



R. TRUJILLO. - Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Sevilla y Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Politécnica de Madrid (ETSIM). Trabajó desde 1970 a 1985 en Auxesia Ingeniería Española S.A. (INITEC) en los Departamentos de Diseño y de Construcción de centrales nucleares y centrales térmicas de fuel-oil y carbón. Desde 1985 en ENDESA, en la Dirección de Producción Eléctrica (Explotación de centrales térmicas, 1985-1986), en la Dirección de Ingeniería (Jefe de I&C, 1986-1992) y Subdirección Nuclear (Control Explotación de centrales nucleares, desde 1992). En posesión de varios diplomas técnicos y de gestión expedidos por organismos nacionales y extranjeros y autor de numerosas publicaciones técnicas, desde 1983, sobre sistemas de control de procesos industriales.



P. MORENO. - Doctor en Ingeniería Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (ETSII-UPM) y Nuclear Engineer por el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Actualmente dirige la empresa Pablo Moreno S.A.

DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE NUEVOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN Y CONTROL PARA AUMENTAR LA DISPONIBILIDAD DE PWR

R. TRUJILLO - P. MORENO

INTRODUCCIÓN

En las centrales nucleares de diseño Westinghouse, y en concreto en la C.N. de Ascó, existen dos transitorios que, según los criterios de diseño actuales, suponen el disparo automático del Reactor. Estos son los siguientes:

- Disparo del Turbo-Alternador.
- Disparo de una turbobomba de agua de alimentación principal, con la señal de rechazo de carga (run-back) anulada.

Estos transitorios se repiten con una frecuencia alta [4], según consta en la Tabla I.

Las causas externas de DT están justificadas en la Tabla II, ya que la activación de cualquier señal de disparo con origen en cualquiera de estas causas desencadena un DT.

Evitar el DR cuando suceda cualquiera de estos dos transitorios, impidiendo siempre que tanto el núcleo como el refrigerante excedan sus límites de seguridad, redundará en una mayor disponibilidad de la planta y colaborará en el alargamiento de su vida al reducir los efectos de las tensiones térmicas que se generan por causa del citado disparo.

Para conseguir este objetivo se han realizado modificaciones de diseño en los SSPC de la planta, las cuales están referidas básicamente a la definición tanto de nuevas señales de activación como de las correspondientes señales de actuación de los sistemas, así como a la lógica y a las estrategias de control de los mismos [12].

Tabla I
Contribución en los disparos

TRANSITORIO	DT	DAAP
Causas equipos	12.38%	21.9 %
Causas externas	33.33%	
TOTAL	45.71%	21.9 %

Tabla II
Causas externas DT

DENOMINACIÓN	%
Red eléctrica y Protecciones	21.9
Distribución CA y Trafos	8.57
Agua circulación	2.86
Total	333

La verificación de los nuevos diseños se ha efectuado demostrando que, ante la ocurrencia de los transitorios DT y DAAP, el Reactor no dispara y la planta posteriormente permanece en situación estable y segura [12]. Además se demuestra, que en ningún momento se rebasa el límite termohidráulico que se aplica, es decir, que el mínimo coeficiente del límite de ebullición nucleada (CLEN) en la barra de combustible más limitante es mayor de 1,3, durante dichos transitorios. Para ello, en primer lugar, se ha realizado un modelo termohidráulico y neutrónico completo de la planta, con el código RELAP5/MOD2, incluyendo los SSPC modificados. En segundo lugar, se ha desarrollado un modelo del núcleo con el código COBRA IIIC/MIT con objeto de analizar su comportamiento.

La respuesta de otras centrales nucleares a estos dos transitorios es la que se refleja en las Tablas III y IV.

ANÁLISIS DE LA PLANTA

Para la verificación de los nuevos diseños de los SSPC que se describen más adelante se ha utilizado el código RELAP5/MOD2 y un modelo de planta que se ha basado en los siguientes desarrollos [7,9,12]:

Modelo Termohidráulico

El modelo termohidráulico empleado para simular la planta está representado en la Figura 1. Consta de 134 volúmenes, 146 uniones, 32 estructuras de calor y 259 variables de control. El modelo incluye la vasija, los tres lazos del primario, el presionador, los tres GG.VV., los tres lazos del secundario y las tuberías de vapor. La Turbina y el condensador se han modelado como volúmenes dependientes del tiempo. El modelo no agrupa, como es usual en otros casos, los tres lazos de generación de vapor en solo dos (incluyendo uno de ellos el presionador) por las siguientes razones, entre otras: diferente número de tubos taponados en cada generador, diferente longitud de las tuberías de vapor en cada lazo, distribución asimétrica del agua de alimentación auxiliar entre los tres GG.VV., etc.

Modelo Cinético

El modelo cinético se ha realizado usando la opción de cinética de Reactor de que dispone el código RELAP5/MOD2, con los datos de planta. El modelo incluye una tabla de "scram" con valores de reactividad referidos al tiempo, la cual se activa por la señal de DR. El modelo suministra la reactividad de los bancos de control C y D y se añade a las reactividades de realimentación (Doppler y Moderador) calculadas para la condición de quemado específico de cada transitorio. Se han empleado los coeficientes correspondientes al ciclo de combustible N°7 a final de vida (EOL).

Modelo de los sistemas de Protección y Control

Este modelo se ha realizado usando los bloques de control del código RELAP5/MOD2 y siguiendo los estudios específicos de puntos de signa, los

Tabla III
Respuesta de otras CC.NN

CC.NN.	FABRICANTE	POTENCIA (Mwe)	DT(*) 100%Pot.	DAAP (*) 100%Pot.
ALMARAZ 1,2	WESTINGHOUSE-1,2	930 (1,2)	DR(1,2)	(V)-1,2
VANDELLÓS 2	WESTINGHOUSE	982	DR	(V)
TRILLO 1 ¹²	KWU-SIEMENS	1041	(I)	(IV)
DOEL 1,2,3,4	ACECOWEN-1,2,4 FRAMACECO-3	392 (1,2) 900 (3) 1010 (4)	DR (1,2,3,4)	(II) -1,2 (III) -3,4
TIHANGE 1,2,3	ACLF-1 FRAMACECO-2 ACECOWEN-3	870 (1) 900 (2) 1020 (3)	(I) -1 (I) -2 (I) -3	(II) -1 (III) -2 (III) -3

(*) Véase Tabla IV

Tabla IV
Leyenda de las actuaciones

LEYENDA	SIGNIFICADO
(I)	Apertura By-pass vapor sin DR.
(II)	Dos motobombas y señal runback del 76% si dispara una.
(III)	Tres motobombas. No necesita señal de runback.
(IV)	Tres motobombas. Runback del 45% después de 10 segundos del disparo de una bomba sin conexión de la de reserva.
(V)	Dos turbobombas y runback 70%. Sin tanque alimentación.

diagramas lógicos y las especificaciones técnicas de la planta [1,5]. Este modelo incluye los siguientes sistemas: Protección del Reactor, Inyección de Alta Presión, Control y Disparo de Turbina, Control de Agua Alimentación Principal (AAP), Control de Presión y Nivel del Presionador, Control del By-pass de Turbina, Control de T_m del refrigerante, Aislamiento Líneas de Vapor, Aislamiento del AAP y Válvulas de Alivio y Seguridad del Secundario.

Validación del Modelo

El proceso que se ha seguido para la validación del modelo se basa en la comparación de los resultados (planta y código) tanto en estado estacionario como en caso de transitorio [8]. Los cálculos en estado estacionario se han realizado iniciando un transitorio y

observando que las variaciones de los valores calculados de los parámetros principales alcanzan unos valores aceptables. Por otra parte, para el mismo proceso de validación se han seleccionado seis transitorios de los que se tienen datos de planta con una precisión razonable y son los siguientes: Pérdida de suministro eléctrico exterior, apertura en fallo de la válvula de rociado del presionador, disparo de Turbina sin apertura del By-pass y sin válvulas de alivio del secundario, pérdida de agua de alimentación auxiliar (AAA), disparo de Turbina con todos los sistemas disponibles y escalón de potencia de la Turbina.

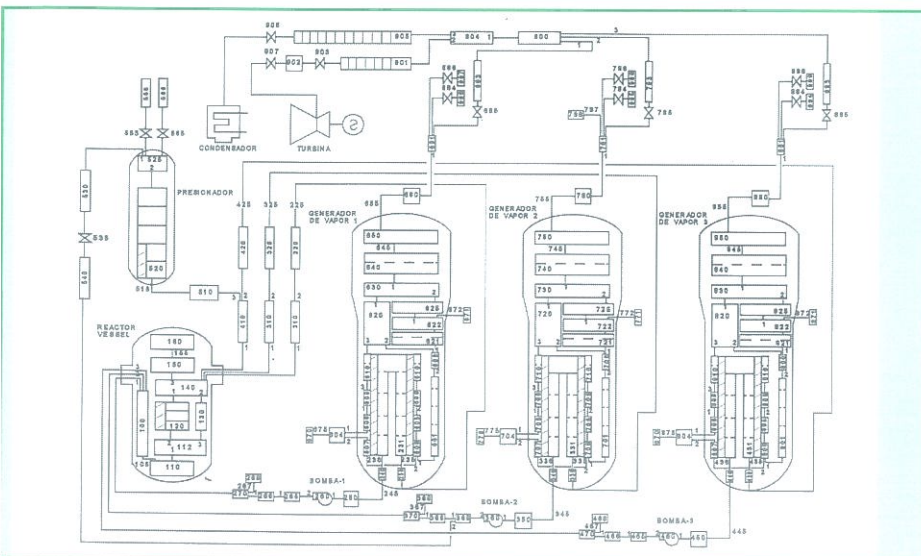
ANÁLISIS DEL NÚCLEO

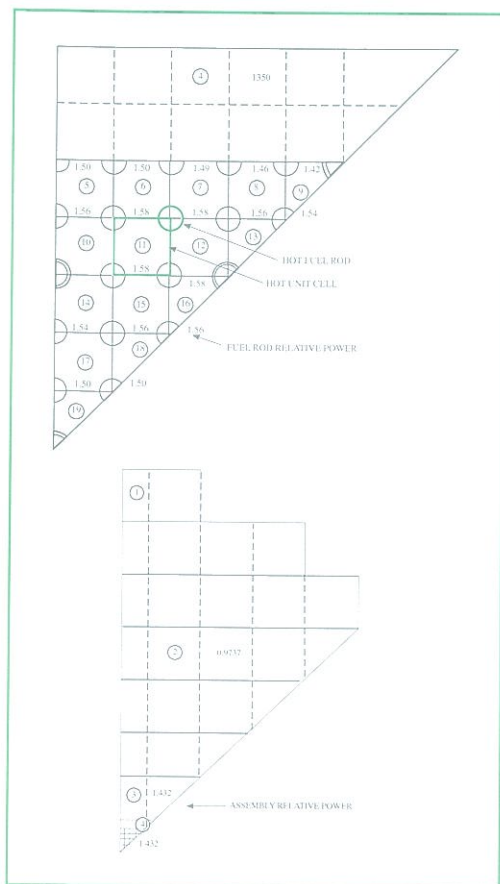
Para la verificación de los diseños citados anteriormente se ha utilizado el código COBRA IIIC/MIT [2] y un modelo de núcleo. Se ha seleccionado, para dicho análisis, el método "simplificado o de paso único" que exige la identificación previa del subcanal más caliente en virtud de su factor de pico de potencia radial y de su ubicación en el elemento de combustible más caliente, rodeando a la zona conflictiva con una malla fina de 15 subcanales, según se observa en la Figura 2, para continuar con una malla gruesa de 4 canales que cubre todo el núcleo [6,10,12].

Modelo Hidráulico

Este modelo predice las fracciones de huecos mediante la correlación de Smith en conjunción con el modelo de ebullición subenfriada de Levy, utilizando el flujo calorífico local y las condiciones del fluido para predecir su calidad termodinámica.

FI - Nodolización





F II - Modelo 19 canales. Malla Fina (arriba) y Malla Basta (abajo).

Calcula las pérdidas de presión en estados mono y bifásicos mediante el factor de fricción isotérmico [14], corregido por la temperatura de la pared de la vaina, según la expresión:

$f_{iso} = 0,184 (Re)^{0,2}$; siendo Re el número de Reynolds.

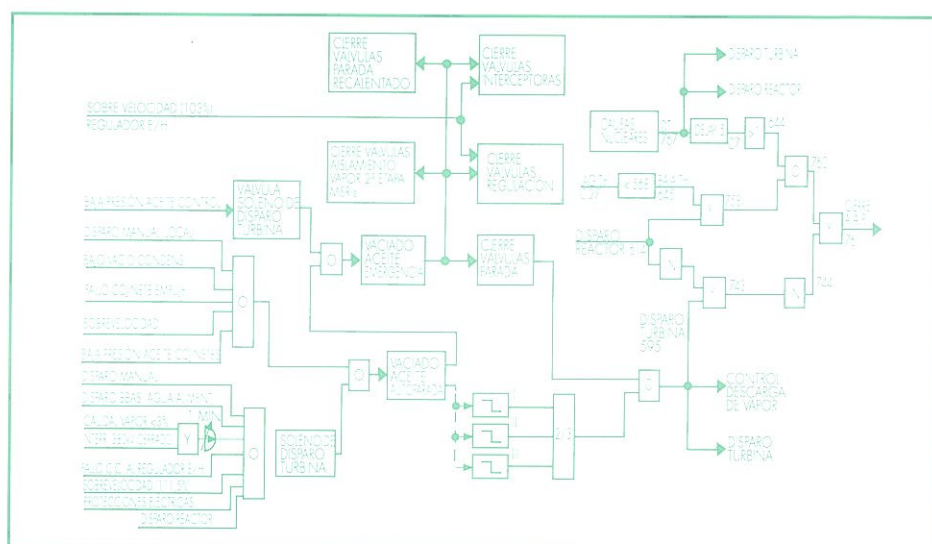
También calcula el grado de mezcla turbulenta entre canales adyacentes y el flujo calorífico crítico no uniforme mediante la expresión W-3 [11] conjuntamente con la correspondiente al factor F , cuyo límite inferior nos permite conocer la posición axial donde se inicia la ebullición nucleada.

Modelo Geométrico

Debido a la simetría que presenta este núcleo, se puede sustituir su representación total por representaciones fraccionadas del mismo. Su simetría de 1/8 nos permite modelar un solo segmento de 1/8 del núcleo, que será 1/8 del elemento de combustible más caliente. Su representación ha supuesto el desarrollo de un modelo de 19 canales (Figura II) que consta de 4 canales agrupados y de 15 subcanales, utilizando sus correspondientes datos hidráulicos [12].

Modelo Térmico

Este modelo consta básicamente de



F III - Disparo de Turbina

una distribución del caudal de entrada al núcleo, de distribución de potencia radial y axial y de unas adecuadas condiciones de operación del reactor.

Los parámetros de diseño termohidráulico constituyen la base del modelo, de forma que la distribución de potencia radial se basa en el valor de diseño del factor de canal caliente $F_{\Delta H}^N$ y la distribución de potencia axial en la forma de flujo axial de referencia.

Validación del Modelo

Se han realizado varios análisis del LEN, en condiciones de estado estacionario, utilizando el método y los modelos descritos anteriormente. Estos análisis son representativos de los que forman parte del FSAR [3] y del resto de los documentos de licenciamiento de esta planta y se han efectuado con objeto de verificar la precisión de los cálculos de los anteriormente citados modelos hidráulico y térmico. La validación se ha conseguido como consecuencia de la comparación efectuada entre los valores del CLEN obtenidos de los modelos referidos y los valores que constan en dichos documentos de licenciamiento.

DISEÑO DE SSPC PARA TRANSITORIOS DE DT

En esta planta, el DT implica un disparo automático del Reactor, según los criterios de diseño actuales [8,12]. Como consecuencia de lo anterior, se genera un disparo del sistema de AAP por la actuación de una orden de aislamiento que cierra las válvulas de agua de alimentación a los GGVV. Después de activarse la señal de disparo, cierran las válvulas de la Turbina y se inicia el proceso de bajada de las barras de parada y de control. Mientras está sucediendo todo el proceso anterior, continúa la transferencia de calor desde el núcleo a su refrigerante y desde

éste al sistema del secundario, por lo que se produce inicialmente un sensible incremento de la presión del vapor y de la T_m del refrigerante. El efecto anterior se corrige con la apertura de las válvulas de By-pass de vapor a la Turbina.

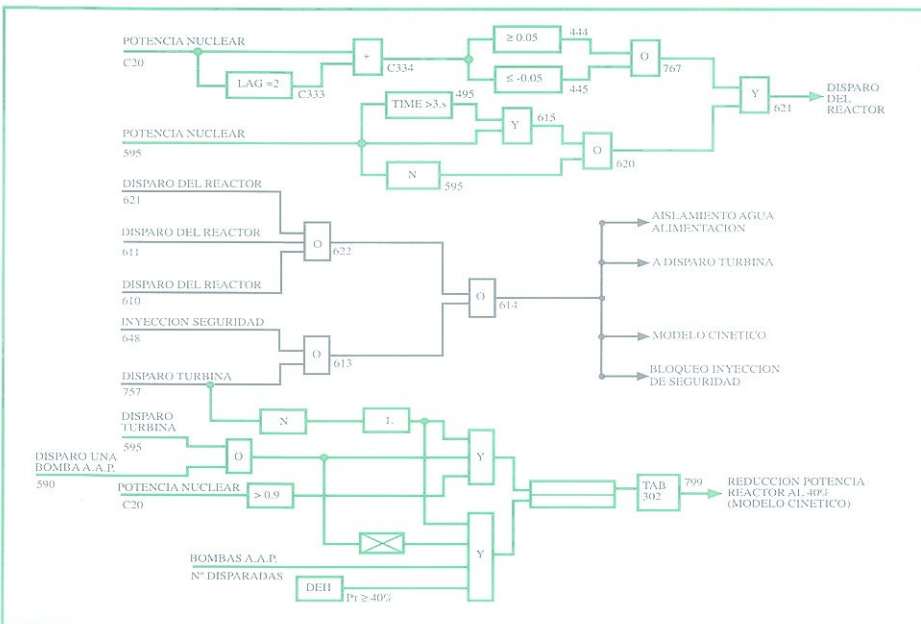
Con objeto de evitar el DR ante la ocurrencia de un DT, reduciendo rápidamente la P_R hasta un nivel aproximado del 40% (coincidente con la capacidad del sistema de By-pass de vapor), se han desarrollado unas estrategias de control que suponen un nuevo diseño de los SSPC [12] que, de manera muy resumida, se exponen a continuación.

Disparo de Turbina

El nuevo diseño está resumido y representado en la Figura III, donde se observa que el sistema automático de parada y de disparo de emergencia de la Turbina actúa cuando se activa cualquiera de las causas que tienen su origen en perturbaciones de sus componentes mecánicos o eléctricos, a través de las correspondientes matrices de disparo. El DT así definido y representado por la señal N°595 produce el disparo del Turbo-Alternador, sin provocar el disparo directo del Reactor. Esta señal desencadenará un proceso de reducción de potencia que se tratará más adelante.

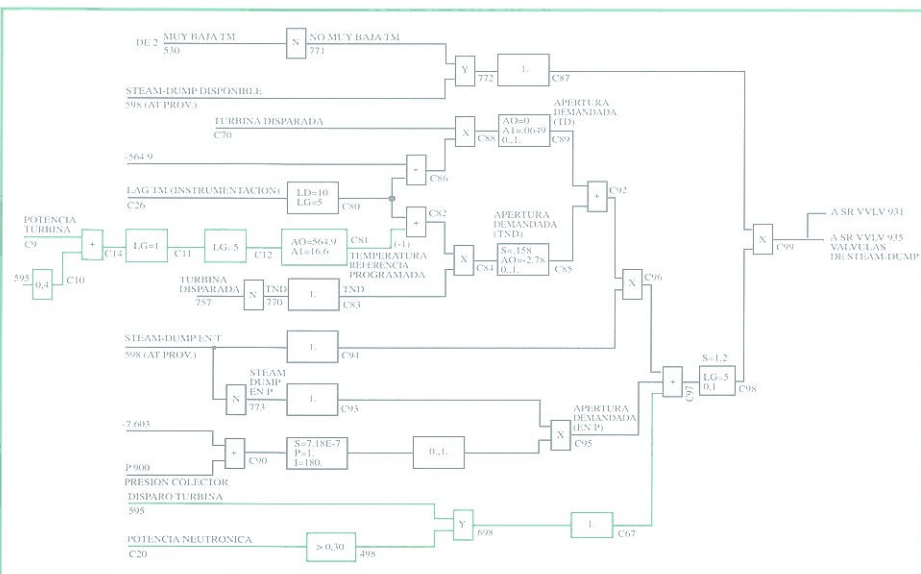
Existen otras causas de DT que configuran un lazo de control diferente al descrito y que permanece activo simultáneamente con el mismo, según consta en la Figura III. Este lazo genera la señal de disparo N°757 que motiva el DT, el DR y el aislamiento del AAP debido a la actuación del bloque denominado "causas nucleares", o lo que es lo mismo, la activación de cualquiera de las siguientes señales:

- Inyección de Seguridad
- Muy alto nivel en al menos un generador de vapor.
- Disparo de Reactor



F IV - Inserción de Reactividad

F V - Control By-pass Vapor



Inserción de Reactividad

La Figura IV incluye dos importantes modificaciones de diseño que se han introducido en el sistema de Protección del Reactor. La primera de ellas se refiere al lazo de control que ejecuta la inserción de la reactividad necesaria para conducir la PR al nivel del 40%. Esta operación se efectúa mediante un componente de control definido a través de la expresión:

$$Y_R = S * \text{Función}(V_1)$$

donde V_1 es la variable “tiempo” en función de la cual se introducen los valores de reactividad necesarios para reducir la potencia nuclear al 40%.

La segunda modificación de diseño se refiere al lazo de control, de la misma

Figura, que inhibe el DR por “alta variación del flujo neutrónico” durante el tiempo de inserción en el núcleo de la citada reactividad. La variación del flujo neutrónico se determina mediante una unidad derivativa (1-Lag) definida por la función de transferencia

$$\mathcal{L}(\text{C334})/\mathcal{L}(\text{C20}) = \tau_1 s / (1 + \tau_1 s)$$

y se compara con el límite establecido de $\pm 5\%$ mediante un componente de control que, según los bloques del código RELAP5/MOD2, se expresa mediante la expresión

$$T_{RJ} = V_2 OP_1 (\pm 0,05)$$

Esta operación se realiza de manera continua con objeto de comprobar si la resultante de la misma experi-

menta variación con el paso del tiempo. Ahora bien, dado que se pretende una reducción rápida de la P_R , ante la activación de la señal N°595 de DT, es necesario inhibir durante un tiempo la señal N°621 de DR hasta que haya finalizado la inserción de reactividad suficiente en el núcleo para conducir al Reactor al nivel de potencia del 40%. Este efecto se consigue mediante un componente de control que está definido por la expresión

$$T_{RK} = V_3 OP_2(t_1)$$

Rebasado dicho periodo, la señal de DR continúa cumpliendo sus funciones de protección del Reactor sin ningún otro tipo de enclavamiento.

Los parámetros de este sistema de control están reflejados en la Tabla V.

Sistema de Control de T_m

En el diseño original de este sistema de control, el valor de referencia de la T_m es una función lineal de la P_T , la cual a su vez es directamente proporcional a la presión de vapor medida en la cámara de impulsos de la turbina de alta presión. Pues bien, al producirse el DT se cierran las válvulas de admisión de vapor y se anula la presión en la cámara de impulsos, por lo que el propio lazo de control conduciría el valor de la T_m al de parada caliente o de potencia cero.

Se ha introducido una modificación en el diseño de este sistema que consiste en convertir el valor de referencia de la T_m en un valor constante del 40%, mientras se encuentre activada la señal de DT N°595, la cual se detalla en el apartado siguiente.

Sistema de Control del By-pass de Vapor

Se han realizado dos modificaciones de diseño en el sistema de control original, las cuales de forma resumida se reflejan en la Figura V, con objeto de evacuar al condensador el flujo de vapor y carga térmica necesaria para que, con la

Tabla V
Parámetros control Inserción Reactividad

NOMBRE	VALOR	DENOMINACIÓN
Y_R	Nº799	Inserción Reactividad
S	1	Factor de Escala
V_1	Tiempo	Reactividad función del tiempo
$\mathcal{L}$	F(s)	Transformada Laplace de f(t)
s	a + bi	Variable compleja de $\mathcal{L}$
τ_1	2 s	Constante tiempo-Retardo
T_{RJ}	Nº444,445	Límite variación flujo neutrónico
V_2	C334	Variación flujo neutrónico
OP_1	$\geq$	Operador comparador variables
T_{RK}	Nº495	Temporización DT
V_3	Nº595	Disparo Turbina
OP_2	$>$	Operador comparador variables
t_1	3 s	Consigna bloqueo V_3

Tabla VI
Parámetros control del By-pass de Vapor

NOMBRE	VALOR	DENOMINACIÓN
Y_{B1}	C10	Consigna Potencia Turbina
S_1	0,4	Factor de Escala
U_1	1,0	$T_B = 1,0$
T_B	Nº595	Señal activadora disparo
Y_{B2}	C14	Potencia corregida Turbina
S_2, S_3	1	Factor de Escala
A_1, A_2	1	Constantes bloque sumador
V_1	C9	Potencia Turbina
V_2	C10	Salida unidad disparo
U_2	1,0	$Y_{B3} = 1,0$
Y_{B3}	Nº698	DT si la potencia Reactor > 30%

Tabla VII
Datos protección bombas AAP

VARIABLE	RANGO	POTENCIA NOMINAL
Presión(P)	0-10V. para 0-5,88*10 ⁶ Pa	2,744*10 ⁶ Pa (1,9 V)
Caudal(Q)	0-10V. para 630,8-1268 Kg/s	722,22 Kg/s (1,9 V)
Temper.(T)	0-10V. para 411,15-461,15 °K	471,15 °K (1,9 V)

Turbina disparada, el Reactor pueda disminuir su potencia hasta el 40%.

En primer lugar, se sustituye la señal de consigna de T_m por otra señal de valor constante mediante la acción de un bloque de control que define a la unidad de disparo

$$Y_{B1} = S_1 * U_1 (\pm T_B)$$

y a la unidad de adición-sustracción

$$Y_{B2} = S_2 * (A_1 V_1 + A_2 V_2)$$

De esta forma se consigue que el lazo de control actúe como si la Turbina no estuviera disparada, regulando el caudal de vapor para mantener la P_R al 40%.

En segundo lugar, se ha introducido un lazo de control complementario para mantener las válvulas de alivio de vapor totalmente abiertas mientras que la T_m del refrigerante tenga un valor superior al de la T_m de referencia, con objeto de acelerar el proceso de enfriamiento y evitar un posible descenso de la potencia del Reactor, que rebasaría el nivel de potencia deseado, por efecto del coeficiente de temperatura del moderador y del coeficiente Doppler. Este lazo de control ejecuta varias sentencias lógicas y también la unidad de disparo definida por

$$C67 = S_3 * U_2 (Y_{B3})$$

Los parámetros correspondientes a las modificaciones de diseño que ha experimentado este sistema de control se reflejan en la Tabla VI.

Tabla VIII
Parámetros control Turbina

NOMBRE	VALOR	DENOMINACIÓN
Y_T	C295	Error demanda potencia Turbina
S_4	1	Factor de Escala
A_0	0	Constante comparador
A_3	1	Constante comparador
A_4	-1	Constante comparador
V_3	C294+C078	Demanda potencia
V_4	C9	Potencia Turbina
K_P	1,1%valv/	(%demanda) Banda proporcional
τ_P	2 s	Constante tiempo integral

Tabla IX
Parámetros control AAP

NOMBRE	VALOR	DENOMINACIÓN
Y_{AA}	C779,789,799	Demanda limitada AAP
$S_{\%}$	1	Factor de Escala
FUNCTN	= MIN	Valor mínimo entre V5 y V6
V_5	C778,788,798	Demanda AAP
V_6	C800	Demanda corregida
C_{800}	295,6	Demanda de 1 bomba AAP
	591,4	Demanda de 2 bombas AAP

DISEÑO DE SSPC PARA TRANSITORIOS DE DAAP

El sistema de AAP de esta planta [12] consta de dos bombas centrífugas horizontales, de una sola etapa, de doble aspiración y accionadas por turbinas de vapor. Cada una de ellas tiene capacidad para suministrar el 85% del caudal máximo total, por lo que es necesario que ambas bombas estén en operación cuando la unidad se encuentra a la potencia nominal.

Las bombas de extracción de condensado y las bombas de drenaje de los calentadores, ante la carencia de un tanque de agua de alimentación, proporcionan la presión positiva neta de aspiración para evitar la cavitación de las bombas de AAP a una determinada temperatura del fluido. Estas bombas están dotadas de una protección (disparo automático) por baja presión a la aspiración cuyo objeto es evitar posibles daños en sus impulsores por efecto de la cavitación. Esta protección la ejecuta un lazo de control cuya tarjeta electrónica de salida actúa según la ecuación

$$S(V) = P - 0,08Q - 0,14T - 1,26$$

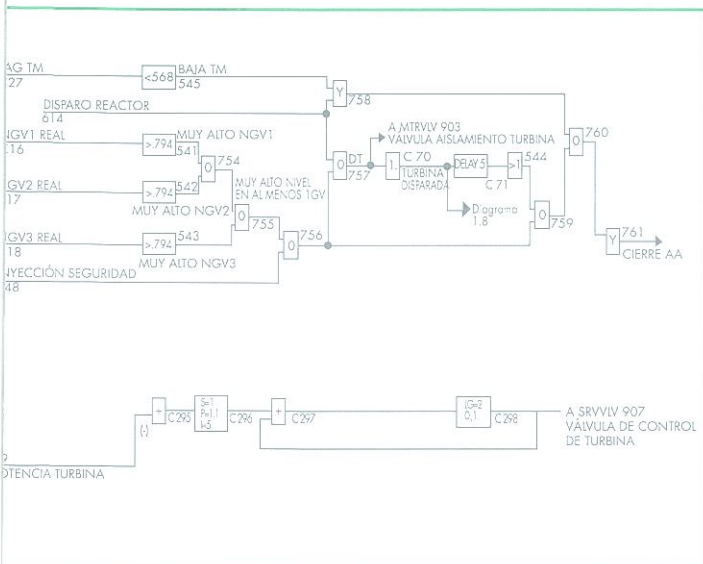
cuyas variables están representadas en la Tabla VII.

Existe una situación operativa de la planta que culmina con la activación de una señal de "runback" como consecuencia del disparo de una de las turbobombas de AAP¹². En este caso, se reduce automáticamente la carga de la Turbina hasta alcanzar el valor de referencia del 70% de la potencia nominal.

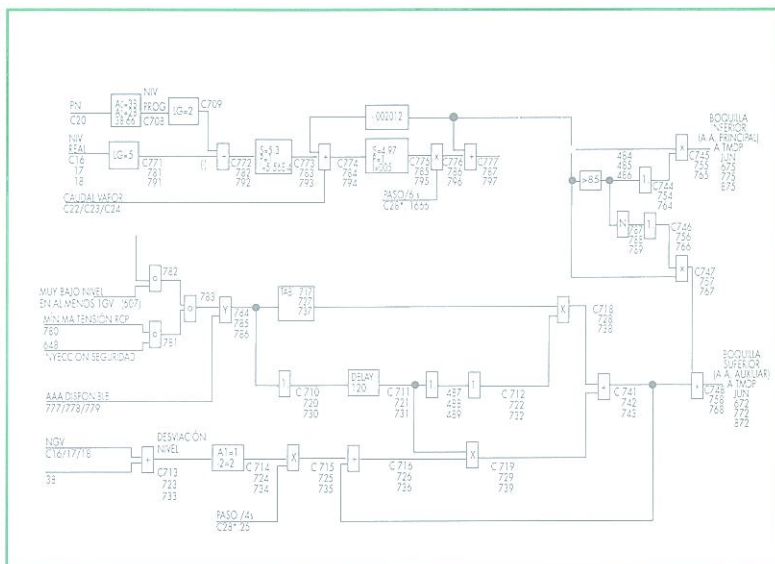
El modo de control bajo el que opera la planta es el de "Reactor sigue a Turbina".

Tras el disparo de una de las turbobombas se cuenta con unos márgenes equivalentes de presión en la aspiración de la segunda bomba de 4,508*10⁵ Pa hasta que abre la válvula de by-pass de los calentadores y de 6,468*10⁵ Pa hasta que se produce su propio disparo. Estos márgenes, en principio, son suficientes para permitir la operación estable de la segunda bomba de AAP, aunque si se presenta alguna malfunción adicional en el proceso (disparo de alguna bomba de condensado, de alguna bomba de drenajes de calentadores, transitorio de nivel de GGVV, etc.), hecho frecuente durante los transitorios de rechazo de carga, se provocaría el disparo automático de esta segunda bomba.

Una de las posibles soluciones para evitar el DR como consecuencia del disparo de una de las turbobombas de AAP, cuando actúa la señal de runback del 70%, se basa en el diseño de un lazo de control coordinado [13] que genera una señal automática y coordinada de reducción de carga, simultáneamente en la Turbina y en el Reactor, hasta el nivel del 40%. Esta señal sustituye a la actual señal de runback y permite sin exigencias tan severas que la bomba que permanece en operación pueda responder a la demanda del proceso, venciendo sus propias restricciones. Se han desarrollado unas estrategias de control que suponen un nuevo diseño de los SSPC [12] que, de manera muy resumida, se exponen a continuación.



F VI - Control de Turbina



F VII - Control de Agua Alimentación Principal

Disparo de AAP

El nuevo diseño se encarga de definir tanto el disparo individual como el total de las turbobombas de AAP, así como de anular la antigua de señal de runback activando, en su lugar, el lazo de control coordinado que inicia el proceso de reducción de la P_R y de la P_T .

Inserción de Reactividad

En la Figura IV se observa la modificación de diseño que se ha introducido para reducir la P_R al 40%, mediante los valores de reactividad adecuados. Esta tabla se desactiva cuando ambas bombas de AAP se encuentran en servicio.

Sistema de Control de Turbina

La modificación de diseño que se ha realizado en este sistema de control (representada en la Figura VI) consiste en limitar la señal de referencia de demanda de carga de la Turbina al nivel del 40%, en paralelo con la ya citada reducción de P_R , cuando se activa la señal N°590 de disparo de una de las turbobombas.

El lazo calcula la señal de error de la demanda mediante un bloque que está definido por la expresión

$$Y_T = S_4 * (A_0 + A_3V_3 + A_4V_4)$$

y dicha señal de error se procesa en un controlador de doble banda de control (P+I), definido por la función de transferencia

$$\mathcal{E}(C296)/\mathcal{E}(295) = K_P (1 + 1/\tau_{ps})$$

cuya señal de salida constituye la demanda de carga corregida de la Turbina. Los parámetros de este sistema de control están reflejados en la Tabla VIII.

Sistema de Control de AAP

Entre las modificaciones que se han in-

roducido en el sistema original, cabe destacar un nuevo lazo de control cuya función es limitar la señal de demanda de AAP en el caso de producirse este transitorio. El objeto es favorecer la acción coordinada de reducción tanto de la P_R como de la P_T , en aras de la estabilidad del sistema. La citada limitación se consigue mediante varios bloques de control representados en la Figura VII, siendo el más representativo el que está definido por la expresión

$$Y_{AA} = S_5 * FNCTN(V_5, V_6)$$

estando sus parámetros reflejados en la Tabla IX.

VERIFICACIÓN DISEÑOS DE SSPC PARA TRANSITORIOS DE DT

Para demostrar que la planta permanece en situación estable y segura, en el nivel de potencia del 40%, después de ocurrir un DT sin DR, operando con los criterios derivados de los nuevos diseños de los SSPC, se han utilizado los correspondientes modelos termohidráulicos y neutrónicos de la planta y del núcleo.

La Estación de Trabajo se ha configurado con el software necesario para poder albergar y operar ambos modelos, incluyendo los códigos RELAP5/MOD2 y COBRA IIIC/MIT.

El resumen de los resultados [12] es el que se refleja en la representación gráfica de algunas de las variables seleccionadas de la planta, el cual se desglosa a continuación.

RELAP5/MOD2 Potencia del Reactor

En la Figura VIII se observa el rápido descenso de la P_R tras el DT, seguido de una brusca recuperación de la misma debido al efecto del coeficiente de

reactividad de la T_m del moderador y al Efecto Doppler. El sistema de Protección del Reactor, conjuntamente con los sistemas de control de T_m y del By-pass de Vapor, se encargan de reducir la P_R al 40% y de mantenerla estable en este nivel.

Temperatura Media Primario

Según se observa en la Figura IX, la temperatura de referencia (T_{ref}), una vez iniciado el transitorio, sigue mediante un determinado programa a la P_T hasta alcanzar el valor de 571,49°K, correspondiente al 40% de potencia.

La T_m sigue los movimientos de la P_R , aunque de manera brusca, debido a la compensación dinámica que ejerce una unidad de anticipación-retardo (Lead-Lag) del lazo de control, la cual se define por la función de transferencia

$$\mathcal{E}(S)/\mathcal{E}(E) = (1 + \tau_1)/(1 + \tau_2);$$

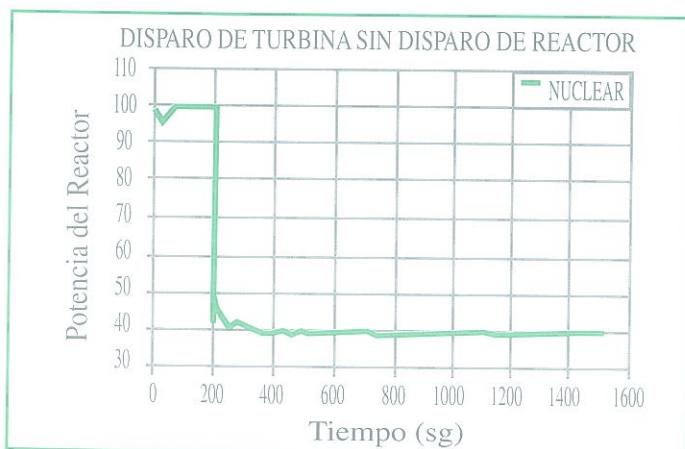
siendo $\tau_1 = 50s$ y $\tau_2 = 10s$

La T_m se estabiliza en un valor muy próximo al de la T_{ref} con una desviación aproximada de 0,41°K, la cual está dentro de la banda muerta (off-set) del lazo de control.

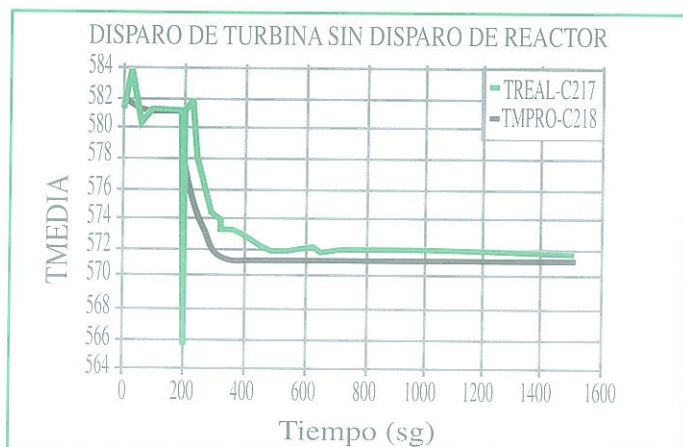
Actuación del By-pass de Vapor

La Figura X contiene dos curvas diferentes. La curva C98 representa la señal de demanda de posición de las válvulas de descarga (By-pass) de vapor al condensador, la cual adquiere el valor del 100% (totalmente abiertas) después de iniciarse el transitorio debido a la acción de la ya citada señal de enclavamiento C67.

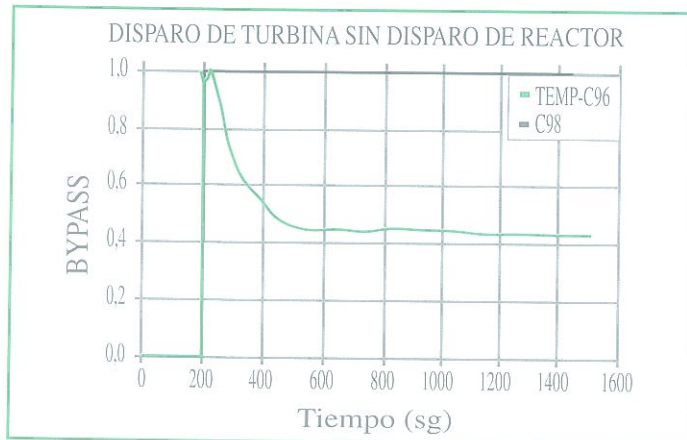
La curva C96 representa la señal de demanda en función del error ($T_m - T_{ref}$), la cual experimenta un crecimiento brusco inicial porque la T_{ref} adquiere rápidamente el valor correspondiente al 40% de la P_T . Esta señal disminuye a medida que el citado error se hace más



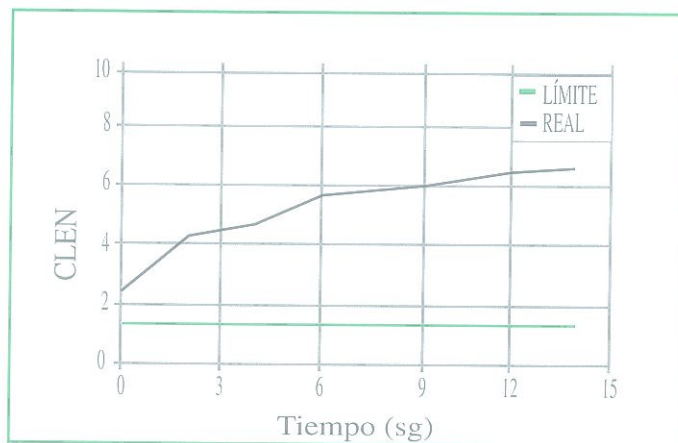
F VIII - Potencia del Reactor



F IX - Temperatura media Primario



F X - Demanda apertura By-pass



F XI - Evolución CLEN

pequeño, aunque no ejerce influencia en la posición de las válvulas hasta que la $T_m < T_{ref}$.

COBRA IIIC/MIT

El análisis del núcleo con el código COBRA IIIC/MIT siguiendo el método de "paso único" ha arrojado, para el parámetro límite de diseño termohidráulico, los resultados que se representan en la Figura XI. Se observa que el valor del CLEN, desde el principio del transitorio, se mantiene siempre mayor de 1,3 habiéndose calculado el flujo calorífico crítico mediante la correlación W-3.

Los resultados obtenidos en el análisis de la planta y en el análisis del núcleo demuestran la idoneidad de los diseños de SSPC para transitorios de DT sin DR.

VERIFICACIÓN DISEÑOS DE SSPC PARA TRANSITORIOS DE DAAP

Para este transitorio, el resumen de los resultados [12] es el que se refleja en la representación gráfica de algunas de las variables seleccionadas de la planta, el cual se desglosa a continuación.

RELAP5/MOD2 Potencia del Reactor

La Figura XII representa la evolución de la P_R tras un DAAP con la señal de runback anulada. La principal diferencia con respecto al transitorio de un DT es que, en este caso, el descenso de la P_R se produce de forma más atenuada, ya que las válvulas de la Turbina no han llegado a cerrar completamente tal como sucede en un DT.

Temperatura Media Primario

Según se observa en la Figura XIII, el comportamiento de esta variable coincide en ambos transitorios aunque, en este caso, los valores de pico de la T_m son inferiores a los correspondientes en el DT y el proceso de estabilización de la T_m es más lento que el del DT, debido al cierre parcial de las válvulas de la Turbina.

Actuación del By-pass de Vapor

La figura XIV nos muestra, al no existir en este caso la señal de enclavamiento C67 de las válvulas de descarga, la coincidencia de las curvas C96 (demanda en función del error $T_m - T_{ref}$) y C98 retardada por el efecto del filtro de

primer orden definido por la función de transferencia

$$\mathcal{E}(S)/\mathcal{E}(E) = 1/(1+t_1s); \text{ siendo } t_1 = 5s$$

Se observa el crecimiento brusco de ambas señales de demanda al decrecer el valor de la T_{ref} desde el comienzo del transitorio y también el cierre total de las válvulas de descarga a partir de que la $(T_m - T_{ref}) < 2,78^\circ K$.

COBRA IIIC/MIT

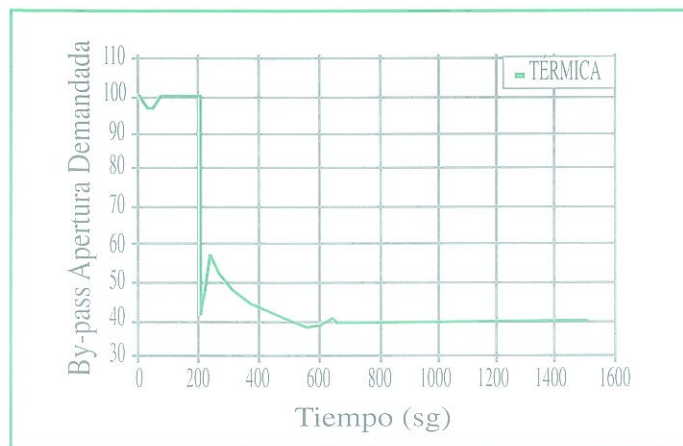
En la Figura XV se representa la evolución del CLEN en las mismas condiciones del transitorio anterior y se observa que siempre se mantiene por encima del valor límite de 1,3.

Los resultados obtenidos en el análisis de la planta y en el análisis del núcleo demuestran la idoneidad de los diseños de SSPC para transitorios de DAAP con la señal de runback anulada y sin DR.

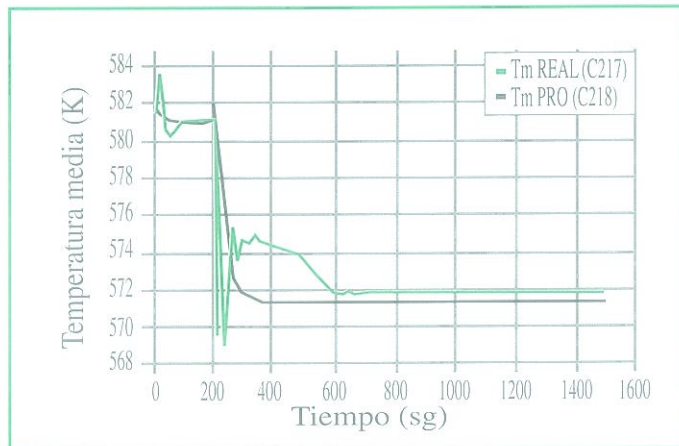
CONCLUSIONES

Varias conclusiones se obtienen del análisis de los dos transitorios, denominados DT y DAAP, las cuales resumimos a continuación:

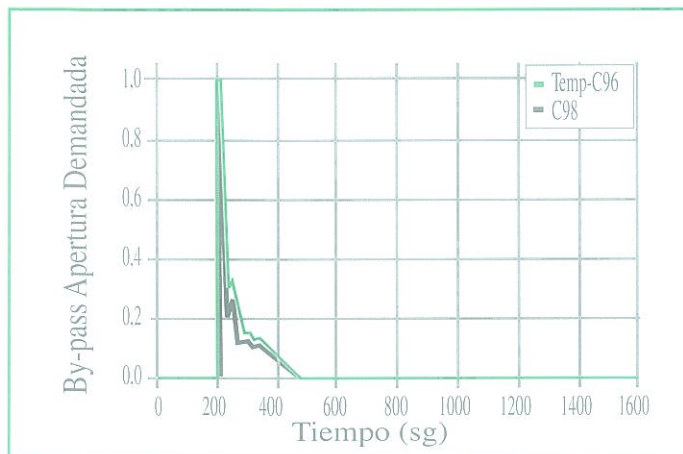
- Los nuevos diseños de SSPC evitan el DR ante la ocurrencia de estos



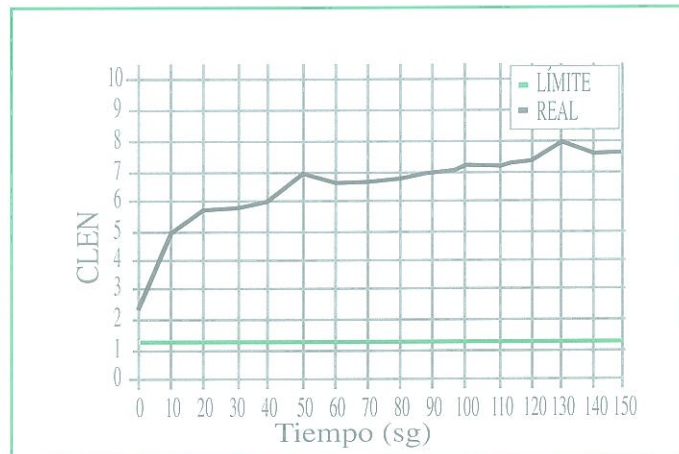
F XII - Potencia del Reactor



F XIII - Temperatura media Primario



F XIV - Demanda apertura By-pass



F XV - Evolución CLEN

transitorios y consiguen que la planta retorne a una situación estable y segura en un corto período de tiempo, sin que se rebase el límite de diseño termohidráulico durante todo el proceso.

- Los nuevos sistemas de control consiguen una mayor disponibilidad de la planta al evitar el DR en las condiciones antes referidas. Al disminuir el número de disparos se reducirán los efectos de las tensiones térmicas derivadas de los mismos, entre otras razones, por una menor aportación de agua de alimentación auxiliar a temperatura ambiente, colaborando de esta forma en el alargamiento de vida de la planta.

- Los modelos termohidráulicos y neu-trónicos de la planta y del núcleo nos han demostrado gran capacidad para generar información sobre el comportamiento de la planta durante transitorios operacionales.

ABREVIATURAS

CA	Corriente Alterna
DT	Disparo del Turbo-Alternador
AAP	Agua de Alimentación Principal
DAAP	Disparo del AAP
DR	Disparo del Reactor
SSPC	Sistemas de Protección y Control

GGVV Generadores de Vapor

T_m	Temperatura media del refrigerante
P_R	Potencia del Reactor
P_T	Potencia de Turbina

REFERENCIAS

- 1.BALLERINI,F. "Setpoint Study Ascó Units I and II", Westinghouse Electric Corporation (March 1976).
- 2.BOWRING,R.W. and MORENO,P. "COBRA IIIC/MIT Computer Code Manual", Nucl.Eng.Dept. ,MIT,March 1976.
- 3.Final Safety Analysis Report Ascó I (June 1983), Final Safety Analysis Report Ascó II (Sep. 1985), and later revisions, Asociación Nuclear Ascó.
- 4.GARCÍA GÓMEZ,A. "C.N.Ascó 1 y 2. Disparos de Reactor. Estado acciones correctoras". Revisión 2, Agosto 1994.
- 5.MEZEN,P. "Precautions, Limitations and Setpoints", E-PS-76-068. July, 1993.
- 6.MORENO,P. TODREAS,N. CHIU,C. "Methods for Steady State Thermal/Hydraulic Analysis of Pressurized Water Reactor Cores", Energy Laboratory Report N° MIT-EL 76-006, March 1977.

7.REVENTOS,F y otros "Modelo Termohidráulico de la C.N. Ascó". Asociación Nuclear Ascó (Junio 1987).

8.REVENTOS,F MORENO,P. y otros "Transient Analysis in Ascó Nuclear Power Plant using RELAP5/MOD2". Nuclear Technology. Volume 90. Number 3, PP294-307. June 1990.

9.REVENTOS,F MORENO,P. y otros "Modelo Termohidráulico y de Protección y Control de C.N. Ascó", Asociación Nuclear Ascó (May 1988).

10.SLITZ,F.W, BASEHORE,K.L "VEPCO Reactor Thermal-Hydraulic Analysis using COBRA IIIC/MIT Computer Code", Power Station Engineering Department-VEPCO, October 1983.

11.TONG,L.S. "Boiling Crisis and Critical Heat Flux", TID-25887, U.S. Atomic Energy Commission (1972).

12.TRUJILLO,R "Diseño y Verificación de Sistemas de Protección y Control para transitorios en Centrales Nucleares tipo-PWR- diseño Westinghouse", Tesis Doctoral, 1996.

13.TRUJILLO,R "Sistemas de Control.Intercomunicaciones", Revista de Ingeniería Energética, Año IX, N°3, Mayo-Junio 1983.

14.WEGGENER,J.P. "Friction Factors for Pressure Drop Calculations", Nucleonics, Vol.19, p.145 (196)