

MODELO DE SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE
LA C.N.A.

H. GVIRTZMAN - J. CASTAÑO

INTRODUCCION.

Se presenta un modelo de computación digital de simulación para el reactor PHWR de la Central de Atucha I, su sistema primario de transporte de calor, sistema del moderador y los sistemas asociados de regulación y control.

El modelo trata los distintos componentes en forma concentrada, y permite el estudio del comportamiento dinámico de la planta frente a perturbaciones respecto al estado de régimen de plena potencia.

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EL MODELO UTILIZADO.

La fig. 1 muestra el circuito simplificado de la planta.

Los sistemas primario (D_2O) y secundario (H_2O) son independientes y están acoplados térmicamente entre sí.

La presión de ambos sistemas es regulada por el presurizador, el que podrá operar también como regulador de volumen en las oscilaciones de presión y temperatura alrededor del punto de operación.

El calor generado en el moderador se extrae en los intercambiadores de calor de su circuito, que son utilizados además como precalentadores del agua de alimentación a los generadores de vapor.

El control de la potencia del reactor se efectúa mediante un sistema de 29 barras de control (distribuidas en bancos de 3 barras cada uno) que en el modelo se han representado por una barra equivalente.

El sistema de control de la potencia del reactor provee la señal de accionamiento del mecanismo de barras, en respuesta a la diferencia entre las señales de referencia de potencia y la potencia medida.

El modelo incluye el control de la válvula de admisión de caudal de vapor a la turbina, el de la válvula de by-pass o descarga al condensador y el de la válvula de alivio de presión del secundario.

Se ha previsto la posibilidad de estudiar el comportamiento en los dos modos posibles de operación:
 Modo normal: el reactor responde a las variaciones de carga y la turbina sigue al reactor (fig 3)
 Modo alternativo: la turbina responde a la carga y el reactor acompaña a la turbina (fig 4).

El programa permite analizar la respuesta en el tiempo a distintas excitaciones como ser: perturbaciones de reactividad, variaciones en la demanda de potencia y variaciones en los valores de referencia de los sistemas de control de potencia del reactor y de la turbina. Se prevén excitaciones tipo escalón y rampa con niveles y pendientes ajustables desde los datos de entrada.

El modelo está en su mayor parte linealizado respecto al cálculo de las funciones de estado termodinámicas. Se prevee la posibilidad de incluir posteriormente el cálculo punto a punto de dichas funciones, así como el sistema de regulación de temperatura del moderador con el control asociado del sistema de agua de alimentación al generador de vapor.

ECUACIONES BASICAS DEL MODELO.

Se plantean las ecuaciones unidimensionales de conservación de masa, momentum y energía. En un volumen de control, en forma diferencial resulta:

Balance de masa:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{p} A) + \frac{\partial}{\partial z} (GA) = 0 \quad (1)$$

Balance de momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t} (GA) + \frac{\partial}{\partial z} (r' G^2 A) = -A \frac{\partial p}{\partial z} - \int \tau_{dl} - f_g A \quad (2)$$

Balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{p} h A) + \frac{\partial}{\partial z} (G h' A) = (\psi + r q) \cdot \frac{A}{L_1}$$

siendo:

- $\bar{\rho}$ = densidad media en el volumen de control.
- A = sección transversal de pasaje del refrigerante.
- G = caudal másico específico.
- v' = volumen específico efectivo para consideraciones de momentum.
- $\bar{h}$ = entalpía media pesada sobre el volumen de control.
- h' = entalpía asociada al flujo másico instantáneo.
- rq = velocidad de generación de calor interno en el fluido por unidad de superficie de transferencia térmica.
- ψ = flujo térmico para un canal unidimensional.
- l_1 = relación entre el área transversal de pasaje del refrigerante y el perímetro calentado.
- z = componente en la dirección negativa de z , de la fuerza de fricción por unidad de perímetro y por unidad de long. axial.

Los retardos en las temperaturas debido al tiempo de tránsito en las tuberías se aproximan mediante constantes de tiempo simple o retardos de primer orden.

DESCRIPCION DEL MODELO.

El modelo se escribió en Fortram IV. Consta de las siguientes rutinas:

- Simac : rutina principal, lee las constantes y las escribe como control.
- Derv : contiene el conjunto de ecuaciones diferenciales del reactor; circuito primario, generador de vapor, circuito del moderador e intercambiador de calor del moderador.
- Presur : contiene las ecuaciones diferenciales del presurizador y su regulación asociada.
- Regvor : contiene las ecuaciones de los sistemas de control en el modo normal de operación.
- Regkas : ídem para el modo alternativo.
- Premax : ecuaciones de regulación de la válvula de bypass al condensador.
- Premin : ecuaciones para la regulación de presión mínima.
- Steady : permite obtener la solución inicial (valores de temperaturas) del sistema de ecuaciones en estado estacionario en las condiciones de plena potencia (4).
- Integr : realiza, en el análisis transitorio, la integración simultánea de las ecuaciones termohidráulicas y de control del proceso, utilizando el método de Runge Kutta de 4° orden.

El proceso de cálculo se puede observar en la fig. 2.

El cálculo de temperaturas tiene en cuenta los tiempos de tránsito del refrigerante o moderador en los distintos volúmenes de control en que se subdividió el sistema.

La temperatura de salida del reactor se obtendrá del balance de energía en el plenum superior, que considera: el caudal de by-pass que no ingresa al núcleo, el efecto del mezclado refrigerante - moderador a través del orificio de igualación de presiones y el caudal de los canales de refrigeración.

El intercambiador de calor del moderador fué dividido, para su análisis en 2 zonas, lo que permite un cálculo más preciso de la evolución de temperaturas. Se trabaja, en el transitorio, con retardos de primer orden, si los tiempos de tránsito son suficientemente pequeños comparados con la constante de tiempo $\tau = \frac{M \cdot C_p}{K \cdot A}$

La temperatura de entrada del secundario al intercambiador de calor del moderador (T_{spe}) es mantenida a un valor constante en el tanque de alimentación, siendo dato de entrada.

La presión de vapor (antes de alcanzar la válvula de regulación de turbina) se obtiene linealizando, alrededor del valor de presión nominal de operación = 44 ata la curva de presión de saturación en función de la temperatura de vapor.

La presión de operación del sistema primario es mantenida por el presurizador, que se comportará además como regulador de volumen, en las oscilaciones alrededor de la potencia nominal.

La secuencia de cálculo de evolución de presión se puede observar en la figura 2.

El caudal de la línea de conexión primario - presurizador, se calcula linealizando la expresión de la variación de masa en los circuitos primario y moderador, definida por variaciones de densidad en función de presión y temperatura.

En el balance de masas de la zona líquida

del presurizador, se tienen en cuenta, además del caudal que entra o sale por la línea de conexión, el caudal de rociado (con el consecuente caudal de condensación) y el caudal de evaporación.

A partir del balance de energía sobre la masa líquida se define la entalpía del agua en dicha zona.

Intervienen en el balance de energía en la zona líquida: la energía aportada (o extraída) por el caudal de la línea de conexión, las aportadas por el caudal de spray y la fracción condensada de vapor, la extraída por vaporización y la suministrada por los calefactores de control de presión.

Se calculan: el volumen que ocupa el agua con la energía interna hallada y el volumen de vapor, a través del correspondiente balance. Se define entonces la presión de la masa de vapor, suponiendo una evolución adiabática del vapor.

Teniendo en cuenta la pérdida de presión en la línea de conexión, y en el tramo de rama caliente entre la tobera de salida del tanque y la línea de conexión, se calculará la presión a la salida del núcleo (p_{1c}).

El control de presión en el presurizador se efectúa por medio de un sistema de calefactores y un sistema de rociado.

El rociado toma refrigerante de la rama fría del primario y lo inyecta a presión en la zona de vapor del presurizador, mediante un sistema de 4 válvulas que se conectan en forma escalonada en función de la diferencia de presiones, cuando la presión en el presurizador supera a la de referencia (115 ata).

El sistema de calefactores actúa cuando la presión es inferior al valor de referencia, y consta de 3 calefactores que se conectan también en forma escalonada en función de la diferencia de presiones.

El sistema de control de presión consta además de 2 válvulas de alivio que se abren cuando la presión en el presurizador alcanza los valores límites de 126 ata y 133 ata, respectivamente.

El modelo contiene la simulación de los sistemas de control de la planta para los modos norma y alternativo de operación.

La subrutina REGVOR agrupa las ecuaciones de control de potencia del reactor para modo normal, que contiene: un regulador tipo P-D, que determina la señal de accionamiento del mecanismo de movimiento de barras de control, el cual se aproxima mediante un retardo de primer orden y proporciona la velocidad de variación de la reactividad.

Un regulador tipo P-I controla la posición de la válvula de admisión de vapor a la turbina, en función de la diferencia entre la presión de vapor del secundario y la presión de referencia. (fig. 4).

Posee además un control por limitación de temperatura de refrigerante, que toma el control del reactor cuando la temperatura media de refrigerante supera a la correspondiente al 100% de potencia. Esta posibilidad se comanda en el programa mediante un parámetro de control seleccionable en los datos de entrada.

Mediante otro parámetro, es posible variar el porcentaje de incremento deseado en la potencia de referencia del reactor.

Se dispone de otro que permite seleccionar el tipo de excitación (escalón o rampa) y la pendiente en el caso de rampa.

La subrutina Regkas contiene las ecuaciones de los sistemas de control en el modo alternativo. Posee un control de potencia similar al del modo normal, pero aquí la referencia de potencia del reactor está determinada por 2 reguladores en cascada.

El primero es un regulador P-I que genera una señal de referencia de temperatura de refrigerante en función del apartamiento de la presión de vapor respecto al valor de referencia de presión del secundario.

El segundo regulador, también P-I, compara la temperatura media del refrigerante con el valor de referencia anteriormente definido, proporcionando como salida la señal de referencia de potencia del reactor.

En este caso el caudal de vapor que ingresa a la turbina es determinado por el regulador de turbina, en base a la demanda de carga externa y al estatismo, no existiendo control continuo sobre la presión.

Se impide que la presión baje a valores inadmisibles al aumentar la demanda de carga mediante un regu-

lador de presión mínima, que toma el control de la presión de vapor cuando esta se encuentra 2 ata por debajo de la presión de referencia. El regulador es del tipo P-I y actúa controlando la posición de la válvula de admisión a la turbina.

Otro sistema de control considerado en la simulación es el de regulación de la válvula de by-pass de turbina, que impide el aumento descontrolado de la presión en el secundario, al disminuir el caudal de vapor como consecuencia de una reducción brusca de la demanda de carga. Esta válvula comienza a actuar cuando la presión alcanza un umbral situado por encima de la presión nominal.

ANALISIS DE RESULTADOS.

Se presentan los correspondientes a dos casos de perturbaciones que permiten observar la respuesta del modelo.

1 - Reducción tipo escalón del 10% en la potencia del reactor.

La potencia neutrónica decrece y el regulador de turbina disminuye el caudal de admisión de vapor (WD) tratando de mantener la presión del secundario en su valor de referencia. Aumenta en consecuencia la temperatura de entrada del refrigerante al núcleo, lo cual produce la expansión de la masa del primario, estableciéndose un caudal ascendente en la línea de conexión primario-presurizador.

La presión a la salida del núcleo sufre un pequeño aumento, pasando de 115,1 ata (al segundo) a 115,7 ata a los 7 seg. del comienzo de la perturbación, para luego disminuir, siguiendo la evolución descendente de la potencia y del caudal de vapor. (fig. 5, 6 y 7).

La entrada de los calefactores, operada por la diferencia entre la presión del primario y la referencia de presión, es acompañada por la generación de un caudal de evaporación (W_s) en la zona líquida del presurizador, que aumenta la presión en la zona de vapor.

El aumento de la presión del primario produce una disminución de su volumen específico, que tratará de ser compensado por la introducción de refrigerante desde el presurizador. Ello produce primero la disminución de caudal en la línea de conexión y luego la inversión

de su sentido de circulación (pasará del presurizador al primario, como se observa en la evolución de W_p). El caudal de vapor W_p desciende y luego se estabiliza en un valor menor que el inicial, debido a la menor potencia requerida, mientras que el regulador de la presión del secundario mantiene la presión.

Asimismo se regula a su valor nominal (115 ata) la presión de operación del sistema primario.

Se puede inhibir la intervención del corte rápido por distancia a la ebullición y observar entonces en la evolución de los distintos parámetros las implicancias de dicho corte respecto a los valores críticos de seguridad. Por ej. la temperatura de entrada del refrigerante al núcleo podrá alcanzar valores superiores a los que permite el acondicionamiento de dicha señal de corte. La presión del primario aumentará y la apertura de las válvulas de alivio evitará la sobrepresión del sistema.

2 - Incremento tipo rampa del 10% en la potencia, a partir de una potencia inicial del 90%.

Se adoptó un rate de crecimiento del 0,5% por segundo. Al aumentar la potencia del reactor, tiende a subir la presión del secundario. El regulador de turbina aumenta el caudal de vapor, llevando nuevamente la presión a su valor de referencia (44 ata). La temperatura del refrigerante a la salida del núcleo aumenta hasta alcanzar su nuevo valor de régimen (fig. 8, 9 y 10), con el consecuente aumento de la presión del primario, que pasa de 115 ata a 118 ata.

A partir de una sobrepresión de 2 ata, (respecto a la presión de referencia = 115.1 ata), comienza la apertura de las válvulas de rociado, cuyo efecto será reducir la presión hasta su valor nominal.

REFERENCIA

- 1 - CNA - Comportamiento en servicio y en caso de perturbaciones. Bortolazzi, Hintergraeber, Huber. KWU (1970).
- 2 - CNA - Manual de operación.
- 3 - Digital Model Simulation of a Nuclear Presurizer, Baron, Nu. Sci. and Eng. 52 (1973).
- 4 - Subrutina ME04A - Harwell Subroutine Library. UKAEA.
- 5 - Comunicación interna. Subrutina para integración de ecuaciones diferenciales.
- 6 - Comunicación interna. Cálculo de las temperaturas en los límites de zona, en un intercambiador de calor en régimen estacionario.

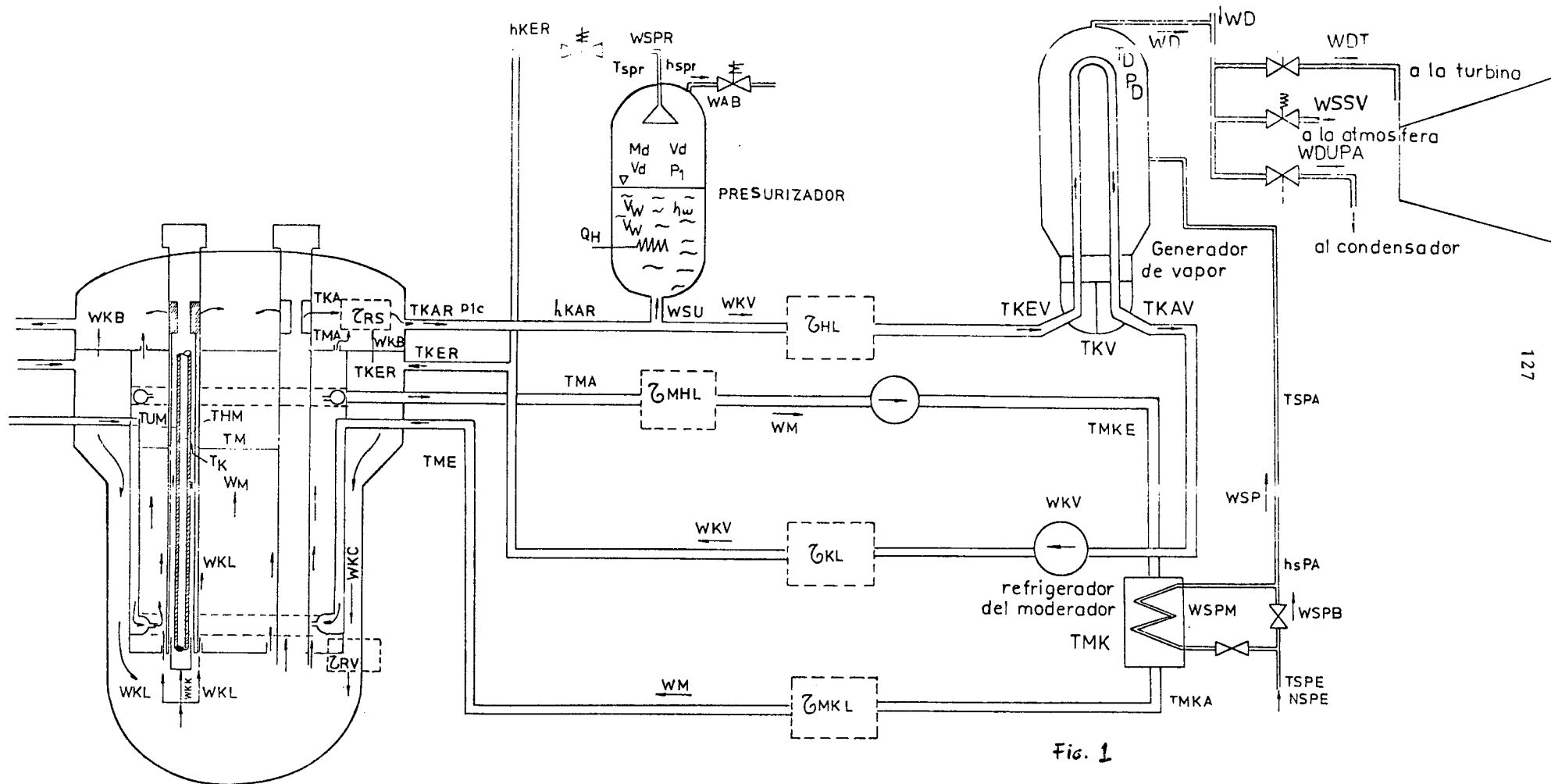


Fig. 1

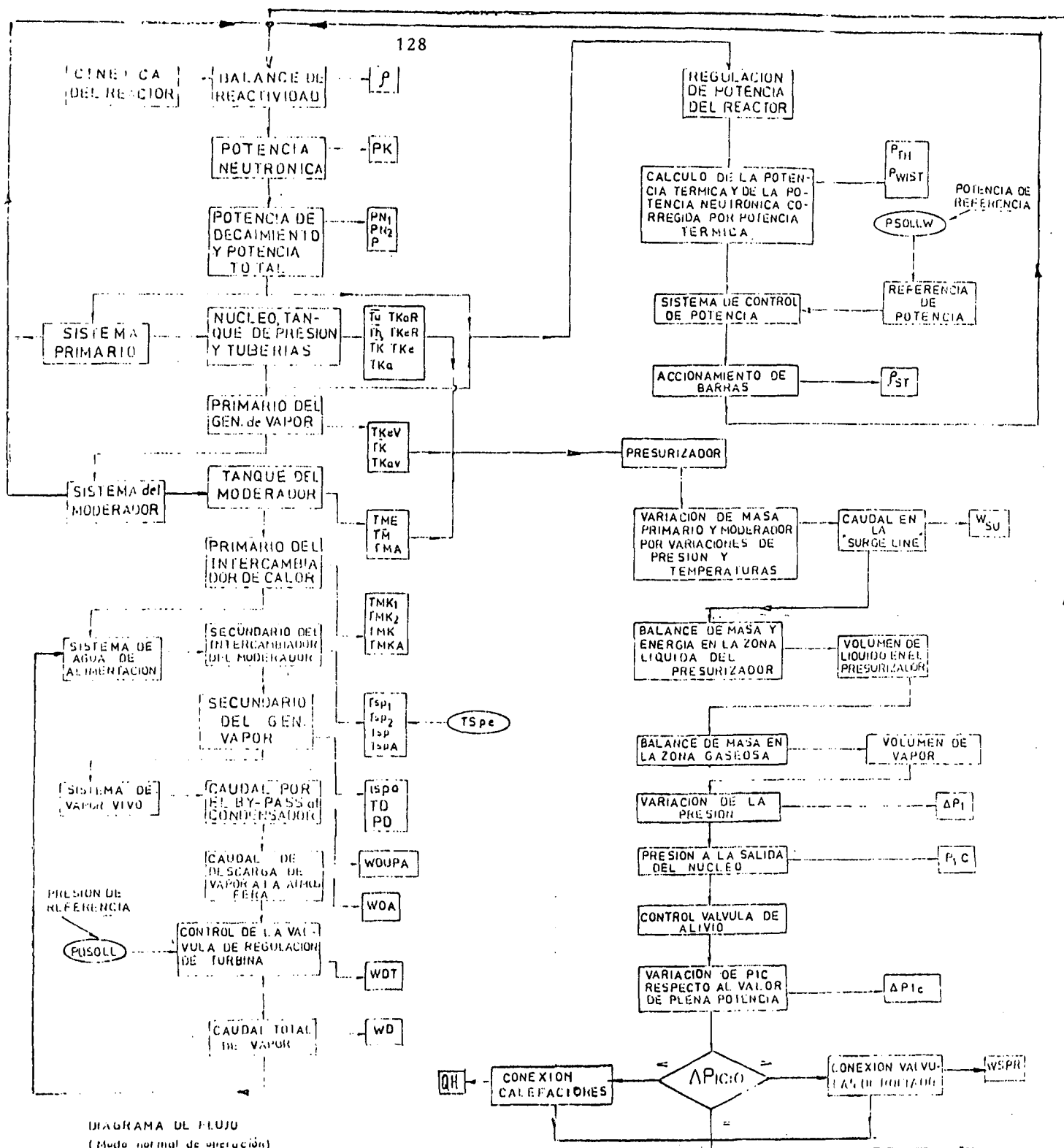


Fig. 2

MODO NORMAL (REGULACION DE PRESION ANTERIOR)

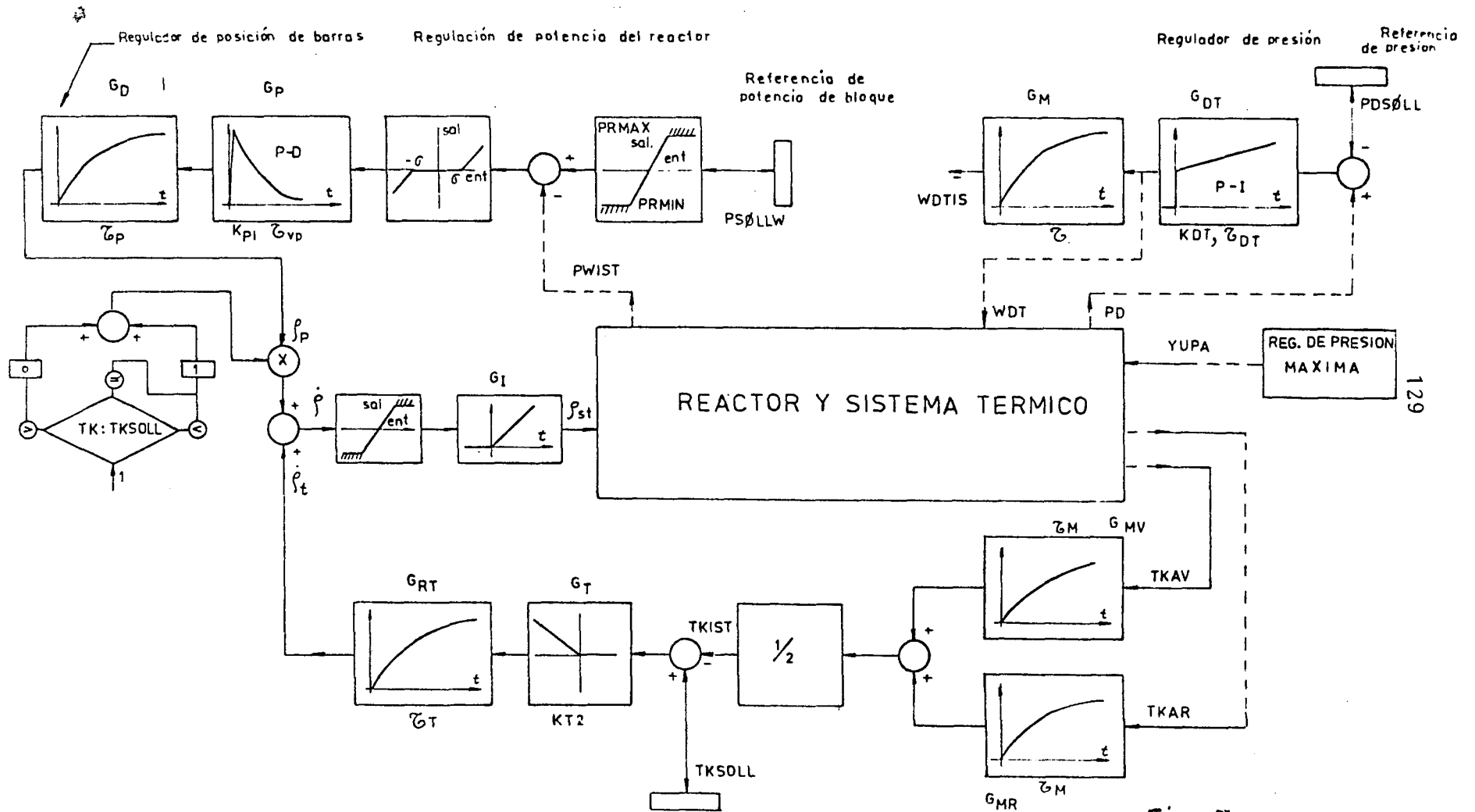


FIG. 3

MODO ALTERNATIVO (REGULACION EN CASCADA)

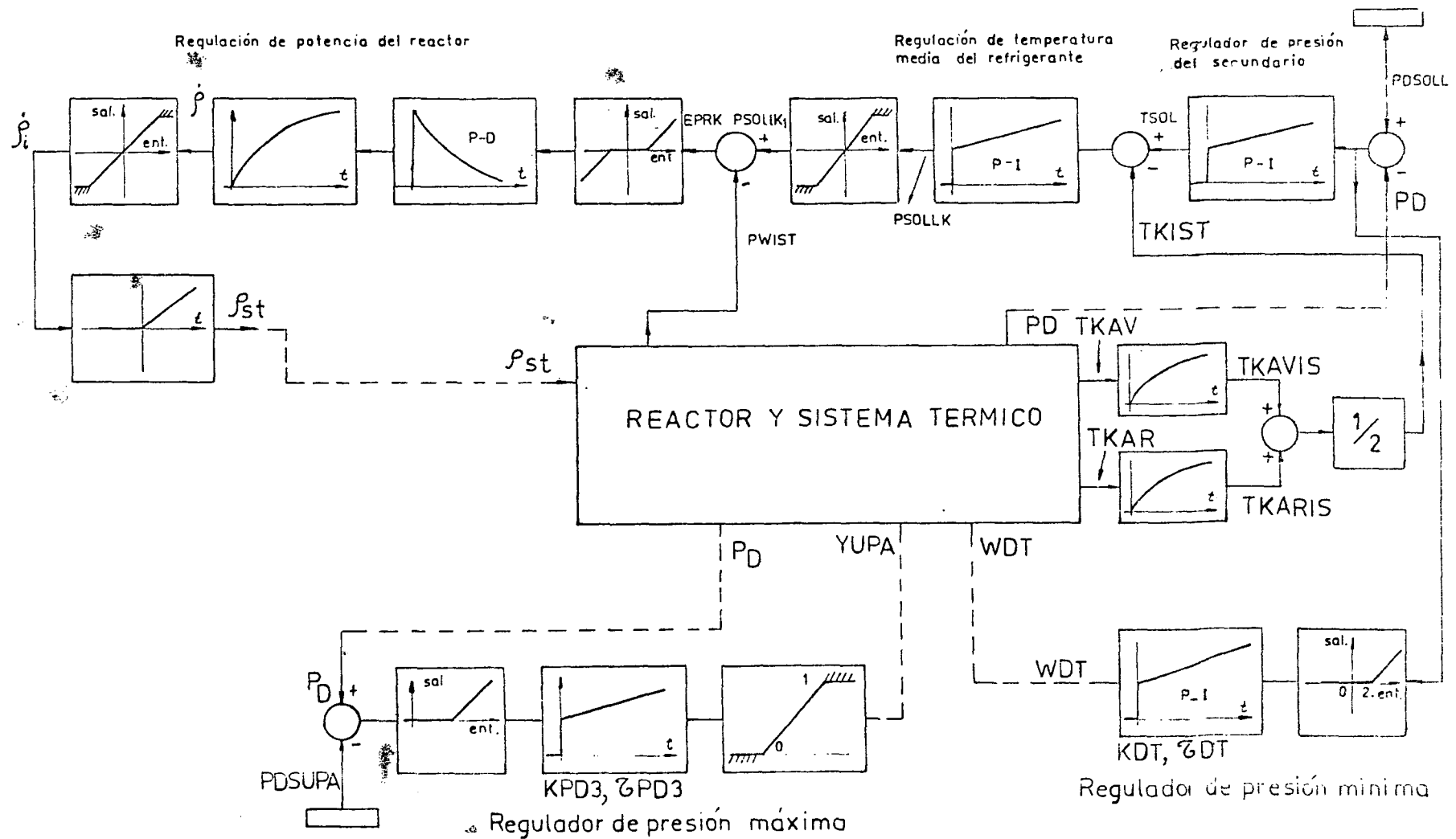
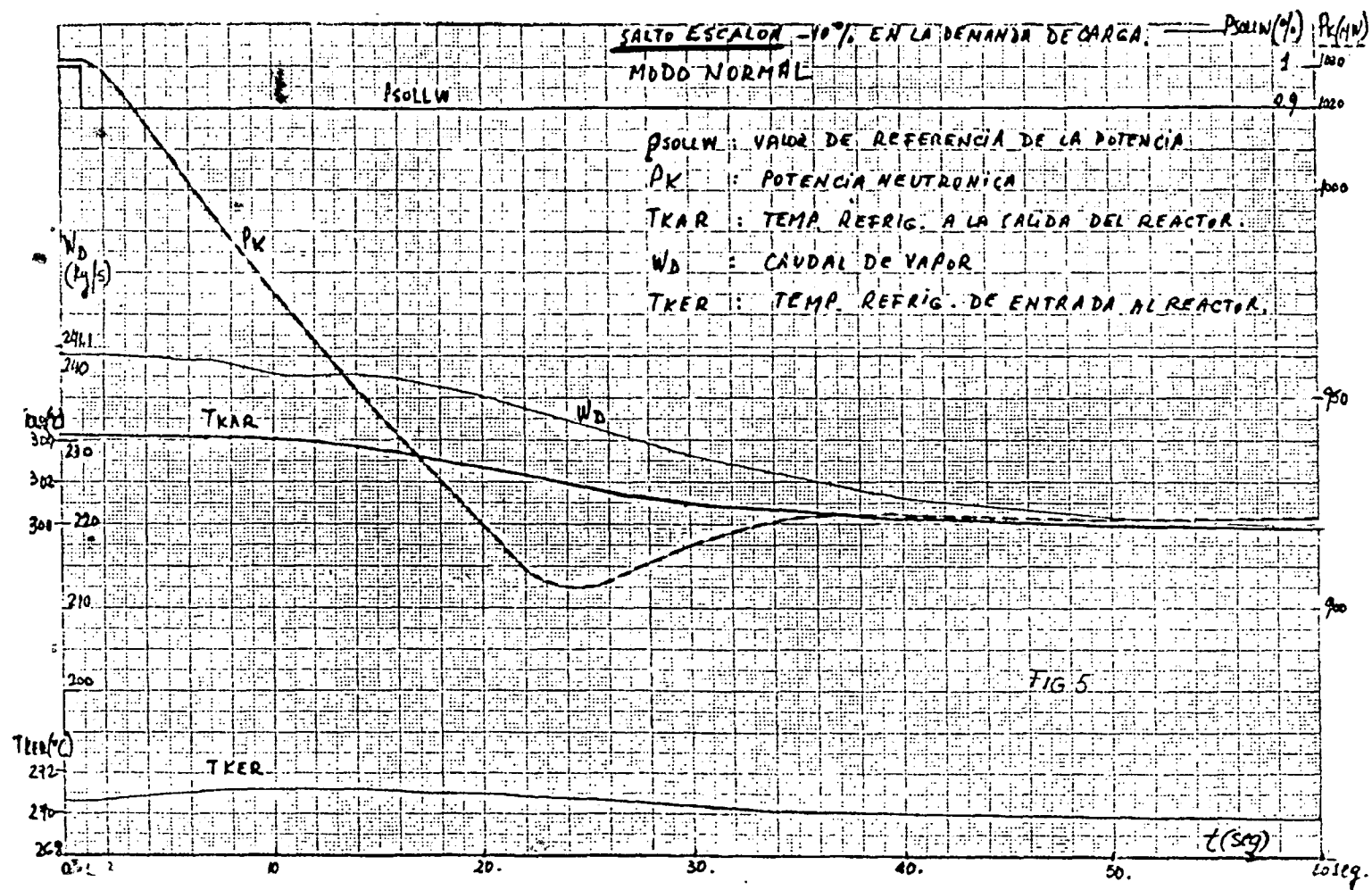
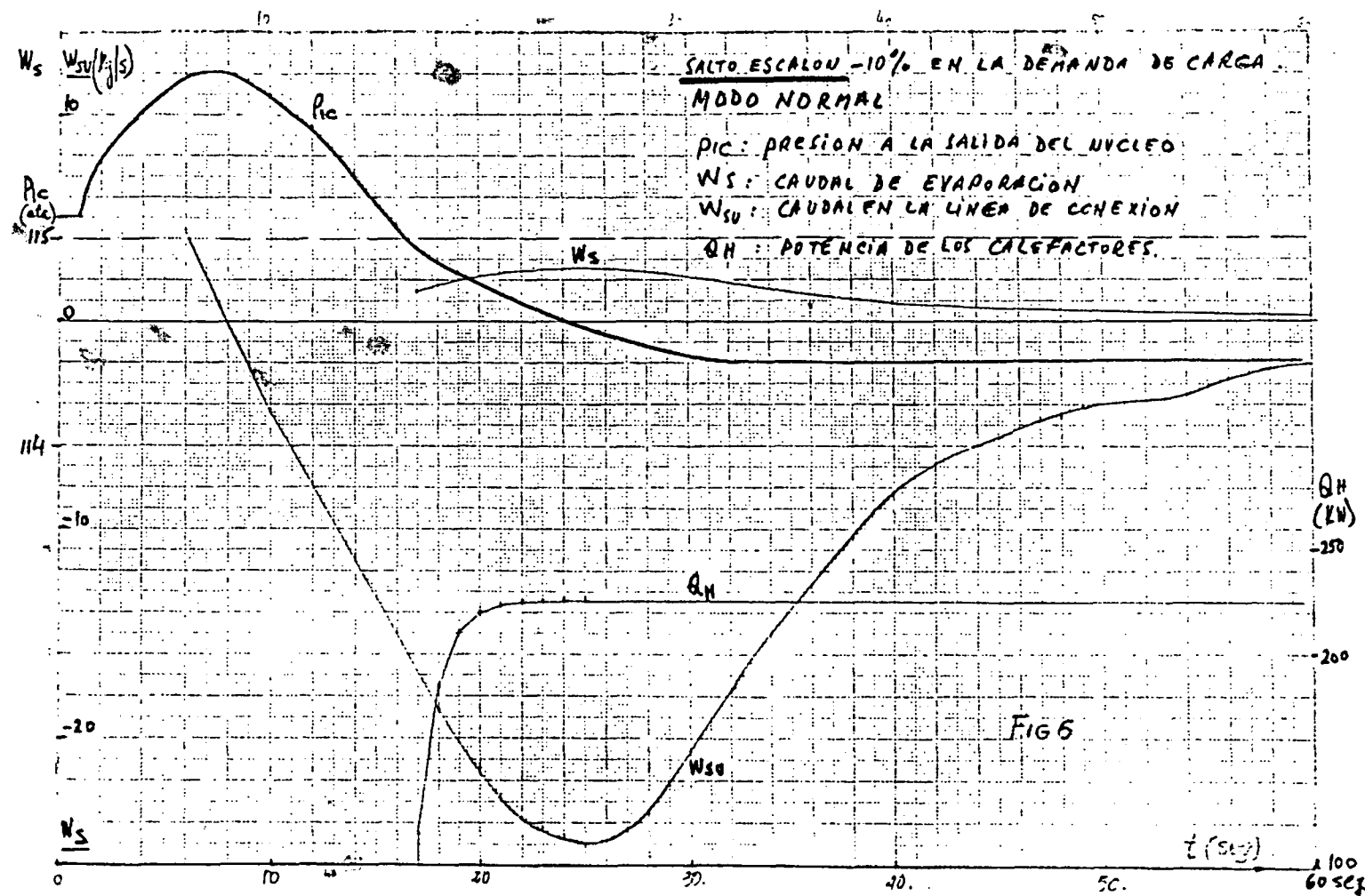
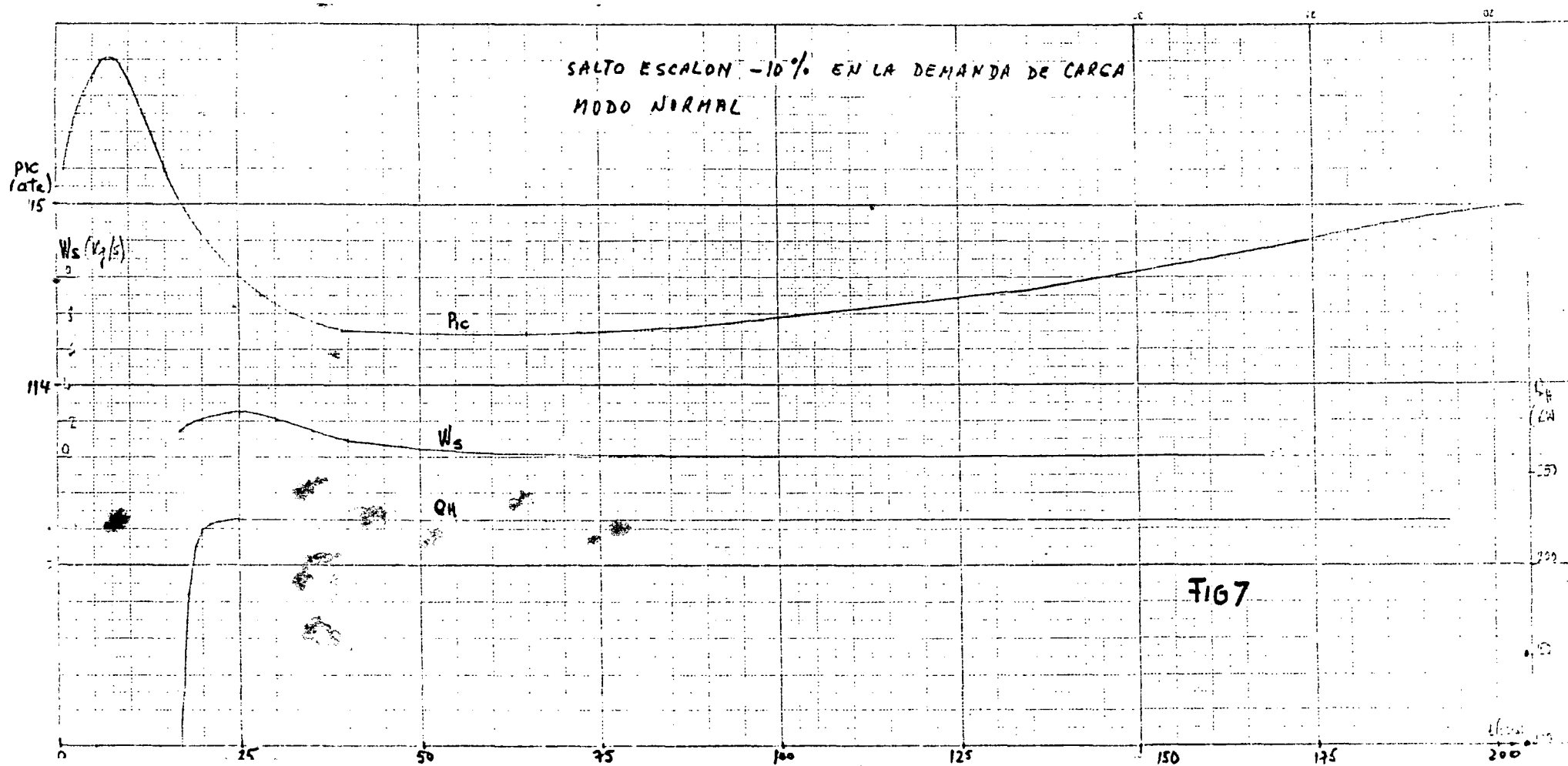
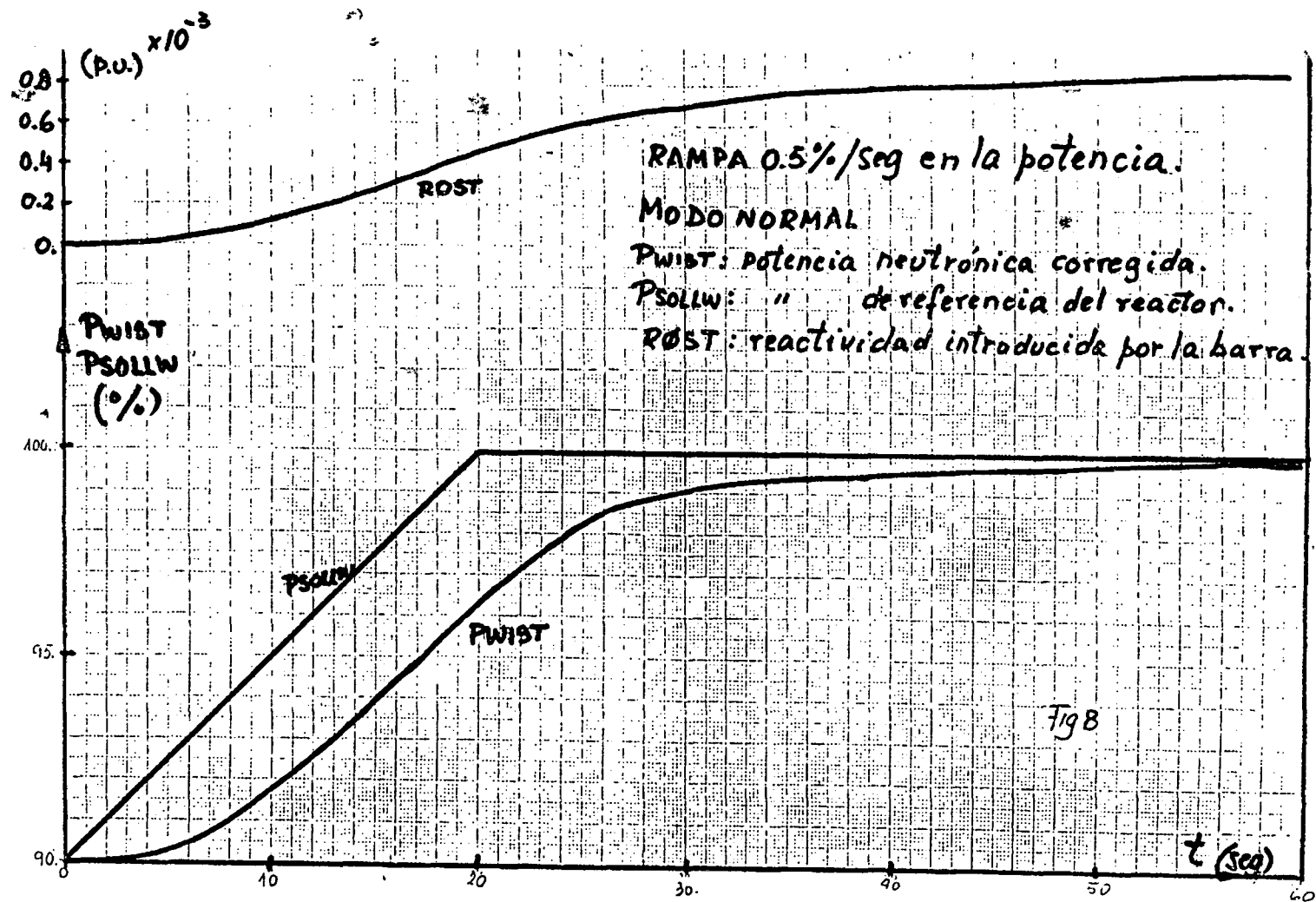


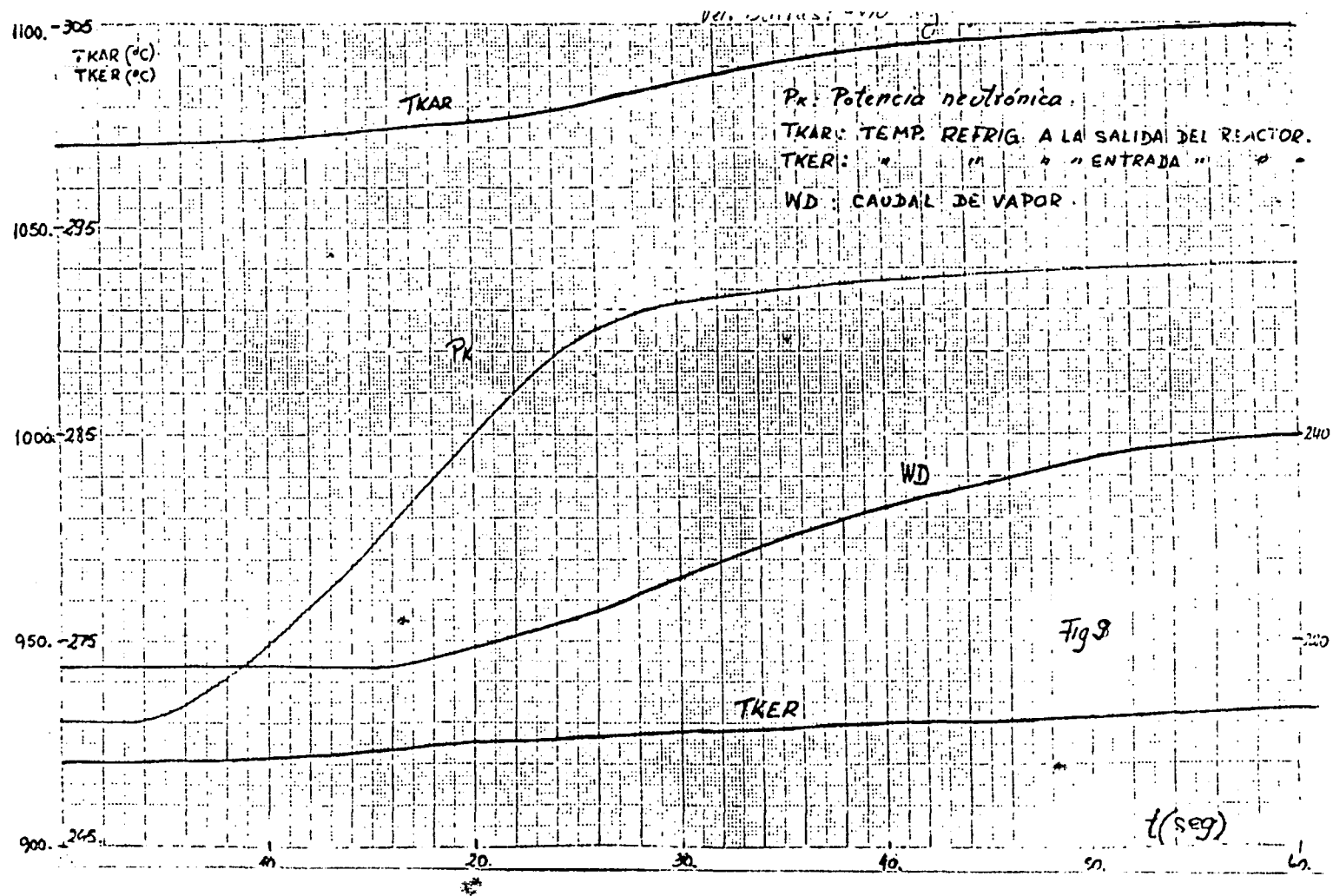
FIG. 4











136
 RAMPA DE 0.5%/seg EN LA DE. 1 ANDA DE CARGA.

MOD. NORMAL

PIC: PRESION A LA SALIDA DEL NUCLEO

W₅₀: CAUDAL EN LA LINEA DE CONEXION

W_{SPR}: CAUDAL DE ROCIADO O STRAY

