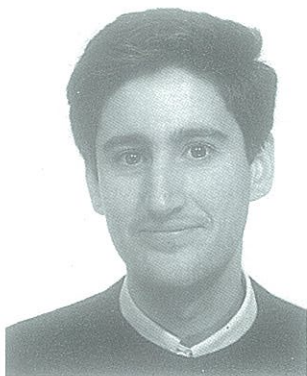




César DE LA CAL LOSADA es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid (1977). En 1982 se incorporó al proyecto de la Central de Trillo, donde desde 1987 ocupa el puesto de Jefe de Ingeniería de Producción.

MODELO DE SIMULADOR DE C. TRILLO I CON ALMOD4

C. DE LA CAL - J. C. MARTINEZ



Juan Carlos MARTINEZ-MURILLO MENDEZ es Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. En 1985 participó en el proyecto LOFT dentro de la ETSIIM. En 1986 ingresó en TECNATOM dentro del grupo de PWR del proyecto MAS. Dentro de este proyecto trabajó durante un año en el GRS de Alemania. Desde 1989 presta sus servicios en PABLO MORENO, S. A., dentro del área de termohidráulica aplicada a instalaciones nucleares.

INTRODUCCION

La central de C. Trillo I viene desarrollando desde 1985 un proyecto de análisis termohidráulico con el objetivo fundamental de profundizar en la comprensión del comportamiento dinámico de la planta tanto en operación normal como en transitorios.

El proyecto incluyó como parte importante del mismo el desarrollo propio de modelos completos de la planta basados en los códigos RELAP5/MOD2 (ref. 1) y ALMOD4/MOD1 (ref. 2). Dentro de este desarrollo se realizaron cálculos pre y post-test de todas las pruebas de arranque significativas (11), así como todos los transitorios operacionales ocurridos hasta la fecha.

Este artículo presenta los resultados y conclusiones de los trabajos más importantes desarrollados con ALMOD y su comparación con los datos de las pruebas correspondientes y con los análisis efectuados con RELAP.

El código ALMOD se ha utilizado dentro de un convenio de colaboración GRS/C. Trillo I que ha jugado un papel importante tanto en la puesta a punto de los modelos como en la formación del equipo de análisis de C. Trillo I.

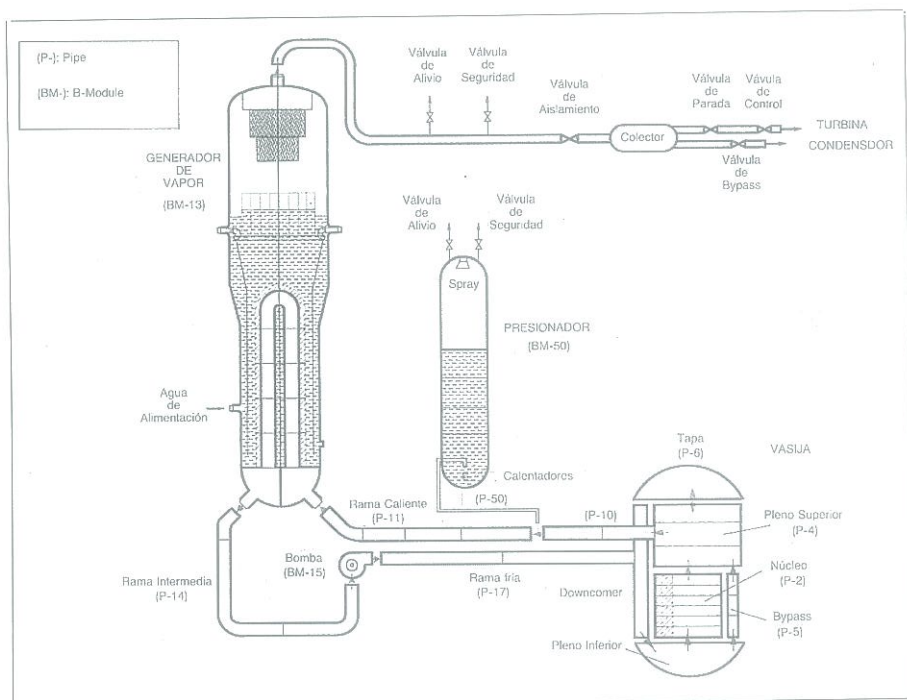
MODELOS DE PLANTA ALMOD/RELAP

La planta nuclear C. Trillo I es un PWR de 3010 MW térmicos con tres lazos de refrigeración, diseñada por Siemens-

KWU. Todos los componentes principales de la central son similares a los del resto de las centrales PWR por lo que la nodalización utilizada no diferirá de las de éstas.

En la figura 1 se representa la nodalización de ALMOD. Mientras el modelo desarrollado con ALMOD utiliza un único lazo triple con los componentes especiales presionador y generador de vapor AKW de dicho código, el modelo desarrollado con RELAP plantea los tres lazos independientemente. La sencillez del modelo para Trillo de ALMOD frente al de RELAP se puede cuantificar sin más que comparar los 44 volúmenes equivalentes de ALMOD con los 149 de RELAP.

Una de las innovaciones principales de la tecnología KWU está en el control automático de la planta. Además de los habituales sistemas de control y protección del reactor, incluye un sistema adicional llamado sistema de limitaciones. Este sistema ocupa un espacio intermedio entre los otros dos, encargándose de los transitorios demasiado fuertes para el sistema de control, pero que no necesariamente tienen que producir el disparo del reactor. Por tanto, con este sistema se limitan los disparos innecesarios del reactor, aumentando la disponibilidad de la planta. Es muy interesante, desde el punto de vista de la simulación, analizar transitorios de esta planta como disparos de turbina o pérdidas de agua de alimentación en los que, en lugar de disparar el reactor, se reduce la potencia al 30% o al 45%. Este comportamiento pone a prueba los códigos y los modelos empleados, ya que tanto el control de la



FI Nodalización de C. Trillo I con ALMOD.

potencia (movimiento de bancos, cinética) como la respuesta termohidráulica de los componentes deben ser muy buenas si se quieren alcanzar los valores de estabilización de la planta. Nótese que un pequeño error en la potencia conduce a grandes variaciones en otros parámetros, cosa que no ocurre en otras plantas PWR donde el reactor se dispara al inicio del transitorio.

La parte de control del modelo de ALMOD se ha desarrollado de forma totalmente equivalente a la de RELAP, incluyendo los sistemas de control, limitaciones y protección. Debido al gran número de sistemas de control ha sido necesario ampliar el número máximo de bloques de control de ALMOD a 3000. También el apartado de cinética se ha hecho equivalente al de RELAP incluyendo la implementación del cálculo del calor residual.

LOS GENERADORES DE VAPOR

El código ALMOD4, como todos los programas de cálculo para la simulación de reactores nucleares (en este caso PWR), se basa en cálculos termohidráulicos y presenta además módulos adicionales como control, cinética y conducción de calor. La termohidráulica se construye a partir de un modelo homogéneo de tres ecuaciones de conservación en el que las fases se encuentran en equilibrio cinético y termodinámico. Esto hace de ALMOD un código relativa-

mente sencillo si lo comparamos con el modelo de dos fluidos con seis ecuaciones de conservación de RELAP. Esta simplicidad, que proporciona buenos resultados para flujos monofásicos (circuito primario), no es aplicable en los componentes en los que la separación de las fases es fundamental, presionador y generador de vapor. Así, mientras con RELAP se modelan estos componentes con los elementos básicos PIPE, con ALMOD se utilizan módulos especiales. Estos módulos no plantean ecuaciones de conservación adicionales, sino que simulan la no homogeneidad a través de correlaciones empíricas y distribuciones espaciales de líquido y vapor.

El generador de vapor ha sido el componente crítico para el modelo de planta de C. Trillo I. El código ALMOD modela el secundario mediante el módulo de generador de vapor AKW que incluye las líneas y el colector de vapor dentro de un único volumen en condiciones de equilibrio termodinámico. A este volumen único se incorpora calor desde el primario, agua de alimentación por el secundario y se extrae vapor a través de las válvulas de turbina, bypass, alivio y seguridad. Con estas condiciones de contorno se resuelven dos ecuaciones diferenciales de conservación, una de la masa y otra de la energía. Ambas ecuaciones nos proporcionan la presión única de todo el secundario y la entalpía de la mezcla. De esta última variable se extrae el porcentaje de líquido y vapor, caudal de vapor, nivel, etc.

Esta concepción simple de un fluido homogéneo en un único volumen sin

caudales internos contrasta con la complejidad de la nodalización del generador de vapor de RELAP. Esta nodalización que no utiliza más componentes especiales que el separador de vapor simula los complejos caudales internos como dos fluidos separados que se acoplan entre sí por relaciones constituyentes (arrastre, fricción, ...) en función del modelo de flujo bifásico reinante (burbujas, anular, ...).

Por tanto, vemos que la misión del generador de vapor, que es producir vapor con el calor que le transfiere el circuito primario y dejarlo salir hacia la turbina, se simula en ALMOD con ebullición saturada con toda la masa en equilibrio térmico, mientras en RELAP puede darse ebullición subenfriada, saturada, en película con volúmenes en desequilibrio termodinámico. La simulación de ambos códigos será coincidente cuando el estado del generador de vapor pueda considerarse como homogéneo (caso del estado estacionario) y similar para muchos de los transitorios de planta.

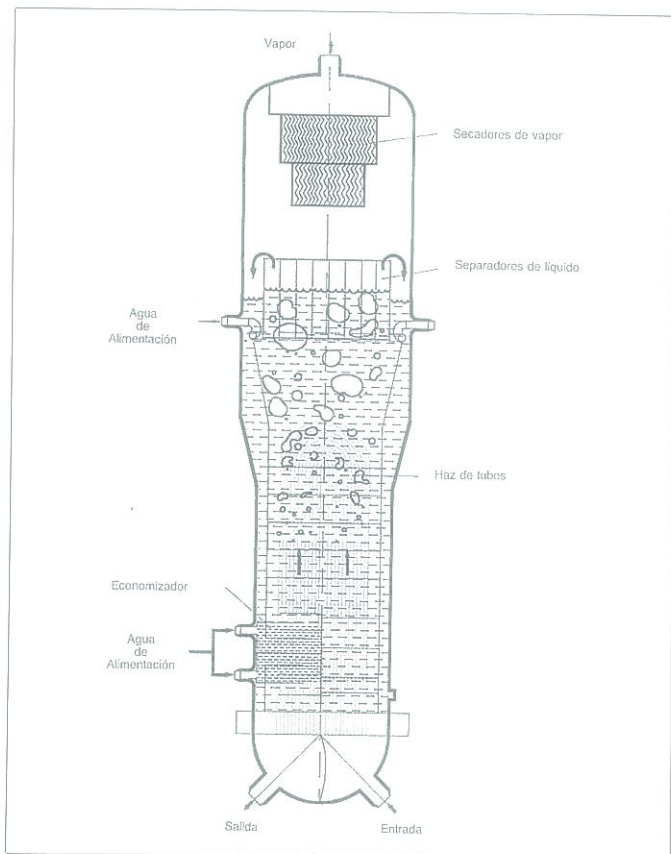
El equilibrio dinámico alcanzado en estado estacionario en el que el calor absorbido es equivalente al vapor generado se representa esquemáticamente en la figura 11. En ella se destacan dos caudales internos, el primero es el caudal de vapor ascendente que produce un arrastre importante de líquido, el segundo es el caudal de recirculación del líquido desacelerado en los separadores. Este líquido se incorpora al downcomer, con un valor de caudal másico del orden del doble que el del vapor.

Estos fuertes caudales internos producen una buena mezcla en todo el generador de vapor por lo que, salvo en el economizador, se puede considerar todo el líquido en saturación.

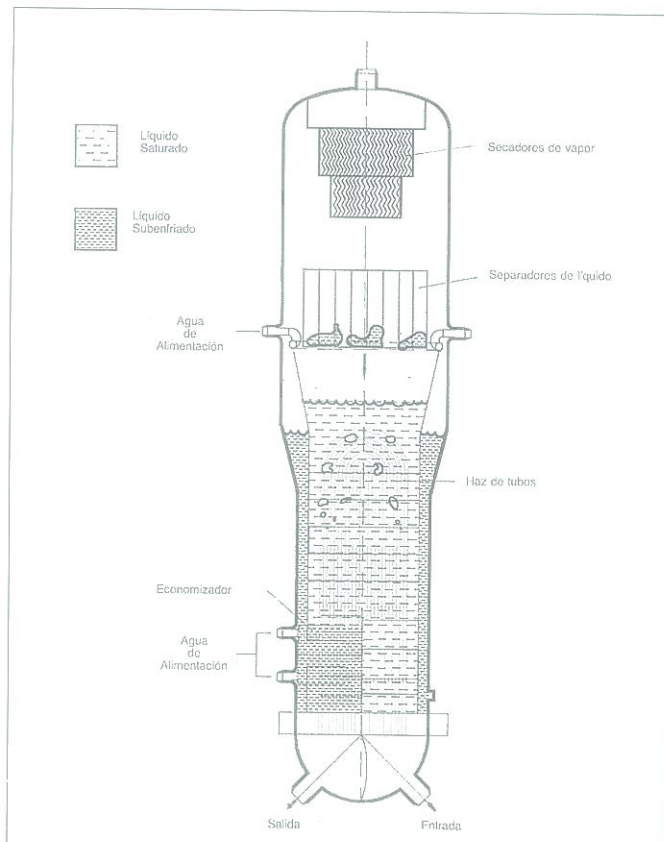
Cuando se produce el corte del caudal de vapor (disparo de turbina, aislamiento, etc.) concurren dos fenómenos fundamentales:

- Aumento de la presión por continuar la generación de vapor.
- Anulación casi total de los caudales internos.

Estos dos fenómenos hacen que desaparezca la condición de homogeneidad del secundario, ya que al aumentar la temperatura de saturación todo el líquido que no recibe calor de los tubos (downcomer, separador, bypass) estará en condiciones de subenfriamiento (figura 11). Esta condición se simula correctamente con RELAP, que genera vapor con el líquido en contacto con los tubos permaneciendo el resto subenfriado. Por su parte, con las condiciones de contorno obtenidas del modelo de RELAP (caudales de entrada y salida, calor primario-secundario), el código ALMOD emplea el calor transmitido en elevar la entalpía de mezcla (en condiciones de



F II Generador de Vapor en estado estacionario (saturación).



F III Generador de Vapor en estado transitorio (no homogéneo).

saturación) de todo el inventario másico y con ella la presión.

Por tanto, se puede decir que mientras RELAP "evapora", con el mismo calor ALMOD "satura" generando menos vapor. De este comportamiento se deriva una subestimación de la presión para ALMOD al imponer las condiciones de contorno de RELAP.

Si ahora consideramos el cálculo de ALMOD gobernado por sus sistemas de control, vemos que la variable controlada por medio de la válvula de bypass es la presión del secundario. Para ajustar esta variable, el caudal de vapor extraído durante el transitorio no puede coincidir con el de RELAP. Dado que la transmisión de calor en los tubos del secundario en ALMOD depende sólo de la temperatura del secundario (saturación), se admite una pequeña libertad en el cálculo del vapor extraído durante los transitorios como medio de ajuste de la presión y con ella de la extracción de calor del primario.

Una vez finalizado el transitorio se llega a un estado estacionario, en el que el calor generado en el primario se extrae a través de la válvula de bypass de turbina. Este caudal de vapor reestablece un cierto arrastre en el secundario y tiende a "homogeneizar" el mismo con lo cual ambos códigos simulan estados similares.

MODIFICACIONES AL CODIGO ALMOD

Se señalan a continuación, algunas de las modificaciones realizadas al código con el objetivo de incorporar ciertas mejoras.

CALCULO DEL CALOR RESIDUAL

Al analizar las discrepancias en el cálculo de la potencia con relación a RELAP se ha comprobado que la potencia de fisión calculada con las ecuaciones generales de cinética puntual coincide en ambos códigos. Ello significa que la diferencia debía encontrarse en el cálculo de la potencia residual. El código ALMOD utiliza una tabla, cuyo valor inicial fija un porcentaje de potencia para estado estacionario y transitorios sin disparo del reactor y el resto de los valores aplican en el caso de que éste ocurra. Está claro que este planteamiento no es válido para los transitorios de C. Trillo I, en los que no dispara el reactor y existe una gran variación en la potencia de fisión. Esta gran disminución del número de fisiones producirá un descenso no lineal en las poblaciones de los productos de fisión de los distintos isótopos. Sin em-

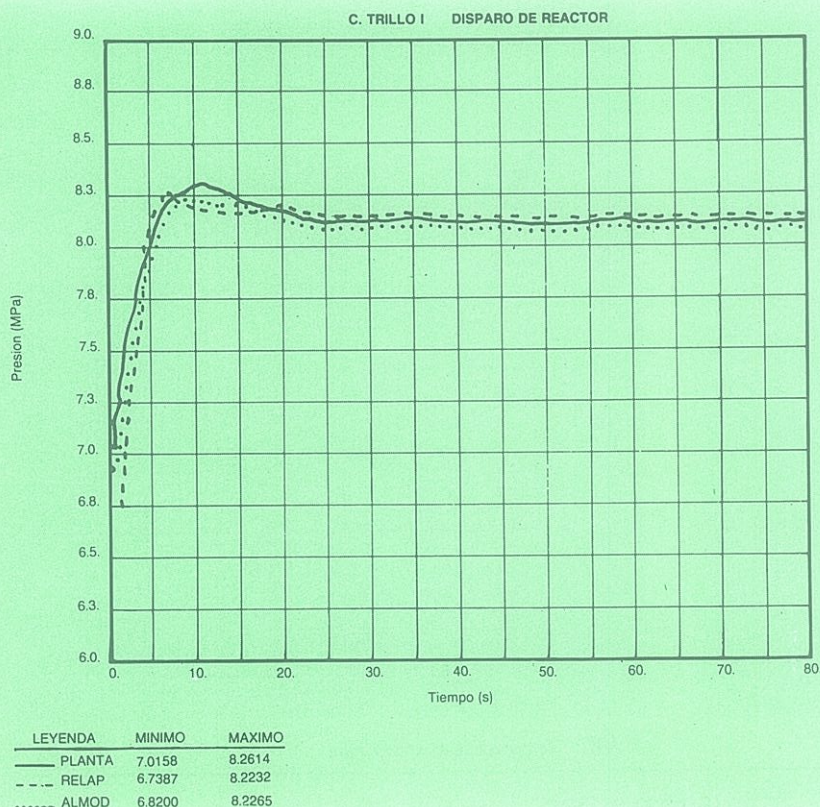
bargo, el cálculo original de ALMOD (calor residual = porcentaje fijo de la potencia), equivale a considerar como proporcionales todas las familias de los productos de fisión.

Para corregir esta deficiencia se ha programado una subrutina nueva dentro de ALMOD, que calcula el calor de decaimiento resolviendo un sistema de ecuaciones diferenciales. El modelo es el mismo que utiliza el código RELAP5/Mod2 y tiene en cuenta las aportaciones de los productos de fisión de los isótopos U^{235} , U^{238} y Pu^{239} tipificados en 24 familias, así como de los actínidos U^{239} y Np^{239} (ref. 3).

TRANSMISION DE CALOR EN LOS GENERADORES DE VAPOR

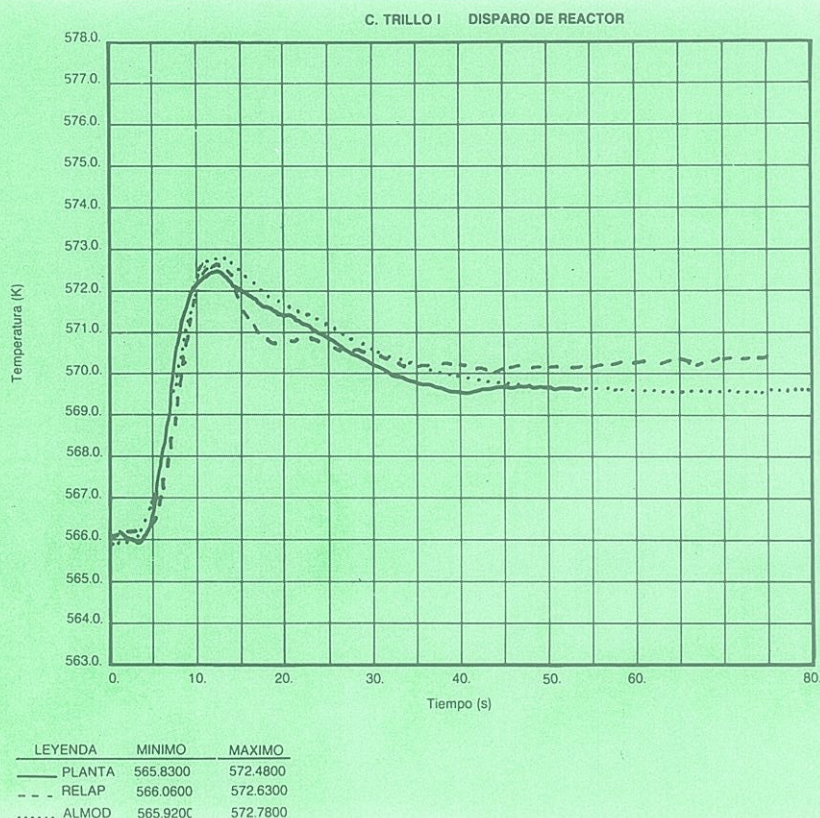
Para calcular el flujo calorífico transmitido desde los tubos al secundario del generador, el código ALMOD realiza un balance en estado estacionario y aplica una correlación en función del salto térmico (tubos-secundario) para transitorios.

Como se ha descrito en este artículo, el modelo del generador de vapor de ALMOD4 sólo contempla ebullición saturada, por lo que al ajustar la presión del secundario, el salto térmico será menor



F IV Presión Generador de Vapor.

F V Temperatura Rama Fría.



que si existe ebullición subenfriada como ocurre en la realidad y en la simulación con RELAP. Este problema dificulta el ajuste de los transitorios al verse limitada la capacidad de refrigeración de los generadores de vapor. Para solventarlo se ha incluido una nueva correlación en función del salto térmico y la presión del secundario, que proporciona valores superiores de coeficiente de transmisión de calor tubos-secundario (ref. 4).

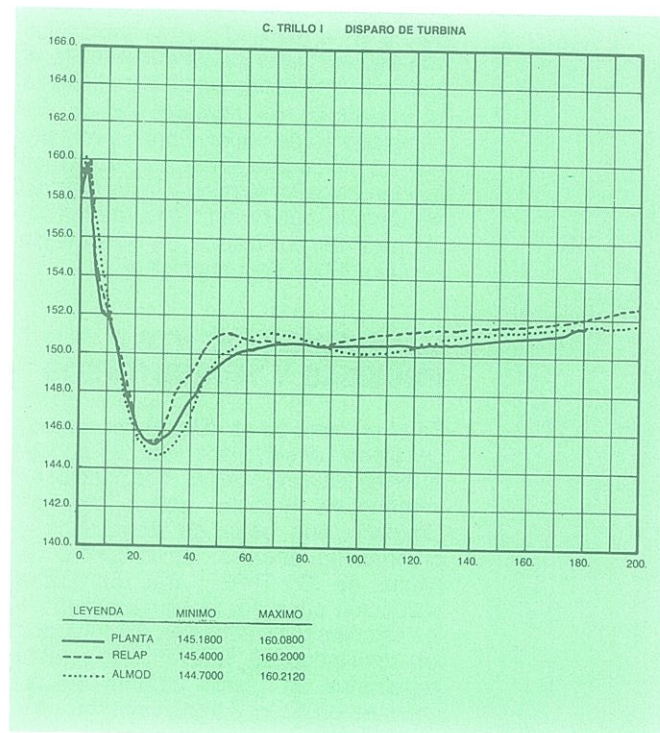
VALIDACION FRENTE A PRUEBAS Y TRANSITORIOS

En el proceso de validación del modelo de planta desarrollado con el código ALMOD, así como de las modificaciones introducidas a dicho código, se han simulado una serie de transitorios y pruebas de arranque de dinámica de planta de C. Trillo I (ref. 5). Dicha validación pasa por la comparación de los cálculos realizados con ALMOD, con los resultados de RELAP y los datos registrados en planta durante las siguientes pruebas y transitorios no programados:

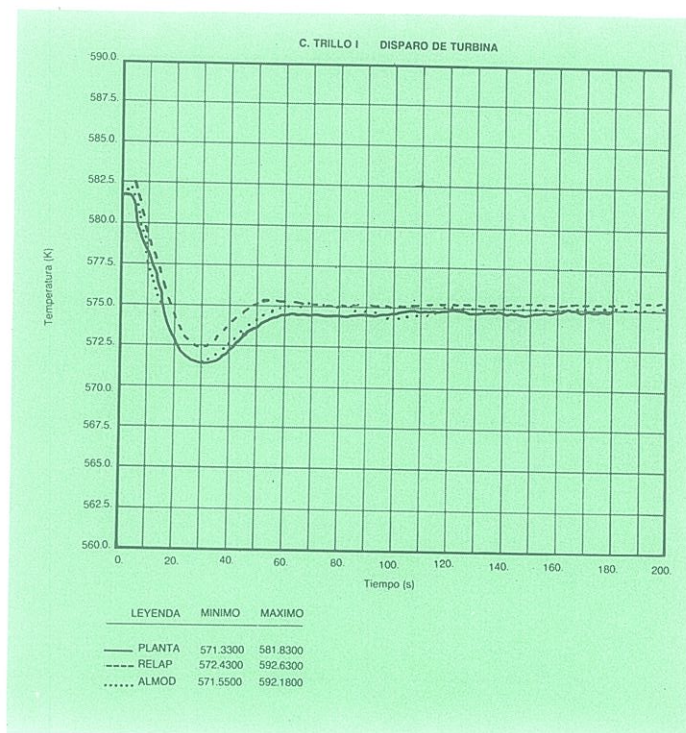
- Disparo del reactor desde el 100% de potencia sin fallos adicionales (D-100-301).
- Disparo de turbina desde el 100% de potencia con el sistema de bypass disponible (D-100-303).
- Pérdida total de agua de alimentación sin conexión de la bomba de reserva (24-VIII-88).
- Pérdida parcial de agua de alimentación sin conexión de la bomba de reserva (D-100-603).

El transitorio de *disparo del reactor* con todos los sistemas activos es relativamente sencillo de simular y ha permitido ajustar la transmisión de calor en el generador de vapor durante transitorios, así como la presión del secundario. La iniciación del transitorio se debe a la señal manual de disparo del reactor, la cual produce la inserción de las barras de control por el sistema de protección y el cierre de la válvula de parada rápida de turbina. El sistema de bypass de turbina controla la subida de presión secundaria, encargándose de evacuar el calor residual generado en el reactor.

En la figura IV se observa el buen comportamiento de la presión del secundario, estabilizada al valor máximo de 8.14 MPa. Una de las variables fundamentales utilizadas para ajustar la transmisión de calor primario-secundario es la temperatura de la rama fría, que según se refleja en la figura V, sufre el descenso de la transmisión de calor y el posterior efecto de la caída de potencia primaria. El transitorio de *disparo de turbina* es bastante más complejo que el anterior, ya que en lugar de disparar el reactor, el sistema de limitación reduce la potencia



F VI Presión Primario.



F VII Temperatura Media Primario.

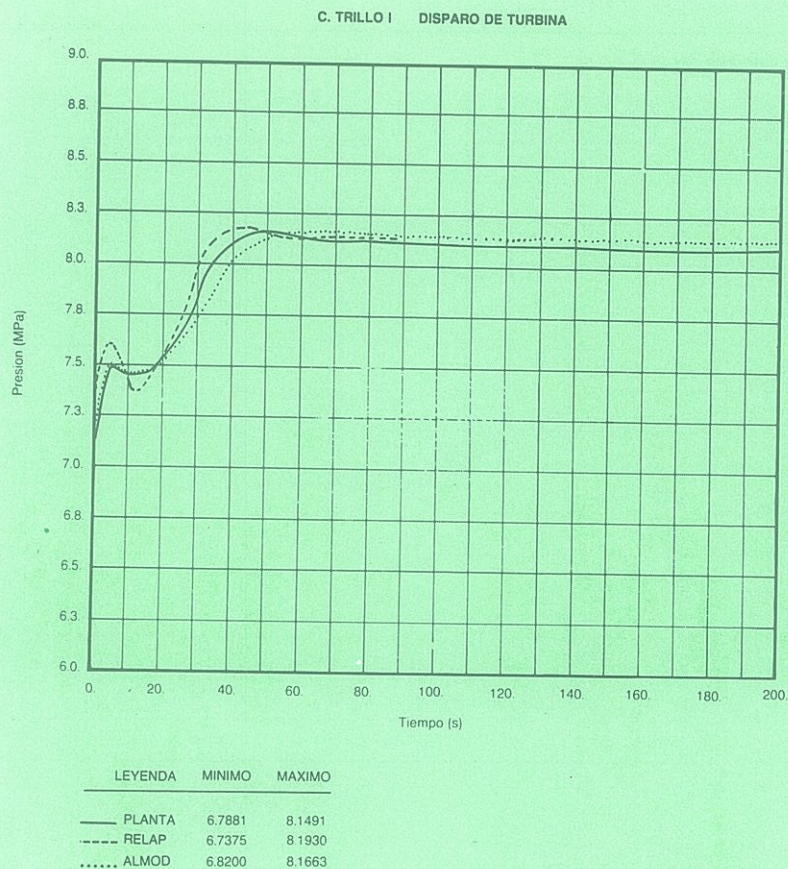
F VIII Presión Generador de Vapor.

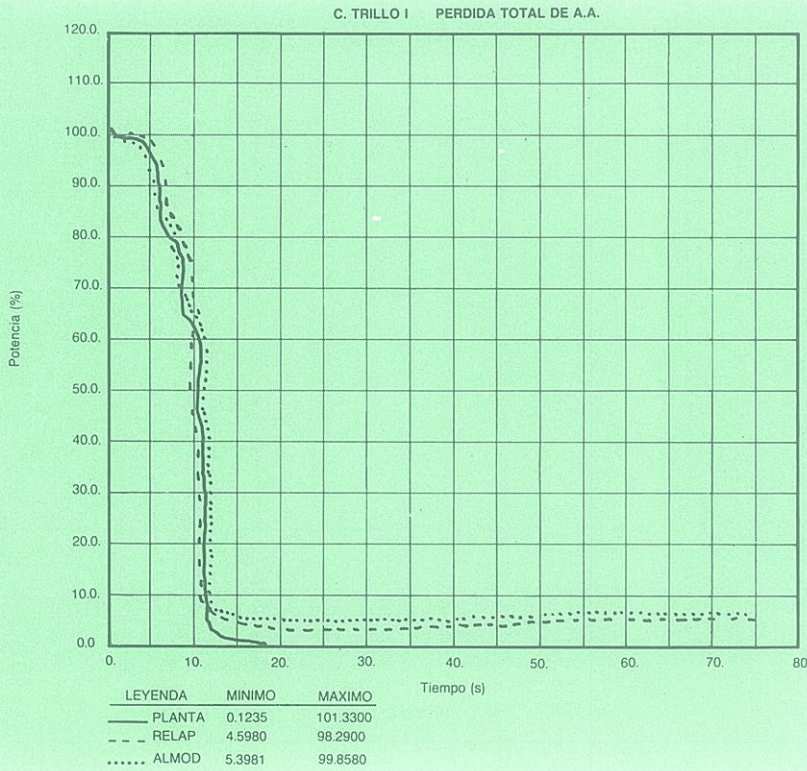
primaria al 30% por medio de una inserción (STEW) síncrona de barras. En este caso también es el sistema de bypass de turbina el encargado de controlar la presión extrayendo todo el calor generado en el reactor a este nivel de potencia.

En las figuras VI a VIII se recogen los resultados de las variables fundamentales para el transitorio, presión del primario, temperatura media y presión del secundario, junto con los datos de planta y los resultados de RELAP. En ellas se observa el buen ajuste de ambos modelos durante todas las etapas del transitorio, así como de los valores de estabilización del mismo.

El transitorio de *pérdida total de agua de alimentación* se caracteriza por una reducción de la potencia permitida del reactor al 45% y del alternador al 30% al detectarse la disminución brusca del caudal de entrada. La reducción efectiva de potencia se lleva a cabo mediante STEW secuencial de las barras de control. Al cabo de 10 sg. de espera se activa la introducción total de barras al no arrancar la bomba de reserva. Una vez disparado el reactor y cerrada la válvula de parada de turbina, el calor residual generado se extrae por medio de la válvula de bypass.

En la figura IX se recoge la evolución de la potencia térmica corregida, en el que se identifican los dos pasos de la introducción secuencial de las barras, al detectarse la pérdida del caudal de agua de alimentación y la posterior caída por





FIX Potencia Térmica Corregida.

el disparo del reactor. Los resultados de ambos códigos reproducen perfectamente los datos de planta. La presión en el circuito primario (figura X) sube hasta un valor próximo a los

16.4 MPa, produciéndose la apertura de las tres válvulas del sistema de spray del presionador. Como complemento a este transitorio se ha simulado con ambos códigos el caso

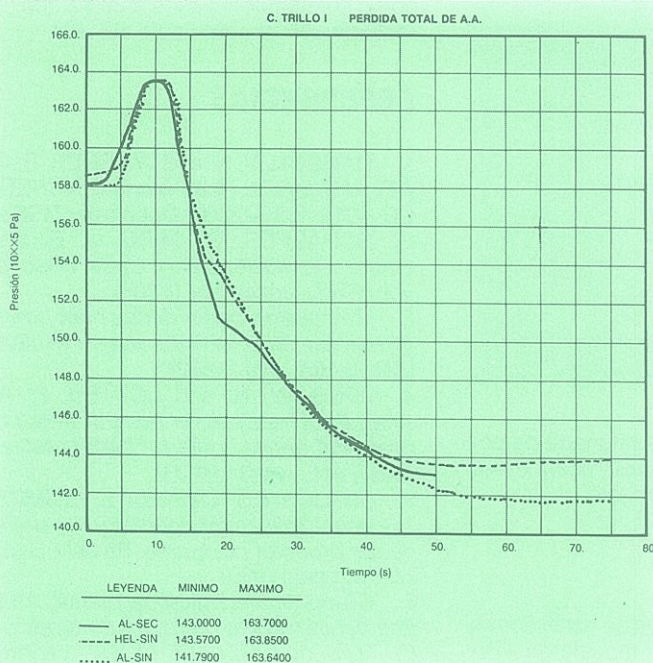
de pérdida total de agua de alimentación, con reducción de potencia primaria por STEW síncrono de barras de control. En la figura XI se compara la evolución de la presión del circuito primario, en los casos de STEW síncrono y STEW secuencial.

Ambos códigos coinciden en predecir una subida de presión del primario inferior en 0,2 MPa al caso anterior. Este estudio indujo al cambio en la lógica de control automático, con objeto de reducir la presión del primario, que podría producir un disparo no deseado del reactor, en caso de que entrara en actuación la bomba de reserva del sistema de agua de alimentación.

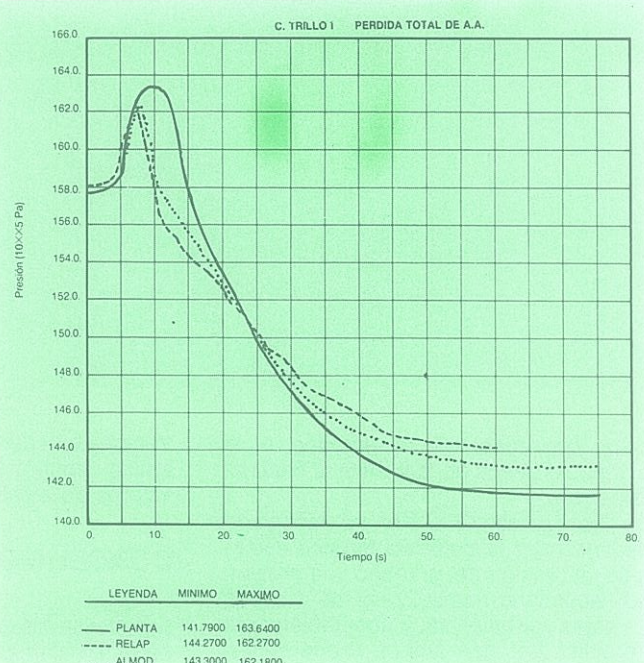
En el transitorio de *pérdida parcial de agua de alimentación*, la detección de la reducción del caudal de entrada a los generadores de vapor, activa la espera (10s) a la conexión de la bomba de reserva. Al no estar disponible dicha bomba se reduce la potencia permitida del reactor y del alternador al 45% y 30%, respectivamente. La reducción efectiva de la potencia del reactor se realiza mediante STEW secuencial de las barras de control (cuatro escalones).

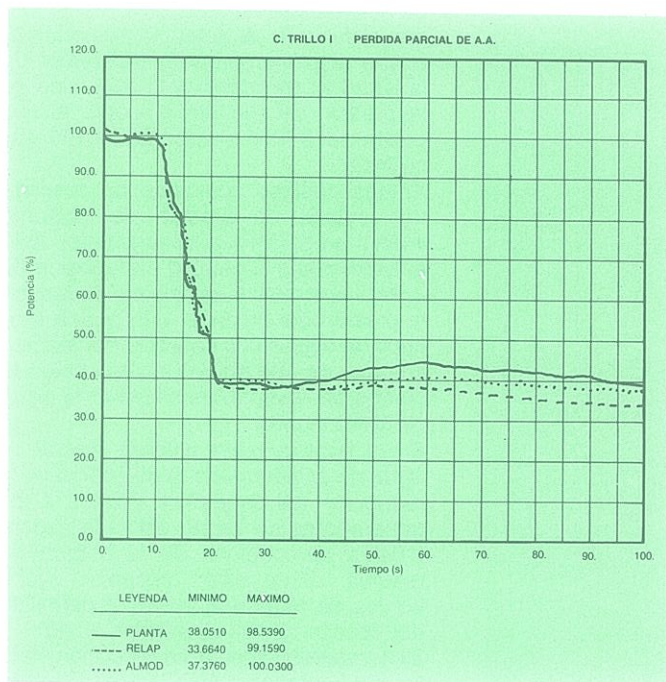
La mayor complejidad en la simulación de este transitorio reside en la actuación conjunta de los sistemas de regulación de la válvula de control de turbina y de la válvula de bypass. Mediante el primero de ellos se reduce la potencia en el alternador, hasta su valor máximo permitido. El sistema de bypass de turbina actúa limitando la subida de presión del secundario en la primera fase del transitorio y evacuando la diferencia entre el

FX Presión Primario.

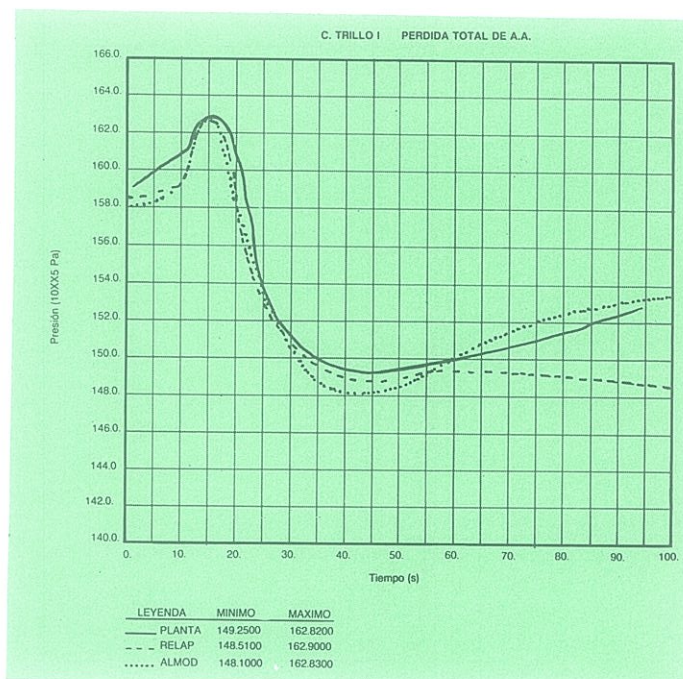


FXI Presión Primario.



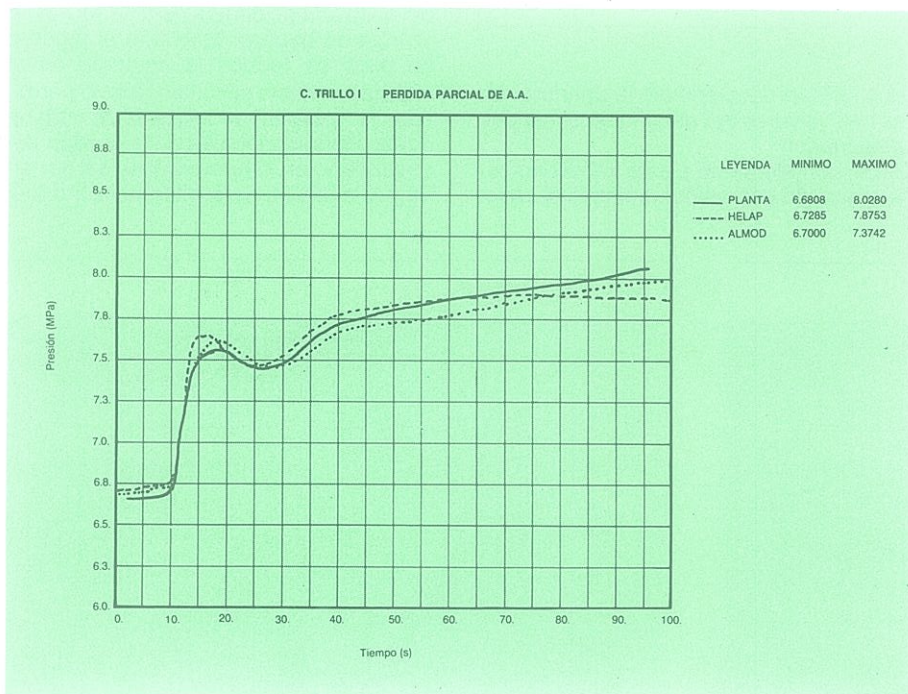


F XII Potencia Térmica Corregida.



F XIII Presión Primaria.

F XIV Presión Generador de Vapor.



calor generado en el primario y el extraído a través de la turbina al final del transitorio.

En las figuras XII a XIV se recoge la evolución de la potencia térmica corregida, la presión del primario y la presión del secundario, respectivamente. A través de estas variables, muy aceptablemente aproximadas por ambos modelos, se pueden seguir las distintas etapas del

transitorio, reducción escalonada de potencia, control de presión secundaria, valores de estabilización, etc.

CONCLUSIONES

Los resultados expuestos en este informe permiten afirmar que el modelo de TRILLO I desarrollado con el código AL-

MOD4/MOD1 reproduce de forma satisfactoria el comportamiento dinámico de la planta frente a los transitorios analizados.

Se puede afirmar, asimismo, que la comparación con los resultados del modelo de RELAP5/MOD2 es también satisfactoria para dichos transitorios.

El modelo desarrollado con ALMOD supone, por tanto, el disponer de una herramienta muy útil para realizar estudios de sensibilidad de forma rápida, como complemento a los análisis que se realicen con el modelo de RELAP.

REFERENCIAS

1. RANSON, V. H. and WAGNER, R. J.: *RELAP5/MOD2 Code Manual*, NUREG/CR-4312, EGG-2396. December (1985).
2. SCHAEFER, S., MIRO, J. E. and others: *ALMOD4/MOD1 Code Description*, GRS. December (1986).
3. *Calculation of the decay heat power in nuclear fuels of light water reactors*, DIN 25463, July (1982).
4. JENS, W. H. and LOTTES, P. A.: *Analysis of heat transfer burnout, pressure drop and density data for high pressure water*, ANL-4627 (1951).
5. SANJUAN, S., LARREA, E., GOMEZ, J.: *Central Trillo I, planificación y desarrollo de las pruebas nucleares*. Revista SNE, julio-agosto (1989).
6. Grupo de Dinámica de Planta, *Análisis del transitorio de rotura de tubos de C. Trillo con RELAP5/MOD2*. Informe interno C. Trillo I.