitaciones en cuanto a los transitorios de agua en ebullición, y las aplicaciones al accidente de pérdida de refrigerante (LOCA) se limitaban a la primera fase de las grandes roturas. RETRAN-02 cubre toda la gama de transitorios en reactores de agua a presión y agua en ebullición, ha incluido el balance de la planta, es capaz de modelizar los accidentes de pérdida de refrigerante con pequeñas roturas y los transitorios anticipados sin parada de emergencia (ATWS). El código ha sido validado con los programas experimentales SEMISCALE y LOFT, además de con numerosas pruebas operacionales.

Las aplicaciones del código RETRAN son muy numerosas. Se ha utilizado para analizar el comportamiento de plantas químicas, debido a su capacidad para modelizar sistemas de control (Referencia 3). Se ha empleado en análisis de barcos de propulsión nuclear (Referencia 2). Es una herramienta de uso standard en los análisis de transitorios para recargas de centrales nucleares. Se usa muy intensamente como apoyo a operación: estudio de la reducción del número de paradas de emergencia mediante la modificación de puntos de tarado, verificación de procedimientos de emergencia, cualificación de simuladores y validación de procedimientos de pruebas (Referencia 3). También destacan sus aplicaciones en los estudios de fiabilidad o PRA's (Probabilistik Risk Assessments) como definición de criterios de éxitos (Referencia 4). También se usa en la resolución de temas abiertos ante la NRC (Nuclear Regulatory Commission) y otros organismos reguladores. Como

ejemplo de estos últimos se podrían citar el estudio termohidráulico del shock térmico a los reactores de agua a presión, posibles métodos de control y definición de procedimientos de emergencia ante determinados ATW's (Referencia 5) y modificación de la lógica del Sistema de Despresurización Automática en Reactores de Agua en Ebullición.

La NRC ha concedido un SER (Safety Evaluation Report) al RETRAN-02 MOD002 en septiembre de 1984, lo que le convierte en la práctica en un código de referencia para los análisis de las recargas y para la evaluación de los transitorios del capítulo 15 del Estudio Final de Seguridad, excepto los accidentes de pérdida de refrigerante. Vemos pues, un aspecto más de la versatilidad de RETRAN: la adecuación de un código pensado primordialmente para la evaluación de transitorios con métodos realistas a los análisis de licenciamiento, utilizando hipótesis conservadoras.

El presente artículo tiene por objeto la descripción de la construcción de un modelo de C. N. Cofrentes para el RETRAN-02 MOD002, con asistencia técnica parcial de Energy Incorporated, y los primeros resultados de comparación con unos transitorios simples de las pruebas operacionales.

DESCRIPCION GENERAL DEL CODIGO RETRAN-02 MOD002

A diferencia de otros códigos termohidráulicos, RETRAN tiene una documentación básica muy completa (Referencia 1). A continuación se da un resumen muy general de sus características principales.

MODELO TERMOHIDRAULICO

El modelo básico termohidráulico de RETRAN es de equilibrio homogéneo, en el que ambas fases se desplazan con una velocidad media y en equilibrio térmico entre sí. No obstante, tiene una opción de deslizamiento dinámico que resuelve una ecuación para la velocidad relativa de las fases, y un modelo de no equilibrio térmico pensado fundamentalmente para el presionador en un reactor de agua a presión, pero que también se utiliza para la cúpula de la vasija en un reactor de agua en ebullición, y la parte superior del secundario de un reactor de agua a presión en determinados transitorios.

El código resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y de la energía, escritas en forma integral en volúmenes de control, y la ecuación del momento, que describe el comportamiento dinámico del sistema, en juntas que conectan los volúmenes entre sí. Se trata pues, básicamente, de un problema unidimensional, si bien existe una opción de «momento vectorial», que tiene en cuenta la distribución

en dos dimensiones de algunos de los términos de la ecuación de momentos, de aplicabilidad cuando dos tuberías se bifurcan bajo un cierto ángulo. Resumiendo, son tres ecuaciones, cuatro si se considera la opción de deslizamiento dinámico, que se cierran con las ecuaciones de estado. Existen varias opciones para el cálculo de los términos de fricción, incluyendo un mapa de flujo que determina las condiciones bifásicas en que se encuentra el fluido. Existe también una opción para un modelo de deslizamiento algebraico, que utiliza la velocidad de deriva (*drift velocity*), basada en el modelo de huecos de EPRI.

Las condiciones de contorno se pueden imponer en un volumen, en una junta o mediante la determinación del flujo crítico en una junta. Existen tres modelos de flujo crítico, utilizable según las previsibles condiciones termodinámicas del fluido.

CINETICA

RETRAN-02 MOD002 puede utilizar opcionalmente la cinética puntual o unidimensional. En el modelo de cinética puntual se le puede suministrar reactividad como función explícita del tiempo para simular mecanismos de control y también mediante la retroalimentación del combustible y del moderador. La cinética unidimensional utiliza el método de la factorización. Es necesario que se le suministren las secciones eficaces colapsadas a una dimensión, obtenidas a partir de otros códigos neutrónicos.

GENERACION Y TRANSMISION DE CALOR

RETRAN-02 MOD002 considera como posibles fuentes de calor: la energía por fisión, obtenida de las ecuaciones de la cinética, el calentamiento directo del moderador y la reacción metal-agua. Resuelve la ecuación de conducción de calor en situaciones como las que se presentan en el núcleo y en los generadores de vapor. El código tiene una opción que permite efectuar cálculos de canal caliente para obtener el límite de Ebullición Nucleada. Existe un mapa de transferencias de calor con el que el código elige automáticamente el coeficiente de transmisión de calor, basado en el régimen bifásico del fluido.

MODELOS DE COMPONENTES

RETRAN-02 MOD002 tiene un modelo para bombas centrífugas con el que se obtienen los incrementos de presión y energía, que entran en las ecuaciones de momento y de energía, respectivamente, partiendo de unas tablas denominadas curvas homólogas que las suele suministrar el fabricante de la bomba. La bomba en sí se simula como un volumen de control. Además existe un modelo de bombas de chorro para los reactores de agua en

ebullición, que tiene en cuenta el intercambio de momento entre dos caudales de fluido moviéndose a distintas velocidades.

El código puede modelar válvulas de retención e inerciales. En la mayor parte de los casos, las válvulas se modelan como una junta de área variable en función del tiempo de apertura o de cierre. El modelo de separador está basado fundamentalmente en unas curvas empíricas de *carryunder* y *carryover*, que también se pueden suministrar por el sistema de control. El modelo de presionador es básicamente un modelo de no equilibrio con submodelos para el efecto de las duchas y de los calentadores. El código también dispone de modelos para la turbina, el condensador y los calentadores. Estos últimos no se utilizan mucho en la práctica y se suelen considerar condiciones de contorno apropiadas. Otra opción es modelar el Balance de la Central mediante el sistema de control.

MODELOS DE APLICACION ESPECIAL

Hasta el presente, la filosofía general del código ha sido la de reducir en lo posible el número y la complejidad de las ecuaciones básicas y en aquellas situaciones en que éstas no basten utilizar modelos de aplicación especial en uno o en pocos volúmenes de control. A continuación se citan los más importantes.

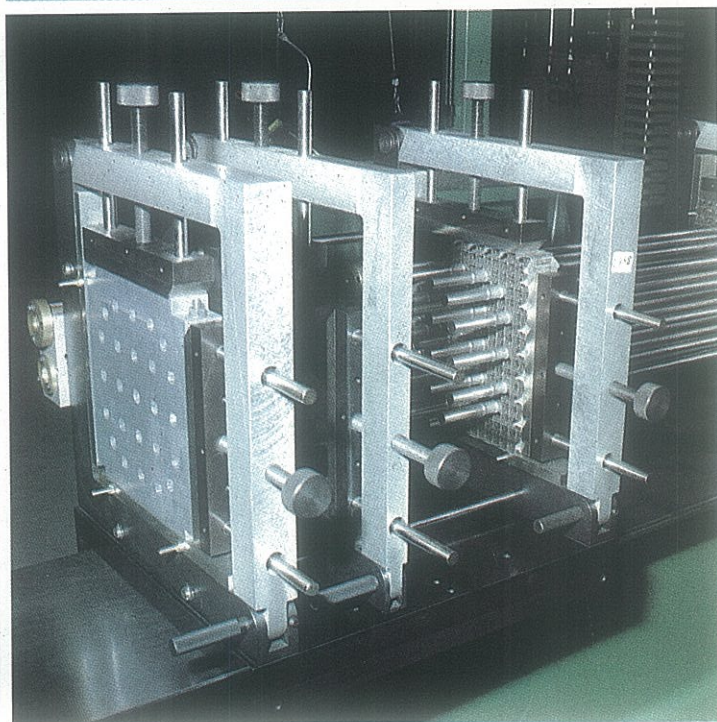
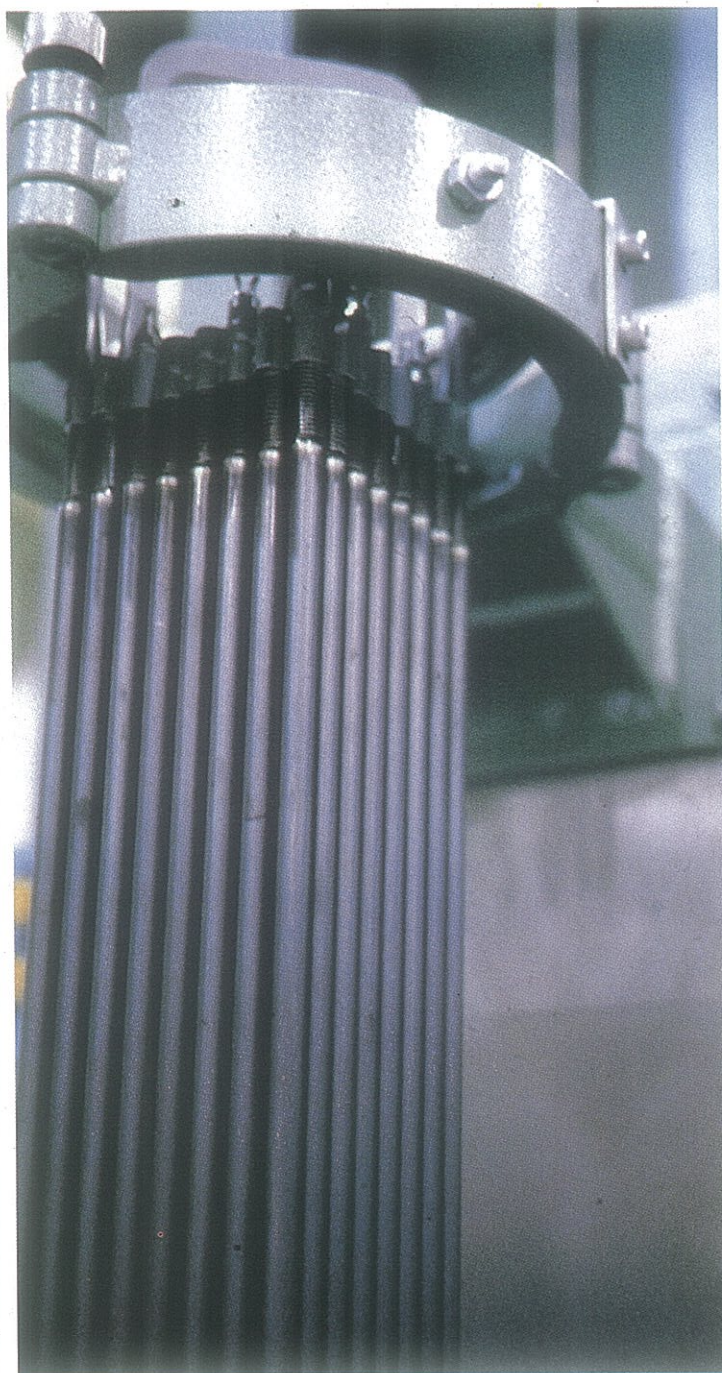
El modelo de elevación de burbujas se aplica a aquellos volúmenes de control con separación de fases. Típicamente a los separadores, presionador y generador de vapor. Consiste en una distribución lineal de burbujas en la mezcla bifásica y una ecuación de conservación de la masa total de vapor.

El modelo de retraso en el transporte se aplica en aquellos volúmenes en el que existe un frente térmico que se propaga sin que se pueda aplicar la hipótesis de mezcla inmediata de las magnitudes termodinámicas. El modelo de transporte de la entalpía se utiliza para calcular la entalpía de la junta cuando el volumen que conecta aguas abajo está sujeto a una aportación de calor. El modelo de condiciones locales para la transferencia de calor es aplicable cuando se modela el secundario del generador de vapor mediante un solo volumen, y consiste en considerar los distintos regímenes de transferencia de calor cuando varía el nivel de mezcla.

El modelo de ebullición subenfriada consiste en generar una distribución de huecos cuando existe ebullición subenfriada para obtener la retroalimentación en la reactividad por huecos en las ecuaciones de la cinética. Está basado en el modelo de huecos de EPRI.

MODELIZACION DEL CONTROL

Con el control es posible la modelización de los disparos y del control analógico.



ENUSA garantiza el abastecimiento de combustible a las centrales nucleares en España, mediante la tecnología más avanzada en el campo del diseño y fabricación de elementos combustibles.



enusa

EMPRESA NACIONAL DEL URANIO, S. A.

Santiago Rusiñol, 12. Tel. 233 62 07
Télex 43042 URAN E. 28040 MADRID

UNA LÚCIDA INVERSIÓN.

2º TRAMO
20000 millones
de pesetas.

PAGARÉS ENDESA.

ENDESA (Empresa Nacional de Electricidad, S.A.), primer productor de energía eléctrica del país, lanza la Emisión PAGARES ENDESA.

PERIODO DE SUBASTAS

Quincenalmente ENDESA emitirá pagarés mediante subastas a través de las siguientes Entidades Financieras:

Banco de Bilbao
Banco de Vizcaya
Banco Exterior de España
Bank of America, S.A.E.
Banco Hispano Americano

Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Madrid.
Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Barcelona
Citibank España
Midland Bank P.L.C.

GRAN FLEXIBILIDAD

- Nominal de los títulos: 250.000, 500.000 y un millón de pesetas.
- Plazo de emisión: 3, 6, 9, 12 y 18 meses.

REGIMEN FISCAL

Retención del 18% sobre los intereses, deducible del I.R.P.F. o I. de Sociedades.

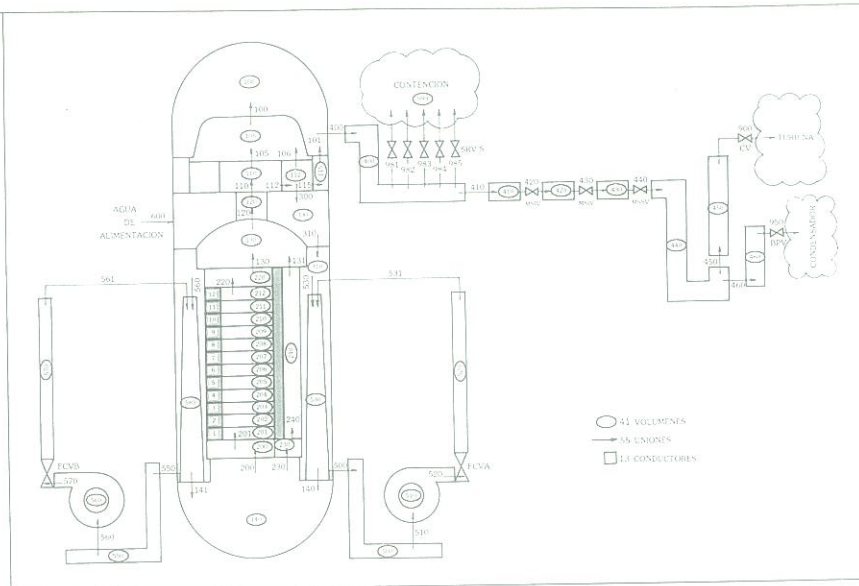
Sin duda, hoy día, PAGARES ENDESA, una rentable, inteligente y **lúcida inversión.**



Empresa Nacional de Electricidad, S.A.

Existe un folleto explicativo en el domicilio social de la Empresa y en las Entidades relacionadas.

El control analógico del RETRAN permite no sólo modelar el control de la planta, sino introducir correlaciones para los coeficientes de transmisión de calor y modelar el comportamiento de componentes de la central, por ejemplo, el Balance de la Central. Las entradas a los bloques de control pueden ser caudales, presiones, entalpías, inserción de reactividad, potencia, datos de componentes, etc. Los bloques de control fundamentalmente son sumadores, divisores, multiplicadores, retardos, generadores de función, integradores, retrasos, adelanto-retrasos, etc.



INICIALIZACION

de C. N. Cofrentes con el código RELAP fue de gran ayuda. Los criterios básicos seguidos para la nodalización de C. N. Cofrentes fueron:

- Efectuar una modelización en paralelo de la parte termohidráulica y la de control.
- Desarrollo del modelo en etapas, construyendo submodelos, probando cada uno de ellos en el ordenador con condiciones de contorno apropiadas y efectuando ajustes en los parámetros con mayor grado de incertidumbre. Los distintos submodelos se fueron uniendo entre sí hasta la consecución del modelo total.
- Aunque obviamente los modelos son dependientes del transitorio que se va a analizar, se trató de desarrollar desde el primer momento un modelo base suficientemente completo y versátil que permitiese, con ligeras modificaciones, el análisis de una gama amplia de transitorios.
- En lo posible se eligieron valores de planta en contraposición con los del Estudio Final de Seguridad, si bien existe una versión del modelo con valores de licencia.

- Construcción del submodelo del núcleo empleando conductores pasivos (en los que no se resuelve la ecuación de conducción de calor).
- Construcción del submodelo del núcleo empleando conductores activos (en los que no se resuelve la ecuación de conducción de calor).
- Construcción del submodelo de las bombas de chorro para verificar los datos de funcionamiento, suministrados por General Electric.
- Inclusión de los separadores, secadores y parte superior de la vasija en el modelo para conseguir la inicialización de

- Verificación de la estabilidad de cada uno de los sistemas de control.
- Inclusión de las líneas de vapor.
- Submodelo para determinar los coeficientes de contracción de las válvulas de alivio y su lógica de actuación.
- Inclusión del control y de la cinética en el modelo termohidráulico.
- Consecución del transitorio nulo (cientos de segundos).

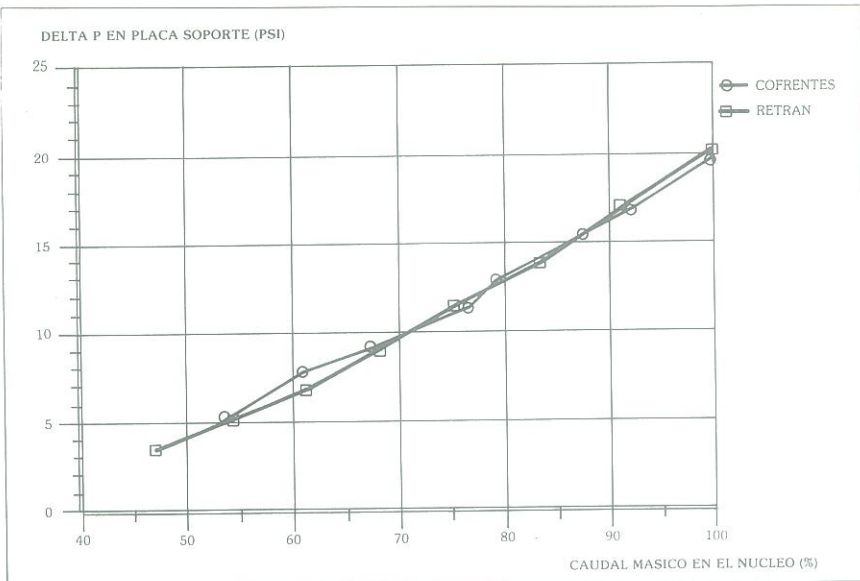
MODELO TERMOHIDRAULICO

La nodalización básica termohidráulica para C. N. Cofrentes consta de 41 volúmenes, 55 uniones y 26 conductores (Fig. 1). Los criterios básicos para la elección de la nodalización han sido:

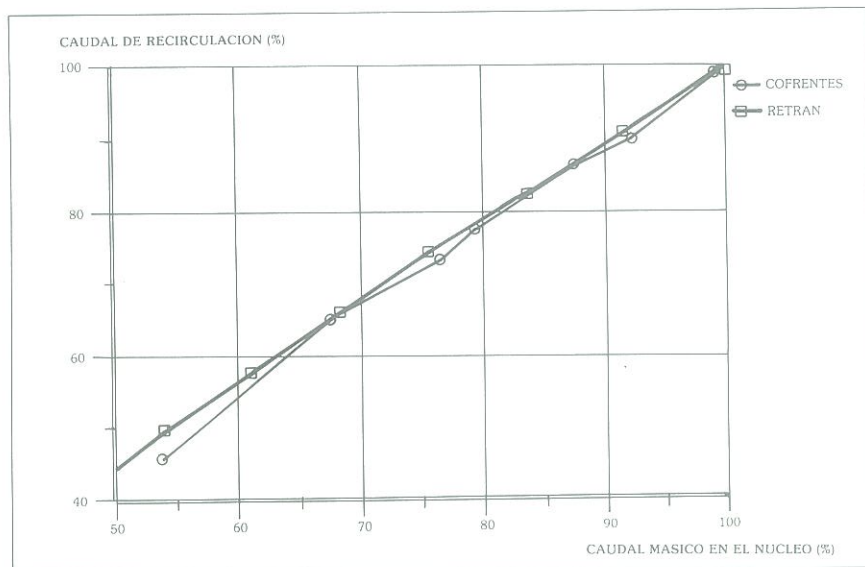
Características geométricas y termohidráulicas

Hay volúmenes que por el tipo de flujo esperado tienen entidad propia, como pueden ser el plenum superior y la cúpula de la vasija. Hay otros en los que existe separación de las fases por gravedad en los separadores y en la zona externa del faldón del separador y que son susceptibles de ser tratados por el modelo de elevación de burbujas. Los tramos rectos de tuberías o con pocos codos, salvo en los casos que se describirán a continuación, también son susceptibles de ser tratados como un solo volumen.

Cuando en el curso de un transitorio existe una bifurcación de flujo, debido al cierre y apertura de válvulas, es lógico

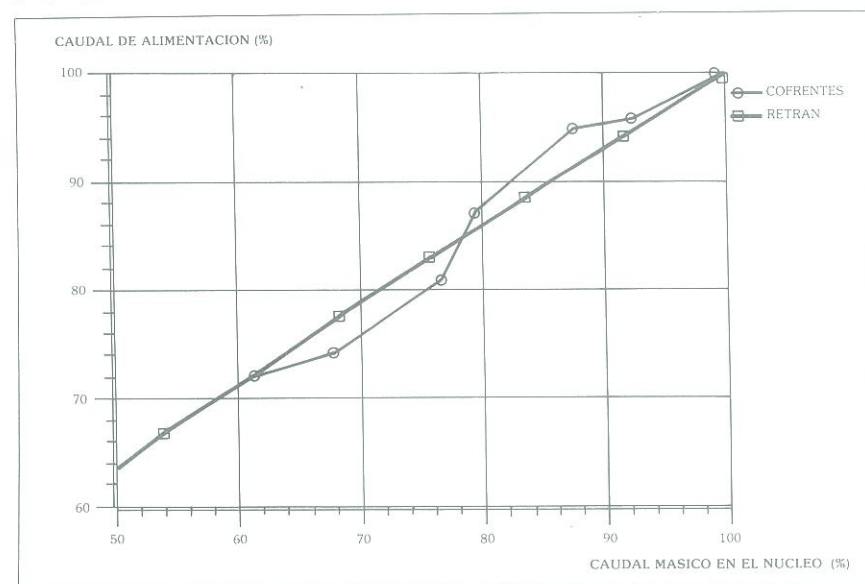


F III DELTA P en Placa Soporte VS. Caudal Másico en el Núcleo.



F IV Caudal de Recirculación VS. Caudal Másico en el Núcleo.

F V Caudal de Alimentación VS. Caudal Másico en el Núcleo.



Versatilidad

Se procuró que el sistema de control fuese lo suficientemente flexible como para acomodar el mayor número posible de transitorios. Con este fin se incluyeron, aparte de la traducción directa de los diagramas de control, la posibilidad de operación en cada uno de los modos, la actuación manual del operador, respuesta del sistema a disparos de bombas, etc.

Inclusión de la modelización de componentes mecánicos de la central

Se modelizaron por bloques de control determinados componentes mecánicos de la central. Ejemplos de esto último son la simulación del grupo turbogenerador y de determinadas válvulas.

Adaptación simple a la modelización termohidráulica

Se buscó la integración más simple entre ambas modelizaciones, considerando las distintas opciones posibles. Como ejemplos se podrían citar el control de la recirculación mediante el factor de pérdida de forma de la válvula de control o el control de la presión mediante juntas de llenado.

La modelización de los sistemas de control se efectuó con las siguientes fases:

Recopilación de información

Se utilizó información de especificaciones de diseño, especificaciones técnicas y del Estudio Final de Seguridad.

Definición básica de los sistemas de control

Esta tarea incluyó la definición de los sistemas de control, las características de la central a modelar y las variables termohidráulicas que sirven de input y de output al modelo.

Modelización de los tres sistemas básicos de control

Esta tarea consistió en definir las señales y bloques de control para los tres sistemas y en inicializarlos.

Eliminación de errores y verificación de la estabilidad de cada uno de los sistemas de control

Dada la complejidad de la modelización de los sistemas de control (véase Tabla I), los sistemas se comprobaron uno a uno, dándoles como inputs escalones y comprobando los valores en los distintos bloques de control.

Integración con el modelo termohidráulico

Una vez comprobados los tres sistemas y eliminados los errores se procedió a la integración con el modelo termohidráulico.

Las características de mayor interés de la modelización de los distintos sistemas de control se resumen a continuación. Solamente se resaltan aquellos aspectos que

no están ligados directamente a la traducción inmediata de los diagramas de control proporcionados por el suministrador principal y que implican un mayor grado de pericia del modelador.

Sistema de control de recirculación

Se modelaron dos lazos para permitir el análisis del disparo de una sola bomba de recirculación. Se incluyeron los tres controladores (maestro, de flujo y de caudal) con *antiwindups* y estaciones de transferencia manual-automático. Se modelizó la transferencia a baja velocidad de las bombas de recirculación. Se consideraron dos enclavamientos del actuador de la válvula de control: uno que simula el cierre al 26,4 % de la posición por bajo nivel en la vasija y bajo caudal en la turbobomba (runback) y otro que puede simular un accidente de pérdida de refrigerante. Se consideró la no linealidad de la válvula. Se introdujo un modelo del actuador y otro para el control del caudal, variando las pérdidas locales en la válvula.

Sistema de control de presión

Se consideró la posible variación manual de los puntos de tarado de presión y de carga. Se construyeron modelos del regulador de presión y de los actuadores de las válvulas de control y *baipass*. Se consideró la respuesta no lineal de las válvulas. Se construyó un modelo del grupo turbogenerador, que no está modelado físicamente. La modelización permite la apertura manual del *baipass* y el seguimiento automático de carga.

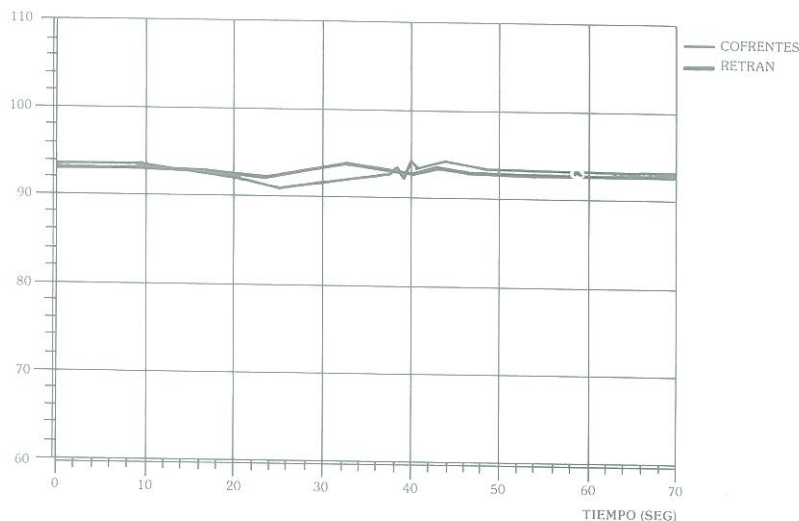
Sistema de control de agua de alimentación

Se construyó una curva de nivel en función del volumen, teniendo en cuenta que RETRAN sólo considera volúmenes de sección constante. Se modelaron el circuito programador de nivel en función del caudal de vapor y la modificación del punto de tarado de nivel después de la parada de emergencia y por acción del operador. Se incluyó un selector de tres a un elemento y el controlador de caudal con transferencia manual automática *antiwindup*. Se modelizaron las válvulas de control de admisión de vapor a las turbobombas y la compensación por la respuesta no lineal y la posibilidad de operar con una o dos bombas. Por último, se incluyeron la corrección del caudal por presión en la vasija y la variación de entalpía del agua de alimentación en función de la carga.

DISPAROS

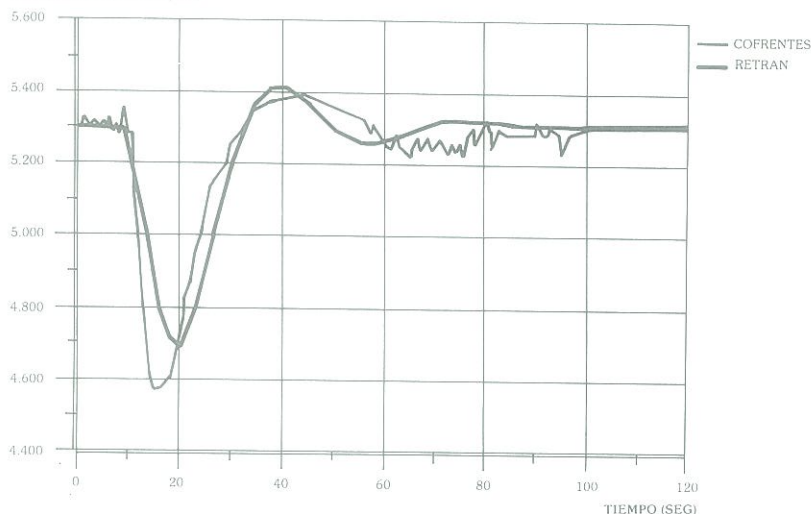
Se incluyeron 73 tarjetas de disparos correspondientes a parada de emergencia, turbina, turbobombas, bombas de recirculación, válvulas de alivio-seguridad, malfunciones y aislamientos.

POTENCIA (%)



F VI Potencia Nuclear VS. Tiempo.

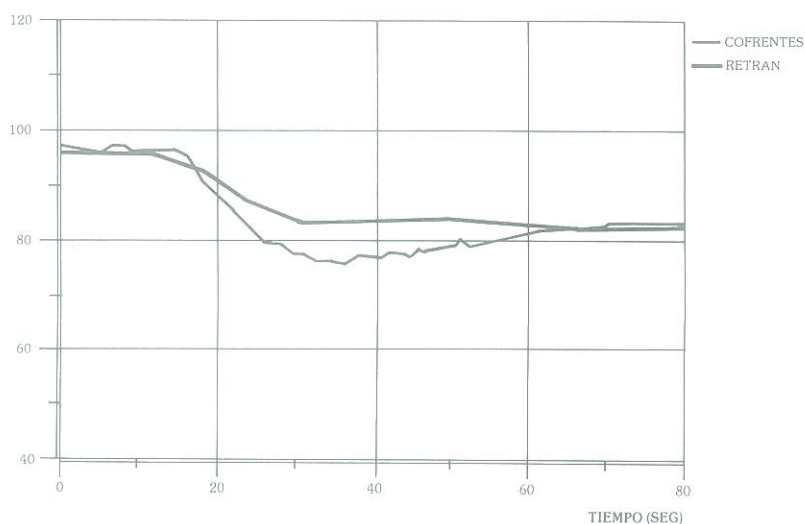
CAUDAL MASICO (TON/HR)



F VII Caudal Másico de Agua de Alimentación VS. Tiempo.

F VIII Nivel de Agua en la Vasija VS. Tiempo.

NIVEL (CM)



TRANSITORIO NULO

Se efectuó una pasada del código durante cien segundos a partir de la inicialización del estado estacionario con todo el modelo incluido. Este se consiguió en 10 iteraciones con los siguientes criterios de convergencia.

T II

PRESION DE ACELERACION MAXIMA	5×10^{-5}
ERROR DE ENTALPIA	5×10^{-6}
ERROR DE BALANCE DE MASA	5×10^{-8}

DESCENSO DE CARGA CON RECIRCULACION

Se redujo carga con el sistema de control de recirculación para obtener valores de central a distintas potencias y compararlos con datos horarios del computador de procesos. La reducción de potencia del 100 al 70 % se efectuó mediante un generador de función y un disparo conectados al controlador de flujo del sistema de control de recirculación. La rampa tenía una pendiente de 1 % de potencia por se-

gundo. Para potencias inferiores al 70 %, la reducción en caudal se efectuó con la misma pendiente en el modo «caudal». Las comparaciones se muestran en las Figuras III, IV y V.

Hay que señalar que esta comparación se hace fundamentalmente con objeto ilustrativo, dado que los datos horarios del computador de procesos no incluían información acerca del Balance de Central como número de calentadores activos, etc.

BAJADA DEL PUNTO DE TARADO DEL NIVEL DE AGUA DE ALIMENTACION

Como otro ejemplo de transitorio simple se analizó el caso de la bajada de punto de tarado del nivel de agua de alimentación. La comparación entre los datos de central y de RETRAN se incluye en las Figuras VI, VII y VIII.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Félix Castrillo y Juan Serra, de Hidroeléctrica Española, su ayuda en la recopilación de información

y su participación en la construcción de algunos de los submodelos. John Atchinson, de Energy Incorporated, prestó asistencia técnica en algunos aspectos de la construcción del modelo.

REFERENCIAS

- (1) EPRI NP 1850-CCM: RETRAN-02 A Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems
Volume 1: Theory and Numerics
Volume 2: Programmer's Manual
Volume 3: User's Manual
Volume 4: RETRAN Applications
- (2) EPRI-WS-80-150: Conference Proceedings. First International RETRAN Conference.
- (3) Proceedings of the Fourth International RETRAN Meeting. A Publication by EPRI.
- (4) EPRI NP 3835: Determination of Several LWR Realistic Success Criteria for Probabilistic Risk Assessment.
- (5) NSAC-70: Reducing BWR Power by Water Level Control During an ATWS.
- (6) Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe. Crane CO.
- (7) Handbook of Hydraulic Resistance. I. E. Idel'chik National Technical Information Service.

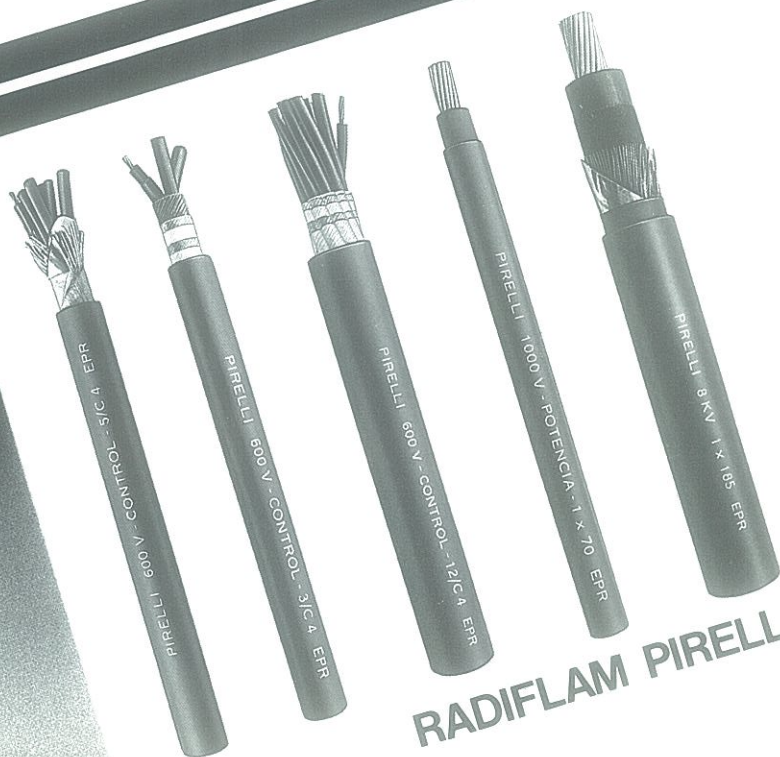
ABLES

IRELLI

EN LAS CENTRALES NUCLEARES

- CABLES DE POTENCIA MEDIA Y BAJA TENSION.
- CABLES DE CONTROL.
- CABLES DE INSTRUMENTACION.

- CABLES DE TERMOPARES.
- CABLES DE CONEXIONADO DE PANELES.
- CABLES COAXIALES Y ESPECIALES.



RADIFLAM PIRELLI