



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 365 052**

51 Int. Cl.:

G21C 7/00 (2006.01)

G21D 3/12 (2006.01)

G21C 7/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07290613 .4**

96 Fecha de presentación : **15.05.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **1860664**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **28.11.2007**

54

Título: **Procedimiento de regulación de parámetros de funcionamiento del núcleo de un reactor nuclear con agua a presión.**

30

Prioridad: **22.05.2006 FR 06 04572**

45

Fecha de publicación de la mención BOPI:
21.09.2011

45

Fecha de la publicación del folleto de la patente:
21.09.2011

73

Titular/es: **AREVA NP**
Tour Areva 1 Place de la Coupole
92400 Courbevoie, FR

72

Inventor/es: **Grossetete Alain**

74

Agente: **Curell Aguilá, Marcelino**

ES 2 365 052 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de regulación de parámetros de funcionamiento del núcleo de un reactor nuclear con agua a presión.

5 La presente invención se refiere en general a los procedimientos de manejo de reactores nucleares.

Más precisamente, la invención se refiere a un procedimiento de regulación de parámetros de funcionamiento del núcleo de un reactor nuclear con agua a presión, según el preámbulo de la reivindicación 1.

10 Se conoce a partir del documento FR 2 493 582 un procedimiento en el que la temperatura del líquido primario se regula automáticamente mediante el desplazamiento de los grupos de barras de control en función de la potencia solicitada a la turbina, del valor actual de la temperatura y de una temperatura de referencia. La distribución axial de potencia térmica (y neutrónica) se regula automáticamente desplazando determinados grupos, elegidos de manera apropiada. Finalmente, el parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor está controlado por un operario, ajustando la concentración de boro en el líquido primario mediante inyección o bien de agua pura, o bien de una disolución de boro concentrado.

15 En este procedimiento, se debe mantener un grupo permanentemente insertado en la parte baja del núcleo, para poder garantizar el control de la distribución axial de potencia. Esta limitación es imposible de satisfacer cuando el reactor funciona a potencia elevada, estando entonces todos los grupos de barras de control situados en la parte alta del núcleo. Los operarios deben inhibir en ese caso la regulación automática de la temperatura y de la distribución axial de potencia según el modo indicado anteriormente, y cambiarla a otro modo de funcionamiento que permite únicamente la regulación automática de la temperatura.

20 Este cambio necesita una estabilización del tramo: por tanto el procedimiento de regulación del núcleo descrito anteriormente no permite variar automáticamente la potencia de la turbina cuando los grupos están situados en la zona de cambio entre los dos modos de regulación. El funcionamiento del reactor "en regulación de frecuencia" no es posible en esta zona, ya que este funcionamiento consiste en modular la potencia de la turbina con vistas a mantener la frecuencia de la red eléctrica alimentada por el reactor a 50 hercios.

25 Por otro lado, el documento FR 2 544 907 describe un procedimiento de regulación en el que se desplazan unos grupos denominados "grises" de regulación de potencia en función de la potencia solicitada a la turbina, y únicamente en función de esta potencia. Se desplaza un grupo de regulación R para regular la temperatura del núcleo. Está prevista una gestión automática de la concentración en boro mediante inyección/dilución, en función de la posición del grupo R y de la desviación de la distribución axial de la potencia con respecto a un valor de referencia.

30 En este contexto, la invención pretende proponer un procedimiento de regulación del núcleo de un reactor nuclear que permita realizar un control automático y eficaz de los tres parámetros de funcionamiento mencionados anteriormente (temperatura del líquido primario, distribución axial de potencia, capacidad de aumento de potencia) a lo largo de un intervalo más importante de potencia de funcionamiento del reactor.

35 Para ello, la invención se refiere a un procedimiento de regulación de los parámetros de funcionamiento del núcleo de un reactor nuclear con agua a presión, según la reivindicación 1.

40 El procedimiento también puede presentar una o varias de las siguientes características, consideradas individualmente o según todas las combinaciones técnicamente posibles:

45 - la primera etapa comprende una subetapa de cálculo de la consigna de temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo a partir de una magnitud representativa de la potencia proporcionada a la red eléctrica alimentada por el reactor,

50 - la primera etapa comprende una subetapa de reparto de los grupos de barras en un subconjunto de control de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo y un subconjunto pesado que garantiza esencialmente el control de la distribución axial de potencia, insertándose los grupos de barras del subconjunto pesado menos que los del subconjunto,

55 - el parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor se determina al menos a partir de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control, comprendiendo la primera etapa una subetapa de cálculo de una consigna de posición del o de los grupos de barras del subconjunto de control en función de una consigna de capacidad de aumento de potencia y de magnitudes adquiridas,

60 - la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende:

65

- * una subetapa de cálculo de los desplazamientos que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control en función de la consigna y del valor efectivo de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo, y
- 5 * una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control en función de los desplazamientos calculados con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo a la consigna,
- la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende:
- 10 * una subetapa de cálculo de los desplazamientos que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control y del desplazamiento que debe realizarse para el núcleo cuando los grupos de barras se elevan rápidamente en la proximidad de la posición alta,
- 15 - en la etapa de selección, se selecciona la primera ley cuando al menos un grupo de barras se encuentra en una posición de inserción inferior a una posición predeterminada, y se selecciona la segunda ley en el caso contrario,
- el procedimiento comprende una primera etapa de cálculo de valores de consigna de los parámetros de funcionamiento al menos en función de consignas de control,
- 20 - la primera etapa comprende una subetapa de cálculo de la consigna de temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo a partir de una magnitud representativa de la potencia proporcionada a la red eléctrica alimentada por el reactor,
- 25 - la primera etapa comprende una subetapa de reparto de los grupos de barras en un subconjunto de control de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo y un subconjunto pesado que garantiza esencialmente el control de la distribución axial de potencia, insertándose los grupos de barras del subconjunto pesado menos que los del subconjunto,
- 30 - el parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor se determina al menos a partir de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control, comprendiendo la primera etapa una subetapa de cálculo de una consigna de posición del o de los grupos de barras del subconjunto de control en función de una consigna de capacidad de aumento de potencia y de magnitudes adquiridas,
- 35 - la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende:
- 40 * una subetapa de cálculo de los desplazamientos que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control en función de la consigna y del valor efectivo de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo, y
- 45 * una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control en función de los desplazamientos calculados con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo a la consigna,
- la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende:
- 50 * una subetapa de cálculo de los desplazamientos que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control y del desplazamiento que debe realizarse para el subconjunto pesado en función de la consigna y del valor efectivo de la distribución axial de potencia térmica, y
- 55 * una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control y/o del subconjunto pesado en función de los desplazamientos calculados con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica a la consigna,
- la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende:
- 60 * una subetapa de cálculo de la concentración del compuesto absorbente en función de la consigna y del valor efectivo del parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor, y
- 65 * una subetapa de ajuste de la concentración del compuesto absorbente en el líquido de refrigeración primario a la concentración calculada con vistas a regular el parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor a su valor de consigna,
- la etapa de regulación con ayuda de la segunda ley de control comprende:

- 5
- * una subetapa de cálculo del o de los desplazamientos que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control y del desplazamiento que debe realizarse para el subconjunto pesado en función de la consigna y del valor efectivo de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo y en función de la consigna y de la posición efectiva del grupo P1, y
 - * una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos del subconjunto de control y/o del subconjunto pesado en función de los desplazamientos calculados, con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo a la consigna,
- 10
- el subconjunto de control se desplaza con prioridad para regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo, desplazándose el subconjunto pesado cuando el subconjunto de control llega a los límites de una banda muerta centrada en su consigna de posición,
 - la etapa de regulación con ayuda de la segunda ley de control comprende:
- 15
- * una subetapa de cálculo de la concentración del compuesto absorbente en función de la consigna y del valor efectivo de la distribución axial de potencia térmica, y
 - * una subetapa de ajuste de la concentración del compuesto absorbente en el líquido de refrigeración primario a la concentración calculada con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica a la consigna,
- 20
- la etapa de regulación con ayuda de la segunda ley de control comprende:
- 25
- * una subetapa de cálculo del o de los desplazamientos que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control y del desplazamiento que se debe realizar para el subconjunto pesado en función de la consigna y del valor efectivo de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control, y
 - * una subetapa de modificación de las posiciones de inserción del o de los grupos del subconjunto de control y/o del subconjunto pesado en función de los desplazamientos calculados, con vistas a mantener el o los grupos del subconjunto de control en una banda muerta alrededor de la consigna de posición de inserción,
- 30
- los grupos de barras del subconjunto de control se insertan o se extraen secuencialmente cuando la potencia térmica producida por el núcleo varía, presentando dos grupos insertados o extraídos sucesivamente unas posiciones de inserción respectivas separadas entre sí por una desviación constantemente inferior a un límite predeterminado.
- 35
- 40
- Otras características y ventajas de la invención se pondrán más claramente de manifiesto a partir de la descripción siguiente, a título indicativo y en absoluto limitativo, haciendo referencia a las figuras adjuntas, en las que:
- la figura 1 es una representación esquemática que muestra las principales etapas del procedimiento según la invención;
- 45
- la figura 2 es un diagrama de proceso, que detalla las etapas de las dos leyes de control puestas en práctica en el procedimiento de la figura 1;
 - las figuras 3A, 3B, 3C representan de manera esquemática los movimientos de los grupos de barras de control, en un reactor controlado con ayuda del procedimiento de las figuras 1 y 2, cuando la consigna de potencia pasa del 100% de la potencia nominal (figura 3A) al 50% del valor nominal (figura 3B) y después al 30% del valor nominal (figura 3C);
- 50
- la figura 4 es una representación esquemática de la lógica de movimiento de los grupos según el procedimiento de las figuras 1 y 2, en función de la diferencia ΔT_{med} entre la temperatura media efectiva del líquido de refrigeración y la temperatura de consigna (eje de las abscisas, expresada en $^{\circ}C$), y de la diferencia ΔAO entre la distribución de potencia actual y la consigna de distribución de potencia (eje de las ordenadas, expresada en porcentaje), para la primera ley de control (al menos un grupo insertado en la parte baja del núcleo);
- 55
- las figuras 5A a 5D representan de manera esquemática los movimientos de los grupos según la primera ley de control, con vistas a regular la distribución axial de potencia, en diferentes situaciones;
 - las figuras 6A a 6C representan de manera esquemática la posición de los grupos de control, con vistas a regular la capacidad de aumento de potencia del reactor, para 2 niveles de potencia (el 100% y el 50%); y 2 valores de capacidad de aumento de potencia ($P_{max} = 100\%$ y 70%) diferentes.
- 60
- 65

- la figura 7 representa de manera esquemática la lógica de desplazamiento de los grupos de control, en función de la desviación ΔT_{med} entre la temperatura media efectiva del líquido de refrigeración primario y la consigna de temperatura (eje de las abscisas, expresada en $^{\circ}C$), y la desviación $\Delta Z1$ entre la posición efectiva del grupo de control P1 y la consigna de posición (eje de las ordenadas), para la segunda ley de control; y

5 - las figuras 8A y 8B representan de manera esquemática los movimientos de los grupos de control según la segunda ley de control, en diferentes situaciones.

10 El procedimiento representado de manera esquemática en las figuras 1 y 2 pretende regular el núcleo de un reactor nuclear, en particular de un reactor con agua a presión.

Este reactor se representa de manera simbólica en la figura 1 y comprende:

- 15 - un núcleo 10 que comprende unos conjuntos de combustible nuclear;
- una cuba 20 en cuyo interior está dispuesto el núcleo 10 del reactor;
- un generador de vapor (no representado);
- 20 - una turbina de vapor (no representada) adecuada para activar un alternador acoplado a la red de distribución eléctrica;
- un circuito primario 30 que conecta en circuito cerrado la cuba 20 a un lado primario del generador de vapor;
- 25 - un circuito secundario (no representado) que conecta en circuito cerrado un lado secundario del generador de vapor a la turbina.

El núcleo 10 produce una potencia térmica variable. Está dividido en una zona alta y una zona baja.

30 El circuito primario 30 es adecuado para garantizar la circulación a través del núcleo 10 de un líquido de refrigeración primario, que comprende esencialmente agua y boro disuelto, calentándose este líquido al contacto con los conjuntos de combustible nuclear y cediendo después su calor al pasar en el generador de vapor. El circuito secundario es adecuado para garantizar la circulación de un líquido de refrigeración secundario, que comprende esencialmente agua, evaporándose este líquido en el generador de vapor mediante el calor cedido por el fluido

35 primario. El vapor activa la turbina, y después vuelve a condensarse y es enviado hacia el generador de vapor.

El alternador proporciona a la red una potencia eléctrica variable en función de la demanda de la red. El reactor se controla de manera que se adapta permanentemente la potencia térmica proporcionada por el núcleo a la potencia eléctrica solicitada por la red, haciendo variar la reactividad en el núcleo del reactor.

40 Con este objetivo, el reactor está equipado con los siguientes medios:

- 45 - unos medios para ajustar la concentración en boro disuelto en el líquido de refrigeración primario, mediante la inyección de una disolución de ácido bórico concentrada en el líquido primario cuando se desea variar la concentración a la alta, o mediante la inyección de agua pura cuando se desea variar la concentración a la baja;
- unas barras de control 40 de la reactividad del núcleo (figura 1), cada una susceptible de ocupar en el núcleo 10 una pluralidad de posiciones de inserción escalonadas verticalmente a partir de una posición alta; las barras de control 40 están repartidas por ejemplo en cinco grupos P1 a P5, desplazándose conjuntamente todas las barras
- 50 de un mismo grupo;
- unos medios para insertar selectivamente cada grupo de barras P1 a P5 en el núcleo, verticalmente, de arriba hacia abajo, hasta una de las posiciones de inserción;
- 55 - unos medios para adquirir magnitudes FH y FB representativas de las potencias térmicas producidas en las zonas alta y baja del núcleo, de la temperatura TBF del líquido primario en la rama fría 31 del circuito primario, es decir inmediatamente aguas arriba del núcleo, de la temperatura TBC del líquido primario en la rama caliente 32 del circuito primario, es decir inmediatamente aguas abajo del núcleo, y del caudal Q de líquido primario en el circuito
- 60 primario.

El boro en disolución en el líquido primario absorbe los neutrones emitidos por los conjuntos de combustibles nucleares, de tal manera que la reactividad del núcleo 10 baja cuando la concentración en boro aumenta.

65 En un reactor nuclear con agua a presión, los conjuntos de combustible nuclear comprenden cada uno un haz de tubos de grandes longitudes que contienen unas pastillas de material fisible, denominados lápices. Estos lápices se

disponen verticalmente, en paralelo unos a otros, y se ensamblan mediante unas rejillas de refuerzo. En determinados conjuntos, varios lápices se sustituyen por tubos huecos, denominados tubos guía.

Las barras de control comprenden cada una un haz de tubos que encierran un material que absorbe los neutrones. Esos tubos presentan la misma longitud que los conjuntos de combustibles. Están conectados entre sí de manera que constituyen un racimo móvil de una única pieza en una dirección vertical. Cada racimo es susceptible de insertarse en los tubos guías de un conjunto de combustibles, de tal manera que los tubos de material que absorbe los neutrones se interponen en la red de lápices que encierran las pastillas de combustibles. La reactividad del núcleo disminuye cuando se inserta una barra de control. Cuanto más baja está la barra de control, es decir, alejada de su posición alta, menor es la reactividad del núcleo.

Las magnitudes representativas de las potencias térmicas producidas en las partes alta y baja del núcleo son los flujos neutrónicos FH y FB en las partes alta y baja del núcleo, que se miden con ayuda de sensores dispuestos a diferentes alturas del núcleo.

El procedimiento de regulación representado en la figura 1 permite regular de manera automática varios parámetros de funcionamiento del núcleo del reactor, en función de consignas de control fijadas por el operario que controla el reactor, o impuestas desde el exterior, por ejemplo por la red de distribución eléctrica.

Los parámetros regulados comprenden al menos la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo Tmed, la distribución axial de potencia térmica entre las zonas alta y baja del núcleo AO y un parámetro Pmax representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor Pmax.

La concentración en boro en el líquido primario y las posiciones de los grupos de barras P1 a P5 se modifican automáticamente con vistas a regular los parámetros de funcionamiento, sin intervención de los operarios, o con intervenciones muy limitadas de los operarios, por ejemplo para modificar las consignas de control, o para validar las órdenes de desplazamiento de los grupos de barras o de modificación de la concentración en boro previstas por el procedimiento de regulación.

La capacidad de aumento de potencia Pmax corresponde a la potencia térmica susceptible de ser producida por el núcleo cuando los grupos de barras P1 a P5 se elevan rápidamente hacia arriba del núcleo, en la proximidad de su posición alta.

La distribución axial de potencia AO se expresa con ayuda de la siguiente relación:

$$AO = (FH - FB) / (FH + FB) \quad (1)$$

en la que FH y FB son los flujos neutrónicos respectivamente en las partes alta y baja del núcleo.

La temperatura Tmed se expresa con ayuda de la siguiente relación:

$$Tmed = (TBC + TBF) / 2 \quad (2)$$

Las consignas de control del núcleo comprenden una magnitud Pc representativa de la potencia secundaria que debe ser proporcionada por la turbina, una consigna de capacidad de aumento de potencia del reactor Pmaxc, y una consigna de distribución axial de potencia térmica entre las zonas alta y baja del núcleo AOc. La magnitud representativa de la potencia secundaria Pc es por ejemplo una medición de potencia térmica proporcionada por el circuito secundario del reactor. Como variante, se puede utilizar como consigna una consigna de la potencia eléctrica proporcionada por el alternador a la red.

Tal como se muestra en la figura 1, el procedimiento de regulación comprende:

- una primera etapa 1 de cálculo de valores de consigna (Tmedc, AOc, Pmaxc) de los parámetros de funcionamiento en función de las consignas de control (Pc, AOc, Pmaxc) fijadas por el operario y de la potencia térmica primaria efectiva (Ppe) proporcionada por el núcleo al circuito primario;
- una segunda etapa 2 de adquisición de los valores efectivos de las magnitudes (FH, FB) representativas de las potencias térmicas producidas en las zonas alta y baja del núcleo, de las temperaturas del líquido de refrigeración primario en las ramas caliente y fría (TBC, TBF) y del caudal de líquido primario (Q);
- una tercera etapa 3 de evaluación de los valores efectivos (Tmede, AOe, Pmaxe) de los parámetros de funcionamiento al menos en función de las magnitudes adquiridas (FH, FB, TBC, TBF, Q);

- una cuarta etapa 4 de selección de una ley de control de la concentración en boro [B] y de las posiciones de inserción Z1 a Z5 de los grupos de barras P1 a P5, elegida de entre unas primera y segunda leyes de control diferentes una de la otra;

5 - una quinta etapa 5 de regulación de los parámetros de funcionamiento con ayuda de la ley de control seleccionada, en función de las consignas (T_{medc} , AO_c , \hat{P}_{maxc}) para dichos parámetros y de los valores efectivos (T_{mede} , AO_e , \hat{P}_{maxe}) evaluados.

Estas diferentes etapas se representan de manera detallada en la figura 2.

10

La primera etapa 1 comprende las subetapas 11 a 13 ilustradas en la figura 2.

En la subetapa 11, se calcula la consigna de temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo T_{medc} en función de la consigna de potencia P_c fijada por el operario. Se utiliza para ello por ejemplo una curva predeterminada que proporciona directamente el valor T_{medc} en función de P_c .

En la subetapa 12, se reparten los grupos de barras P1 a P5 en un subconjunto P_i de control de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo T_{med} y un subconjunto pesado H poco insertado, garantizando esencialmente el control de la distribución axial de potencia AO.

20 Tal como se muestra en las figuras 3A a 3C, los grupos del subconjunto de control P_i son susceptibles de desplazarse individualmente, de manera coordinada, con vistas, en particular, a controlar la temperatura T_{med} . Se desplazan hasta unas posiciones de inserción, que pueden ser diferentes unas de otras. Por el contrario, los grupos del subconjunto pesado H se desplazan juntos, hasta una posición de inserción idéntica para todos los grupos del subconjunto. La asignación de los racimos que constituyen los grupos se puede modificar, con el fin de poder minimizar el subagotamiento provocado por el grupo P1 en funcionamiento nominal así como poder repartir el número de pasos por el conjunto de los racimos. El subconjunto pesado H siempre se coloca en la mitad superior del núcleo, lo que significa en otras palabras que su posición de inserción permanece siempre inferior a la mitad de la altura del núcleo.

30 Cuando el reactor está próximo a su potencia nominal, el subconjunto de control P_i sólo contiene un grupo (grupo P1 en la figura 3A) y el subconjunto pesado H comprende los otros cuatro grupos.

35 Por el contrario, a baja potencia del reactor, el subconjunto de control P_i contiene varios grupos (3 grupos en la figura 3C) y el subconjunto pesado H comprende menos de cuatro grupos.

40 En la continuación de la descripción se designarán colectivamente mediante Z_i las posiciones Z1, Z2,... de los diferentes grupos del subconjunto P_i , y se designará mediante Z_h la posición única de los grupos del subconjunto pesado H.

La consigne \hat{P}_{maxc} del parámetro \hat{P}_{max} representativo de capacidad de aumento de potencia P_{max} del reactor se calcula en la subetapa 13.

45 El parámetro \hat{P}_{max} corresponde al vector que presenta como coordenadas las posiciones de inserción Z_i de los grupos de barras del subconjunto P_i . Se determina mediante un software de cálculo, a partir de P_{max} y de la potencia primaria efectiva P_{pe} . La potencia primaria efectiva P_{pe} se estima con ayuda de la siguiente fórmula:

$$P_{pe} = C.Q. (TBC - TBF) \quad (3)$$

50 siendo C la capacidad calorífica del líquido primario.

55 El software estima la variación de la potencia primaria susceptible de ser obtenida mediante el desplazamiento secuencial de los grupos del subconjunto P_i hacia arriba o hacia abajo, partiendo de la situación efectiva del núcleo (concentración efectiva de boro en el líquido primario, posición efectiva de los grupos), siguiendo el procedimiento de inserción secuencial detallado a continuación. Conociendo la potencia primaria efectiva P_{pe} y la curva de variación de la potencia primaria en función de las posiciones Z_i , es posible asociar a un valor de capacidad de aumento de potencia P_{max} un vector de posiciones Z_i .

60 La consigna \hat{P}_{maxc} corresponde por tanto a un valor de consigna Z_{ic} de las posiciones de inserción de los grupos de barras del subconjunto P_i . Los valores Z_{ic} son las posiciones teóricas de los grupos de barras del subconjunto P_i que permiten obtener a la vez una potencia primaria efectiva igual a P_{pe} y una capacidad de aumento de potencia del reactor igual a la consigna \hat{P}_{maxc} .

A continuación se describe el procedimiento de inserción secuencial de los grupos del subconjunto P_i .

Tal como se muestra en las figuras 3A a 3C, las consignas de posición se determinan previendo una inserción secuencial de los grupos del subconjunto P_i durante la variación de potencia. Así, para una potencia primaria efectiva P_{pe} igual al 100% de la potencia nominal (figura 3A), el subconjunto P_i sólo comprende el grupo P1, y se atribuye al grupo P1 una posición de consigna Z_{1c} poco insertada, recibiendo los otros cuatro grupos P2 a P5 consignas en posición alta y formando el subgrupo pesado H. Cuando la potencia primaria P_{pe} es menor, la consigna de posición Z_{1c} del grupo P1 se elige más baja. Cuando la potencia primaria P_{pe} es inferior a un umbral (por ejemplo el 80%), la desviación entre la consigna de posición del grupo P1 y la del grupo P2 supera un límite máximo (1/2 de la altura del núcleo por ejemplo) y el grupo P2 se bascula del subconjunto H hacia el subconjunto de control P_i . Se calculan las consignas de posición de los dos grupos de manera que se mantiene una desviación de inserción Δ constante (en el ejemplo anterior, el 50% de la altura del núcleo, preferentemente comprendida entre el 40% y el 60% de la altura del núcleo) predeterminada entre sí (véase la figura 3B, que ilustra las posiciones de los grupos para una consigna de potencia del 50% de la potencia nominal). Cuando la potencia primaria P_{pe} es inferior a otro umbral (por ejemplo el 50%) la desviación entre la consigna de posición del grupo P2 y la del grupo P3 supera un límite máximo (1/2 de la altura del núcleo por ejemplo) y el grupo P3 se bascula del subconjunto H hacia el subconjunto de control P_i (figura 3C, que ilustra las posiciones de los grupos para una consigna de potencia del 30%). Se calculan las consignas de posición de los grupos P2 y P3 de manera que se mantiene la desviación de inserción Δ predeterminada entre sí. En paralelo, se atribuye al grupo P1 una posición de consigna que corresponde al máximo de inserción, de tal manera que se reduce la desviación entre las consignas de posición del grupo P1 y del grupo P2.

En la segunda etapa 2, se adquieren los flujos neutrónicos FH y FB en las partes alta y baja del núcleo, las temperaturas TBC y TBF del líquido de refrigeración primario en las ramas caliente y fría del circuito primario, y el caudal Q de líquido primario en el circuito primario. Estas magnitudes se miden con ayuda de los sistemas de medición del reactor, o se recuperan en el sistema de manejo del reactor.

En la tercera etapa 3, se evalúan los valores efectivos T_{mede} , AO_e , \hat{P}_{maxe} de los parámetros de funcionamiento T_{med} , AO y \hat{P}_{max} . Se calcula el valor efectivo de la distribución axial de potencia AO_e , con ayuda de la fórmula (1) anterior, en función de los valores de los flujos neutrónicos FH y FB adquiridos en la segunda etapa. Se calcula el valor efectivo T_{mede} de la temperatura T_{med} , con ayuda de la fórmula (2) anterior, en función de los valores de las temperaturas TBC y TBF adquiridas en la segunda etapa. Se calcula el valor efectivo \hat{P}_{maxe} del parámetro representativo de P_{max} a partir de las posiciones de inserción efectivas Z_{ie} de los grupos de barras del subconjunto de control P_i y de la potencia primaria efectiva P_{pe} . Estas posiciones Z_{ie} se recuperan por ejemplo en el calculador que controla los medios de inserción de los grupos de barras. Se calcula la potencia P_{pe} , con ayuda de la fórmula (3) anterior, en función de los valores de temperaturas TBF y TBC y del valor de caudal primario Q adquiridos en la segunda etapa.

En la cuarta etapa 4, se selecciona la primera ley de control cuando al menos un grupo de barras se encuentra en una posición de inserción inferior a una posición predeterminada Z_{ref} , y se selecciona la segunda ley de control en el caso contrario.

La segunda ley se utiliza por tanto en particular cuando todos los grupos P1 a P5 están en la parte alta del reactor, es decir cuando el reactor funciona a una potencia próxima a la potencia nominal.

La primera ley de control se utiliza cuando al menos uno de los grupos está en la parte baja del reactor, es decir cuando el reactor funciona a una potencia inferior por ejemplo al 90% de la potencia nominal, o en un funcionamiento a potencia parcial con los grupos de barras en la parte alta del núcleo.

La etapa de regulación 5 del procedimiento, cuando se emplea la primera ley de control, se descompone en la parte izquierda de la figura 2.

La etapa de regulación 5 con ayuda de la primera ley de control comprende un módulo 51 de regulación de la temperatura T_{med} , un módulo 52 de regulación de la distribución axial de potencia AO , y un módulo 53 de regulación de la capacidad de aumento de potencia P_{max} .

El módulo de regulación de T_{med} 51 se descompone en:

- una subetapa de cálculo de los desplazamientos dZ_i que debe realizarse para todos los grupos de barras del subconjunto de control P_i , en función de la consigna T_{medc} y del valor efectivo T_{mede} de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo, y
- una subetapa de modificación de las posiciones de inserción Z_i de todos los grupos de barras del subconjunto de control P_i en función de los desplazamientos dZ_i calculados en la subetapa anterior, con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo T_{med} a la consigna T_{medc} .

El módulo 52 de regulación de la distribución de potencia AO se descompone en:

- 5 - una subetapa de cálculo del desplazamiento dZ_h que debe realizarse para el subconjunto pesado H y de los desplazamientos dZ_i que se deben realizar para los grupos de barras del subconjunto de control Pi, en función al menos de la consigna AOc y del valor efectivo AOe de la distribución axial de potencia térmica, y
- 10 - una subetapa de modificación de las posiciones de inserción Zi del o de los grupos de barras del subconjunto de control Pi y/o del subconjunto pesado H en función de los desplazamientos dZ_i y dZ_h calculados con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica AO a la consigna AOc.

Tal como se ha expuesto anteriormente, se utiliza la desviación entre el valor efectivo Tmede y la consigna Tmedc de la temperatura media del líquido de refrigeración en el cálculo de los desplazamientos de los subconjuntos Pi y H.

15 Por otro lado, el subconjunto de control Pi y el subconjunto pesado H se desplazan preferentemente en sentidos opuestos con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica AO, de manera que no se perturba la temperatura del líquido primario Tmed. Esto es cierto en particular cuando Tmed está en una banda muerta alrededor de su consigna Tmedc.

20 La figura 4 representa la lógica de desplazamiento de los grupos en diferentes situaciones, en función de la desviación ΔT_{med} entre la temperatura efectiva Tmede y la consigna Tmedc, y de la desviación ΔAO entre la distribución axial de potencia efectiva AOe y la consigna AOc.

25 La zona gris representa el dominio en el que AO y Tmed se encuentran cada uno en una banda muerta alrededor de sus respectivas consignas, no previendo los módulos de regulación de la temperatura Tmed y de la distribución de potencia AO en este caso ninguna acción sobre los grupos de control.

30 Se observa que, cuando AO está en su banda muerta y Tmed ha salido de la suya, el subconjunto de control Pi se desplaza mediante el módulo de regulación de Tmed en un sentido que permite llevar Tmed a la banda muerta.

35 A la inversa, cuando Tmed está en su banda muerta y AO ha salido de la suya, el módulo de regulación de la distribución de potencia ordena el desplazamiento o bien del subconjunto Pi o bien del subconjunto pesado H, en función del signo de la desviación de temperatura. Por ejemplo, si $\Delta AO > L_2$ y ΔT_{med} positivo, con $\Delta AO = AO_e - AO_c$ y $\Delta T_{med} = T_{mede} - T_{medc}$, el subconjunto H se desplaza hacia abajo. Esto tiene como efecto llevar la distribución axial de potencia hacia la consigna y también reducir Tmed, de tal manera que ΔT_{med} se vuelve negativa. Se encuentra entonces en la situación en la que $\Delta AO > L_2$ y ΔT_{med} negativa. El módulo de regulación de la distribución de potencia desplaza entonces el subconjunto Pi hacia arriba, tal como se muestra en la figura 5A, lo que compensa el desplazamiento del subconjunto H hacia abajo con respecto al control de la temperatura. La situación es la misma cuando ΔAO es negativa (véase la línea más baja de la figura 4 y la figura 5B).

40 En cambio, cuando AO y Tmed se salen de sus bandas muertas respectivas al mismo tiempo, la estrategia de control de AO es diferente. El subconjunto Pi se desplaza en función del signo de la desviación de temperatura ΔT_{med} mediante el módulo de regulación de la temperatura. El subconjunto pesado H se desplaza mediante el módulo de regulación de la distribución de potencia de manera que se lleva AO hacia su valor de consigna, pero ese desplazamiento se inhibe si va en el sentido de un aumento de la desviación de Tmed con respecto a la consigna. Así, cuando $\Delta AO > L_2$ y $\Delta T_{med} < -L_1$, el subconjunto Pi se desplaza hacia arriba para aumentar Tmed. El subconjunto pesado H debería desplazarse hacia abajo para llevar AO hacia su consigna, pero este desplazamiento se inhibe ya que conduciría a una reducción de Tmed y por tanto alejaría la temperatura de su consigna. Por tanto, el subconjunto pesado H no se desplaza en este caso. El desplazamiento del subconjunto pesado H también se inhibe cuando $\Delta AO < -L_2$ y $\Delta T_{med} > L_1$. En cambio, el desplazamiento del subconjunto pesado H no se inhibe en los demás casos, es decir cuando $\Delta AO < -L_2$ y $\Delta T_{med} < -L_1$ (figura 5C), y $\Delta AO > L_2$ y $\Delta T_{med} > L_1$ (figura 5D).

El módulo 53 de regulación de la capacidad de aumento de potencia del reactor Pmax se descompone en:

- 55 - una subetapa de cálculo de la concentración en boro [B] en el líquido primario en función de la consigna \hat{P}_{maxc} y del valor efectivo \hat{P}_{maxe} del parámetro representativo de Pmax, y
- 60 - una subetapa de ajuste de la concentración en boro [B] en el líquido de refrigeración primario a la concentración calculada con vistas a regular el parámetro \hat{P}_{max} al valor de consigna \hat{P}_{maxc} .

En efecto, cuando \hat{P}_{max} es inferior a una banda muerta centrada en el valor de consigna \hat{P}_{maxc} (grupos del subconjunto Pi demasiado poco insertados), el módulo de regulación de Pmax provoca una dilución del líquido primario mediante inyección de agua sin boro. La concentración en boro disminuye, lo que provoca un aumento de la reactividad en el núcleo, y por tanto un aumento de la temperatura del líquido primario Tmed. El módulo de control

de T_{med} desplaza entonces el subconjunto de control P_i hacia abajo para disminuir T_{med} , tal como se ha explicado anteriormente, de tal manera que \hat{P}_{max} , que corresponde al vector de las posiciones de inserción Z_i , vuelve a su banda muerta.

5 A la inversa, cuando \hat{P}_{max} es superior a su banda muerta (grupos del subconjunto P_i demasiado insertados), el módulo de regulación de P_{max} provoca una inyección de boro concentrado en el líquido primario. La reactividad del núcleo disminuye, lo que conlleva una disminución de T_{med} y provoca un desplazamiento del subconjunto de control P_i hacia arriba por medio del módulo de control de T_{med} .

10 En una variante de realización, con el fin de minimizar los efluentes, el módulo de regulación de P_{max} 53 se inhibe parcial o totalmente durante unos transitorios de potencia. Así, en el ejemplo de realización de las figuras 6A a 6C, el módulo 53 no interviene durante la fase de reducción de la potencia y durante la meseta baja mientras $\hat{P}_{max} > \hat{P}_{maxc}$.

15 Las figuras 6A a 6C ilustran una secuencia de funcionamiento del reactor en el que pasa de una potencia térmica primaria efectiva P_{pe} del 100% de la potencia nominal P_N (figura 6A) al 50% de la potencia nominal P_N (figura 6B), y después realiza una meseta al 50% de la potencia nominal P_N (figura 6C). La consigna P_{maxc} se fija al 70% de la potencia nominal P_N durante toda la secuencia.

20 Al 100% de la potencia nominal (figura 6A), todos los grupos están situados en la parte alta del núcleo. P_{max} vale en este caso el 100% de la potencia nominal, lo que es superior a la consigna P_{maxc} . El módulo de control de P_{max} no emprende ninguna acción.

25 Cuando el reactor llega al 50% de la potencia nominal (figura 6B), los grupos P_1 y P_2 , que constituyen el subconjunto P_i , se insertan en el núcleo. P_{max} vale entonces el 100% de la potencia nominal, ya que es posible llevar muy rápidamente el reactor a la potencia nominal elevando los grupos P_1 y P_2 a la posición alta. El módulo de control de P_{max} no emprende ninguna acción, ya que el valor efectivo de P_{max} es superior a la consigna P_{maxc} . El valor efectivo \hat{P}_{maxe} del parámetro \hat{P}_{max} corresponde entonces a unas posiciones Z_{ie} más insertadas que las consignas de posiciones Z_{ic} correspondientes a la consigna \hat{P}_{maxc} del parámetro \hat{P}_{max} .

30 Durante la meseta al 50% de la potencia nominal, se produce xenón en el interior de los lápices que constituyen los conjuntos de combustible bajo el efecto de las reacciones nucleares, lo que tiene el efecto de disminuir la reactividad del núcleo y disminuir la temperatura T_{med} . El módulo de control de T_{med} provoca entonces el desplazamiento del subconjunto de control P_i hacia arriba, de manera que se contrarrestan los efectos del xenón y se mantiene T_{med} constante. La potencia térmica producida por el núcleo también permanece constante. Debido a ello, la elevación del subconjunto P_i reduce P_{max} , puesto que ya no es posible volver al 100% de la potencia nominal llevando los grupos P_1 y P_2 a la posición alta.

35 Cuando el subconjunto P_i alcanza la consigna de posición Z_{ic} correspondiente a la consigna \hat{P}_{maxc} , el módulo de control de P_{max} provoca la dilución del líquido primario de manera que se detiene la elevación del subconjunto P_i bajo el efecto de la producción de xenón (figura 6C). La consigna de posición Z_{ic} y la consigna \hat{P}_{maxc} se calculan tal como se ha descrito anteriormente, en función de la consigna P_{maxc} (en este caso el 70% de la potencia nominal) y de la potencia primaria P_{pe} (en este caso el 50% de la potencia nominal).

45 La etapa de regulación 5 del procedimiento, cuando se emplea la segunda ley de control, se descompone en la parte derecha de la figura 2.

50 Tal como se ha precisado anteriormente, la segunda ley se utiliza cuando todos los grupos P_1 a P_5 están en la parte alta del reactor, es decir cuando el reactor funciona a una potencia próxima a la potencia nominal o bien durante un funcionamiento a potencia parcial con racimos extraídos. Como consecuencia, el subconjunto de control P_i sólo contiene el grupo P_1 y el subconjunto pesado H comprende los otros cuatro grupos. En este caso $\hat{P}_{max} = Z_1$. La consigna \hat{P}_{maxc} es de hecho una consigna de posición de P_1 , indicada Z_{1c} en los siguientes párrafos. Asimismo, el valor efectivo \hat{P}_{maxe} del parámetro \hat{P}_{max} es de hecho la posición efectiva Z_{1e} del grupo P_1 .

55 Tal como en el caso de la primera ley de control, la etapa de regulación comprende un módulo 54 de regulación de la temperatura T_{med} , un módulo 55 de regulación de la distribución axial de potencia AO y un módulo 56 de regulación de la capacidad de aumento de potencia P_{max} .

60 El módulo de regulación de T_{med} 54 comprende:

- una subetapa de cálculo del desplazamiento $dZ1$ que debe realizarse para el grupo de barras P1 (que forman el subconjunto de control Pi) y del desplazamiento dZh que debe realizarse para el subconjunto pesado H en función de la consigna $Tmedc$, del valor efectivo $Tmede$ de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo y de la consigna $Z1c$ y posición efectiva $Z1e$ del grupo P1, y

- una subetapa de modificación de las posiciones de inserción del grupo P1 y/o del subconjunto pesado H en función de los desplazamientos $dZ1$ y dZh calculados, con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo $Tmed$ a la consigna $Tmedc$.

El grupo P1 se desplaza con prioridad para regular $Tmed$, en los límites de una banda muerta centrada en la posición de consigna $Z1c$. El subconjunto pesado H se desplaza cuando el grupo P1 llega a los límites de la banda muerta.

Esta estrategia de control se desprende de la figura 7 que representa la lógica de movimiento de los grupos en función de la desviación $\Delta Tmed$ entre el valor efectivo de $Tmede$ y la consigna $Tmedc$ (eje de las abscisas) y en función de la desviación $\Delta Z1$ entre la posición efectiva $Z1e$ del grupo P1 y la consigna $Z1c$ (eje de las ordenadas), siendo $\Delta Tmed = Tmede - Tmedc$, y $\Delta Z1 = Z1e - Z1c$.

En la banda central de la tabla se lee que cuando P1 está en una banda muerta centrada en la consigna $Z1c$ y $\Delta Tmed < -L1$, el grupo P1 se desplaza hacia arriba. Cuando $\Delta Z1$ alcanza $L2$, el subconjunto pesado H se desplaza hacia arriba.

Asimismo, cuando P1 está en la banda muerta centrada en la consigna $Z1c$ y $\Delta Tmed > L1$, el grupo P1 se desplaza hacia abajo. Cuando $\Delta Z1$ alcanza $-L2$, el subconjunto pesado H se desplaza hacia abajo.

El módulo 55 de regulación de la distribución axial de potencia comprende

- una subetapa de cálculo de la concentración del compuesto absorbente [B] en función de la consigna AOc y del valor efectivo AOe de la distribución axial de potencia térmica, y
- una subetapa de ajuste de la concentración del compuesto absorbente [B] en el líquido de refrigeración primario a la concentración calculada con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica AO a la consigna AOc .

Más precisamente, cuando AO es superior a la consigna AOc , el módulo de regulación de AO controla una dilución del líquido de refrigeración primario mediante la inyección de agua sin boro. Esta dilución tiene el efecto de aumentar la reactividad del núcleo y por tanto la temperatura $Tmed$, lo que provoca la intervención del módulo de control de $Tmed$. Éste controlará entonces la inserción del grupo P1 y/o del grupo H, tal como se ha descrito anteriormente, lo que conlleva la disminución de la potencia térmica en la parte alta del reactor y por tanto la disminución de AO.

A la inversa, cuando AO es inferior a la consigna AOc , el módulo de regulación de AO controla una inyección de una disolución de boro concentrada en el líquido primario. Esta inyección tiene el efecto de disminuir la reactividad del núcleo y por tanto la temperatura $Tmed$, lo que provoca la retirada del grupo P1 y/o del grupo H, por medio del módulo de control de $Tmed$. La potencia térmica en la parte alta del reactor aumenta, lo que conlleva el aumento de AO.

El módulo 56 de regulación de $Pmax$ comprende:

- una subetapa de cálculo del desplazamiento $dZ1$ que debe realizarse para el grupo P1 (que constituye el subconjunto de control Pi) y del desplazamiento que debe realizarse dZh para el subconjunto pesado H, en función al menos de la consigna $Z1c$ y del valor efectivo $Z1e$ de la posición de inserción del grupo P1, y
- una subetapa de modificación de las posiciones de inserción del grupo P1 y/o del subconjunto pesado H en función de los desplazamientos $dZ1$ y dZh calculados, con vistas a mantener el o los grupos del subconjunto de control P1 en una banda muerta alrededor de la consigna de posición de inserción $Z1c$.

El control de $Tmed$ con la segunda ley de control hace que el grupo P1 permanezca en su banda muerta ya que, tal como se ha descrito anteriormente, H se desplaza cuando P1 llega al límite de su banda muerta. Por tanto, la regulación de $Pmax$ sólo se solicita en casos poco frecuentes. Esta regulación se detalla a continuación.

Se observa en la figura 7 que, cuando $Tmed$ está en su banda muerta y $Z1$ ha salido de la suya, el módulo de regulación de $Pmax$ ordena el desplazamiento o bien del grupo P1 o bien del subconjunto pesado H, en función del signo de la desviación de temperatura $\Delta Tmed$. Por ejemplo, si $\Delta Z1 > L2$ y $\Delta Tmed$ es positiva, el grupo P1 se desplaza hacia abajo. Esto tiene el efecto de llevar el grupo P1 hacia la consigna y también de reducir $Tmed$, de tal manera que $\Delta Tmed$ se vuelve negativa. El módulo de regulación de $Pmax$ desplaza entonces el subconjunto H hacia arriba,

lo que compensa el desplazamiento del subconjunto P1 hacia abajo con respecto al control de la temperatura y de la distribución axial de potencia (figura 8A). La situación es la misma cuando $\Delta Z1$ es negativa (véase la línea más baja de la figura 7 y la figura 8B).

5 Por tanto, cuando la temperatura media T_{med} está en su banda muerta alrededor de su consigna T_{mede} , el subconjunto de control P_i y el subconjunto pesado H se desplazan en el sentido inverso para mantener el subconjunto de control en su banda muerta alrededor de su posición de consigna Z_{ic} .

10 Se observará que se tiene en cuenta la desviación entre el valor efectivo T_{mede} y la consigna T_{medc} de la temperatura media en el cálculo de los desplazamientos de los subconjuntos P_i y H.

El procedimiento descrito anteriormente permite gestionar los transitorios de potencia. Durante un transitorio de potencia, la potencia solicitada a la turbina pasa progresivamente de un valor $V1$ a un valor $V2$.

15 En el caso en el que $V1 > V2$, la potencia térmica evacuada por el circuito secundario disminuye y, en un primer momento, se vuelve inferior a la potencia térmica proporcionada por el núcleo del reactor. Por tanto, la temperatura T_{med} del líquido primario aumenta, lo que provoca la intervención del módulo de control de T_{med} 51 ó 54, según el caso. Este módulo controla el desplazamiento de los grupos de barras de control P1 a P5 hacia abajo, lo que permite llevar la T_{med} a su consigna al tiempo que se mantiene la potencia térmica proporcionada por el núcleo hacia un nivel compatible con la potencia evacuada por el circuito secundario

20 El hecho de poner en práctica dos leyes de control diferentes una de la otra permite realizar un control eficaz y totalmente automático de tres parámetros de funcionamiento del reactor (temperatura del líquido primario T_{med} , distribución axial de potencia térmica AO, parámetro \hat{P}_{max} representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor P_{max}), independientemente de la consigna de potencia, y en particular hasta el 100% de la potencia nominal del reactor.

30 El hecho de elegir la ley de control en función de la posición de los grupos de barras de control permite utilizar dos leyes diferentes, una primera adaptada al caso en el que al menos un grupo está insertado en la parte baja del núcleo, y una segunda adaptada al caso en el que todos los grupos están en la parte alta del núcleo.

El modo particular de realización descrito anteriormente presenta además otras ventajas que se describirán a continuación. No obstante, se observará que las características asociadas son optativas.

35 En las dos leyes, el control de T_{med} se realiza repartiendo los grupos de control en un subconjunto de control y un subconjunto pesado, insertándose los grupos del subconjunto de control secuencialmente con vistas a controlar T_{med} .

40 También en las dos leyes, la consigna de P_{max} se traduce en una consigna de posición Z_{ic} para el subconjunto de control P_i , lo que permite un control automático de este parámetro.

45 En la primera ley, la distribución axial de potencia AO se controla a su consigna desplazando los grupos de barras P1 a P5. Cuando la temperatura T_{med} está en una banda muerta alrededor de su consigna T_{mede} , los subconjuntos P_i y H se desplazan en sentidos inversos. Por otro lado, el parámetro \hat{P}_{max} representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor P_{max} se controla a su consigna \hat{P}_{maxc} actuando sobre la concentración en boro en el líquido primario. Este procedimiento de control de AO sólo es eficaz si al menos un grupo está insertado en la parte baja del núcleo.

50 Como consecuencia, en la situación en la que todos los grupos están en la parte alta del núcleo, es decir cuando se utiliza la segunda ley, se invierten automáticamente los modos de control de la distribución axial de potencia AO y de la capacidad de aumento de potencia P_{max} . AO se controla a su consigna actuando sobre la concentración en boro. P_i permanece normalmente en su banda muerta ya que el subconjunto H se solicita cuando P_i llega al límite de su banda muerta. No obstante, si P_i se encuentra fuera de su banda muerta, el parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor se controla a su consigna desplazando los grupos de barras P1 a P5.

55 Cuando la temperatura T_{med} está en una banda muerta alrededor de su consigna T_{medc} , los subconjuntos P_i y H se desplazan en sentidos inversos. Por tanto, el control de AO es eficaz, incluso cuando el reactor está próximo a su potencia térmica nominal.

60 El procedimiento de control permite hacer funcionar el reactor en regulación de frecuencia, a potencia elevada, sin solicitar de manera excesiva los grupos de control P1 a P5 mediante unos desplazamientos demasiado frecuentes.

Se debe observar que el procedimiento de inserción secuencial de los grupos del subconjunto P_i , en el que se conserva una desviación de un seminúcleo entre las posiciones de dos grupos insertados sucesivamente, permite mantener al menos un grupo en la parte baja del núcleo para un intervalo muy grande de potencia del reactor.

Se ha descrito el procedimiento para un reactor cuyos racimos de control están repartidos en cinco grupos P1 a P5, pero también se aplica al control de un reactor cuyos racimos de control están repartidos en más o menos de cinco grupos.

- 5
- Asimismo, se ha descrito la segunda ley de control en el caso en el que el subconjunto de control sólo contiene un único grupo. No obstante, la segunda ley de control podría aplicarse al caso en el que el subconjunto de control contiene dos grupos o más.
- 10
- El parámetro \hat{P}_{max} representativo de la capacidad de aumento de potencia podría tener en cuenta no solamente las posiciones de inserción Z_i de los grupos del subconjunto P_i , sino también la posición de inserción Z_h del subconjunto pesado H, lo que constituiría una coordenada suplementaria del vector \hat{P}_{max} . La consigna \hat{P}_{maxc} , en ese caso, se establecería en la subetapa 13 "fijando" Z_h en su posición efectiva. Las consignas de posiciones Z_{ic} asociadas a la consigna \hat{P}_{maxc} dependerían por tanto de la posición efectiva Z_h del subconjunto pesado H.
- 15
- El procedimiento descrito anteriormente se pone en práctica mediante uno o varios ordenadores, que controlan unos medios automáticos de modificación de la concentración en boro y de desplazamiento de los grupos de barras.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de regulación de parámetros de funcionamiento del núcleo de un reactor nuclear con agua a presión, comprendiendo ese reactor nuclear (8):

- 5
- un núcleo (10) dividido en una zona alta y una zona baja y que produce una potencia térmica;
 - una pluralidad de grupos (P1 a P5) de barras de control (40) de la reactividad del núcleo (10), cada una susceptible de ocupar en el núcleo (10) una pluralidad de posiciones de inserción escalonadas verticalmente a partir de una posición alta;
 - 10
 - medios para insertar cada grupo de barras (P1 a P5) en el núcleo (10), verticalmente;
 - un circuito primario (30) adecuado para garantizar la circulación de un líquido de refrigeración primario a través del núcleo (10);
 - 15
 - unos medios para ajustar la concentración en al menos un compuesto absorbente neutrónico ([B]) en el líquido de refrigeración primario;
 - 20
 - unos medios para adquirir unas magnitudes (FH, FB, TBC, TBF, Q) representativas de las condiciones de funcionamiento del núcleo del reactor,

comprendiendo los parámetros de funcionamiento regulados al menos la temperatura media (Tmed) del líquido de refrigeración primario en el núcleo (10) y la distribución axial de potencia térmica (AO) entre las zonas alta y baja del núcleo (10),

- 25
- comprendiendo el procedimiento de regulación
- una etapa de evaluación de los valores efectivos (Tmede, AOe, \hat{P}_{maxe}) de los parámetros de funcionamiento al menos en función de las magnitudes adquiridas (FH, FB, TBC, TBF, Q);
 - 30
 - una etapa de selección de una ley de control de la concentración del compuesto absorbente ([B]) y de las posiciones de inserción (Z1 a Z5) de los grupos de barras (P1 a P5) elegida de entre al menos una primera y segunda leyes de control diferentes una de la otra; y
 - 35
 - una etapa de regulación de los parámetros de funcionamiento con ayuda de la ley de control seleccionada, en función de consignas (Tmedc, AOc, \hat{P}_{maxc}) relativas a dichos parámetros y de los valores efectivos (Tmede, AOe, \hat{P}_{maxe}) evaluados,

- 40
- caracterizado porque los parámetros de funcionamiento regulados comprenden un parámetro (\hat{P}_{max}) representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor (Pmax), correspondiendo la capacidad de aumento de potencia (Pmax) a la potencia térmica susceptible de ser producida por el núcleo (10) cuando los grupos de barras (P1 a P5) se levantan rápidamente en la proximidad de la posición alta, porque el procedimiento de regulación comprende una primera etapa de cálculo de valores de consigna (Tmedc, AOc, \hat{P}_{maxc}) de los parámetros de funcionamiento al menos en función de consignas de control (Pc, Pmaxc, AOc), porque, en la primera ley de control, el parámetro (\hat{P}_{max}) representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor (Pmax) se controla a su consigna (\hat{P}_{maxc}) ajustando la concentración del compuesto absorbente neutrónico ([B]) en el líquido de refrigeración primario, y en la segunda ley de control, dicho parámetro representativo (\hat{P}_{max}) se controla a su consigna (\hat{P}_{maxc}) desplazando los grupos de barras (P1 a P5), y porque, en la etapa de selección, se selecciona la primera ley cuando al menos un grupo de barras (P1) se encuentra en una posición de inserción (Z1) inferior a una posición predeterminada (Zref), y se selecciona la segunda ley en el caso contrario.
- 45
- 50

2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque, en la primera ley de control, la distribución axial de potencia (AO) se controla a su consigna (AOc) desplazando los grupos de barras (P1 a P5), y en la segunda ley de control, la distribución axial de potencia (AO) se controla a su consigna (AOc) ajustando la concentración del compuesto absorbente neutrónico ([B]) en el líquido de refrigeración primario.
- 55

3. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado porque la primera etapa comprende una subetapa de cálculo de la consigna de temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo (Tmedc) a partir de una magnitud (Pc) representativa de la potencia proporcionada a la red eléctrica alimentada por el reactor (8).
- 60

- 5 4. Procedimiento según la reivindicación 3, caracterizado porque la primera etapa comprende una subetapa de reparto de los grupos de barras (P1 a P5) en un subconjunto (Pi) de control de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo (Tmed) y un subconjunto pesado (H) que garantiza esencialmente el control de la distribución axial de potencia (AO), insertándose menos los grupos de barras del subconjunto pesado (H) que los del subconjunto (Pi).
5. Procedimiento según la reivindicación 4, caracterizado porque el subconjunto pesado (H) siempre está colocado en una mitad superior del núcleo.
- 10 6. Procedimiento según la reivindicación 4 ó 5, caracterizado porque el parámetro (\hat{P}_{max}) representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor (Pmax) se determina al menos a partir de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control (Pi), comprendiendo la primera etapa una subetapa de cálculo de una consigna (Zic) de posición del o de los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) en función de una consigna de capacidad de aumento de potencia (Pmaxc) y de magnitudes adquiridas (TBC, TBF, Q).
- 15 7. Procedimiento según la reivindicación 6, caracterizado porque la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende:
- 20 - una subetapa de cálculo de los desplazamientos (dZi) que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) en función de la consigna (Tmedc) y del valor efectivo (Tmede) de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo, y
- 25 - una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) en función de los desplazamientos (dZi) calculados con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo (Tmed) a la consigna (Tmedc).
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 6 y 7, caracterizado porque la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende
- 30 - una subetapa de cálculo de los desplazamientos (dZi) que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) y del desplazamiento (dZh) que debe realizarse para el subconjunto pesado (H) en función al menos de la consigna (AOc) y del valor efectivo (AOe) de la distribución axial de potencia térmica, y
- 35 - una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) y/o del subconjunto pesado (H) en función de los desplazamientos calculados (dZi, dZh) con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica (AO) a la consigna (AOc).
9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado porque, cuando la temperatura media del líquido de refrigeración (Tmed) está en una banda muerta alrededor de su consigna (Tmedc), el subconjunto de control (Pi) y el subconjunto pesado (H) se desplazan en sentidos inversos con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica (AO) a su consigna (AOc).
- 40 10. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 9, caracterizado porque la etapa de regulación con ayuda de la primera ley de control comprende
- 45 - una subetapa de cálculo de la concentración del compuesto absorbente ([B]) en función de la consigna (\hat{P}_{maxc}) y del valor efectivo (\hat{P}_{maxe}) del parámetro representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor, y
- 50 - una subetapa de ajuste de la concentración del compuesto absorbente ([B]) en el líquido de refrigeración primario a la concentración calculada con vistas a regular el parámetro (\hat{P}_{max}) representativo de la capacidad de aumento de potencia del reactor a su valor de consigna (\hat{P}_{maxc}).
- 55 11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 10, caracterizado porque la etapa de regulación con ayuda de la segunda ley de control comprende
- 60 - una subetapa de cálculo del o de los desplazamientos (dZi) que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) y del desplazamiento (dZh) que debe realizarse para el subconjunto pesado (H) en función de la consigna (Tmedc) y del valor efectivo (Tmede) de la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo y en función de la consigna (Z1c) y de la posición efectiva (Z1e) del grupo P1, y
- una subetapa de modificación de la o de las posiciones de inserción del o de los grupos del subconjunto de control (Pi) y/o del subconjunto pesado (H) en función de los desplazamientos (dZi, dZh) calculados, con vistas a regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo (Tmed) a la consigna (Tmedc).

- 5 12. Procedimiento según la reivindicación 11, caracterizado porque el subconjunto de control (Pi) se desplaza con prioridad para regular la temperatura media del líquido de refrigeración primario en el núcleo (Tmed), desplazándose el subconjunto pesado (H) cuando el subconjunto de control (Pi) llega a los límites de una banda muerta centrada en su consigna de posición (Zic).
13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 12, caracterizado porque la etapa de regulación con ayuda de la segunda ley control comprende
- 10 - una subetapa de cálculo de la concentración del compuesto absorbente ([B]) en función de la consigna (AOc) y del valor efectivo (AOe) de la distribución axial de potencia térmica, y
- 15 - una subetapa de ajuste de la concentración del compuesto absorbente ([B]) en el líquido de refrigeración primario a la concentración calculada con vistas a regular la distribución axial de potencia térmica (AO) a la consigna (AOc).
14. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 6 a 13, caracterizado porque la etapa de regulación con ayuda de la segunda ley de control comprende:
- 20 - una subetapa de cálculo del o de los desplazamientos (dZi) que se deben realizar para el o los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) y del desplazamiento (dZh) que debe realizarse para el subconjunto pesado (H) en función al menos de la consigna (Zic) y del valor efectivo (Zie) de las posiciones de inserción del o de los grupos de barras del subconjunto de control (Pi), y
- 25 - una subetapa de modificación de las posiciones de inserción del o de los grupos del subconjunto de control (Pi) y/o del subconjunto pesado (H) en función de los desplazamientos (dZi, dZh) calculados, con vistas a mantener el o los grupos del subconjunto de control (Pi) en una banda muerta alrededor de la consigna de posición de inserción (Zic).
- 30 15. Procedimiento según la reivindicación 14, caracterizado porque, cuando la temperatura media del líquido de refrigeración (Tmed) está en una banda muerta alrededor de su consigna (Tmedc), el subconjunto de control (Pi) y el subconjunto pesado (H) se desplazan en sentidos inversos con vistas a mantener el o los grupos del subconjunto de control (Pi) en dicha banda muerta alrededor de su consigna de posición de inserción (Zic).
- 35 16. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 4 a 15, caracterizado porque los grupos de barras del subconjunto de control (Pi) se insertan o se extraen secuencialmente cuando la potencia térmica producida por el núcleo varía, presentando dos grupos insertados o extraídos sucesivamente unas posiciones de inserción respectivas separadas entre sí por una desviación constantemente inferior a un límite predeterminado.
- 40 17. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el procedimiento de regulación es automático.

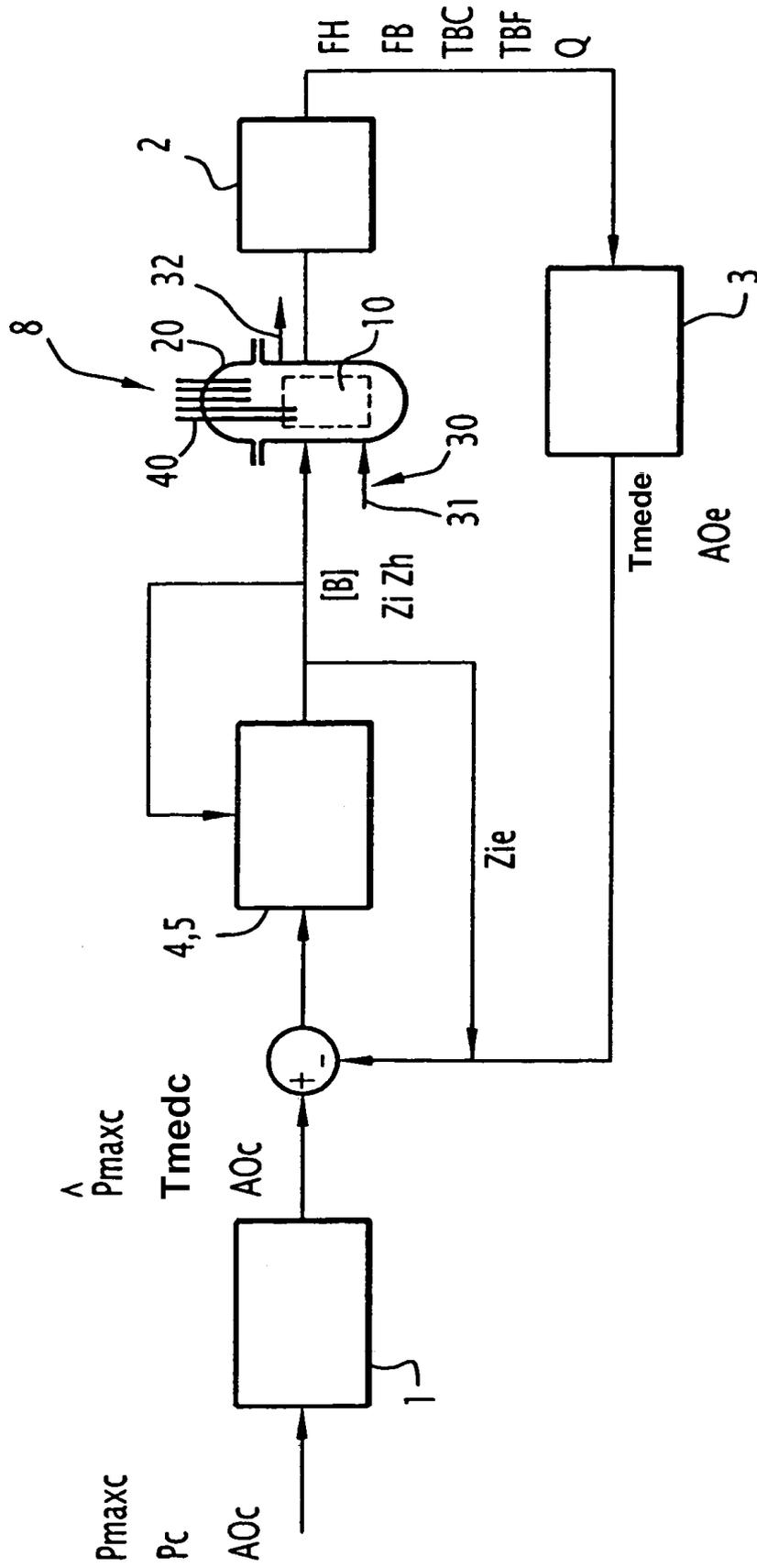


FIG.1

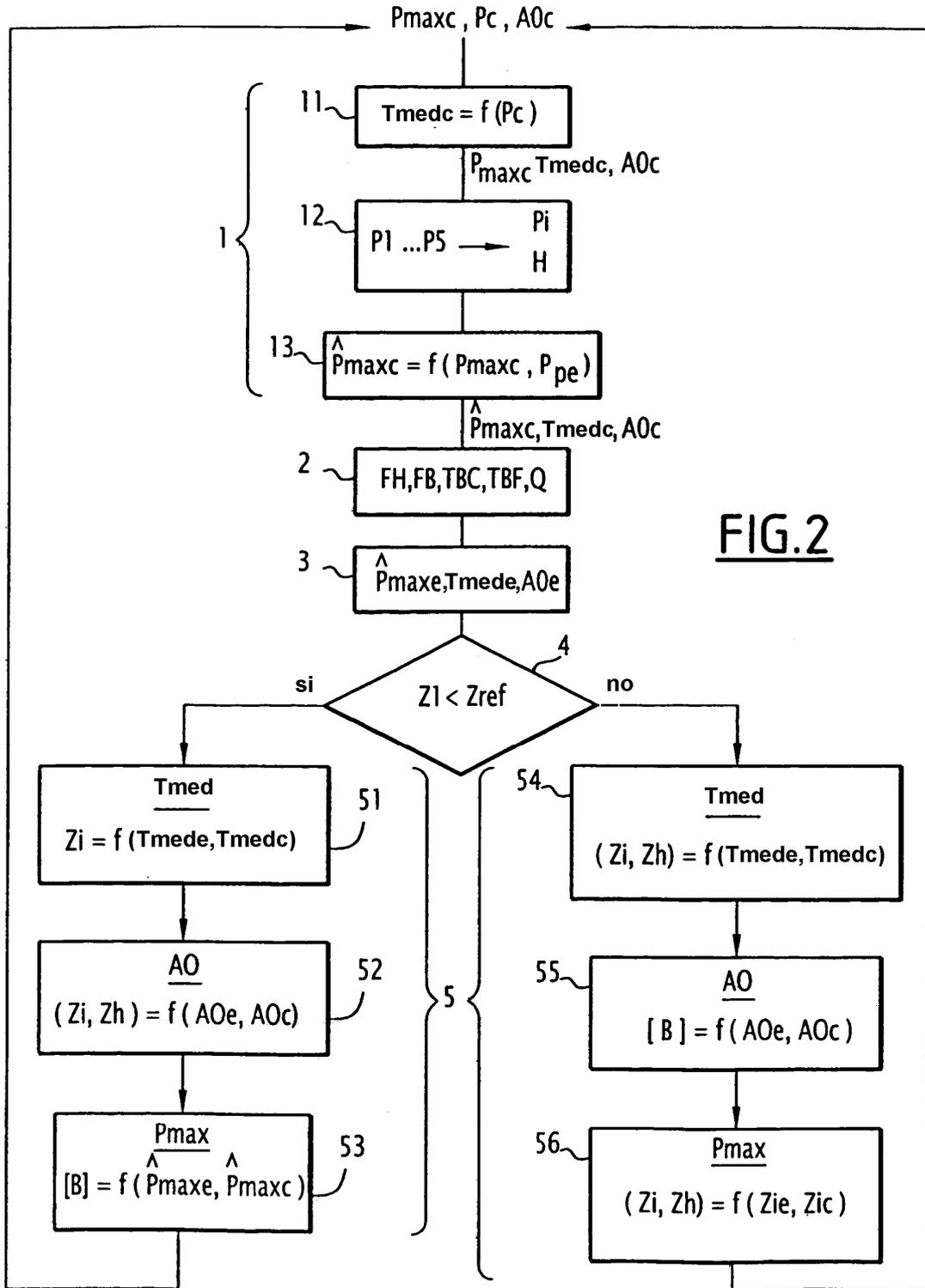


FIG. 2

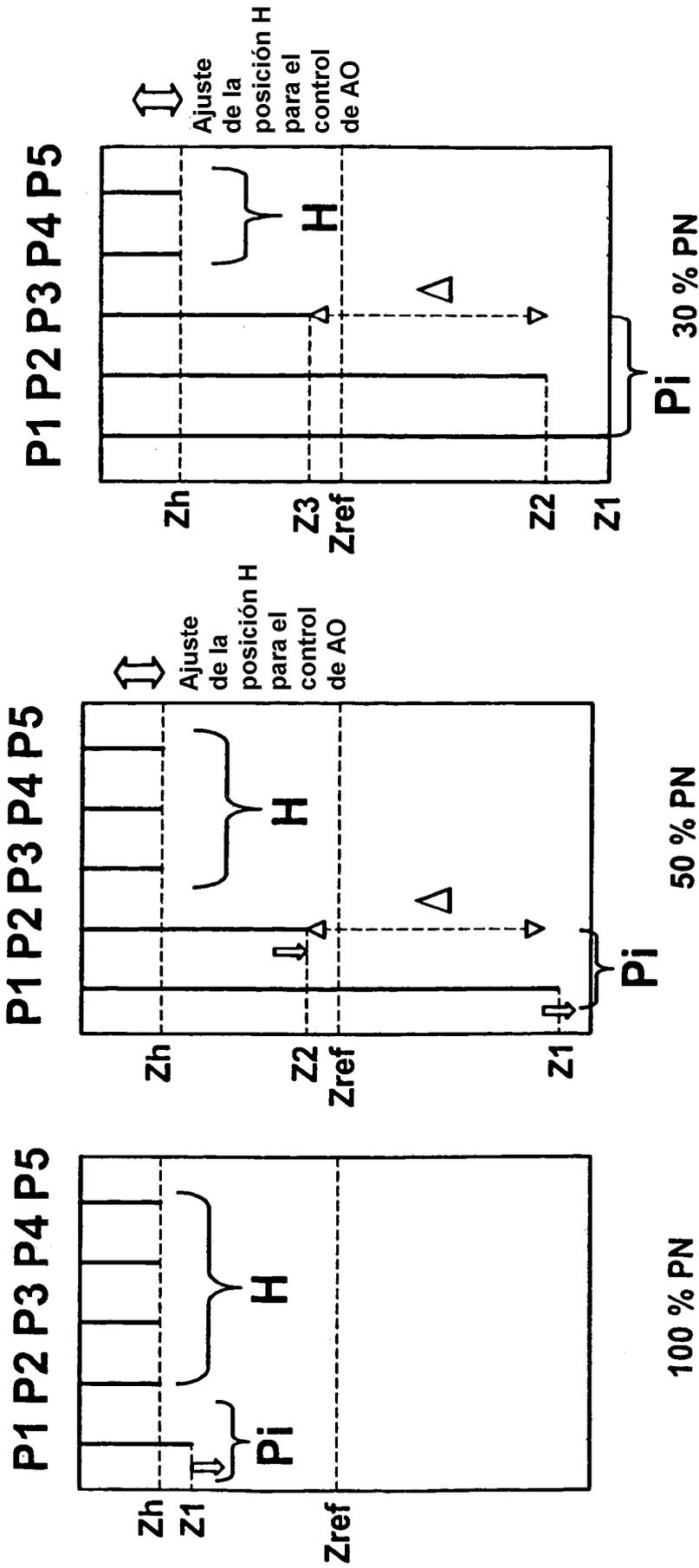


FIG. 3C

FIG. 3B

FIG. 3A

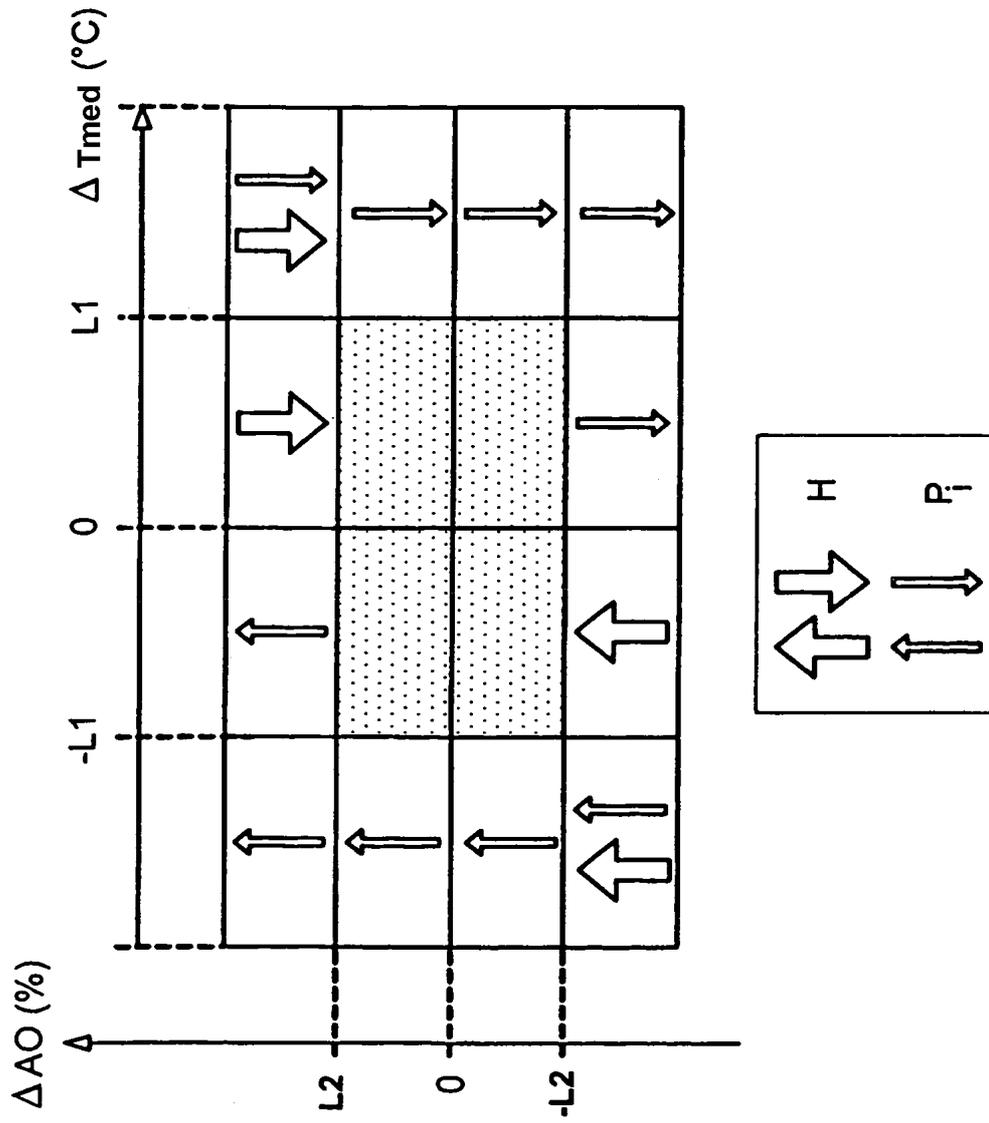


FIG.4

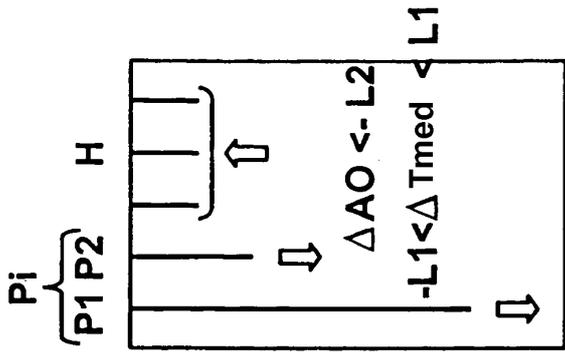


FIG. 5B

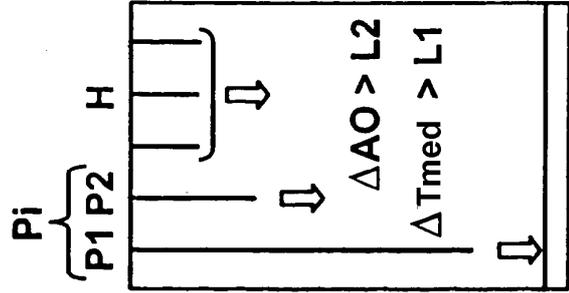


FIG. 5D

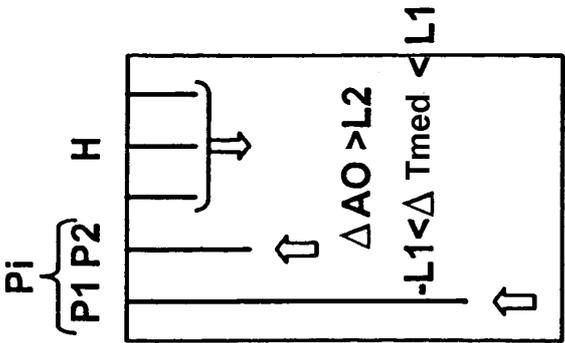


FIG. 5A

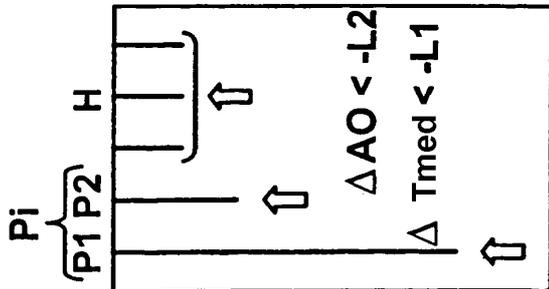


FIG. 5C

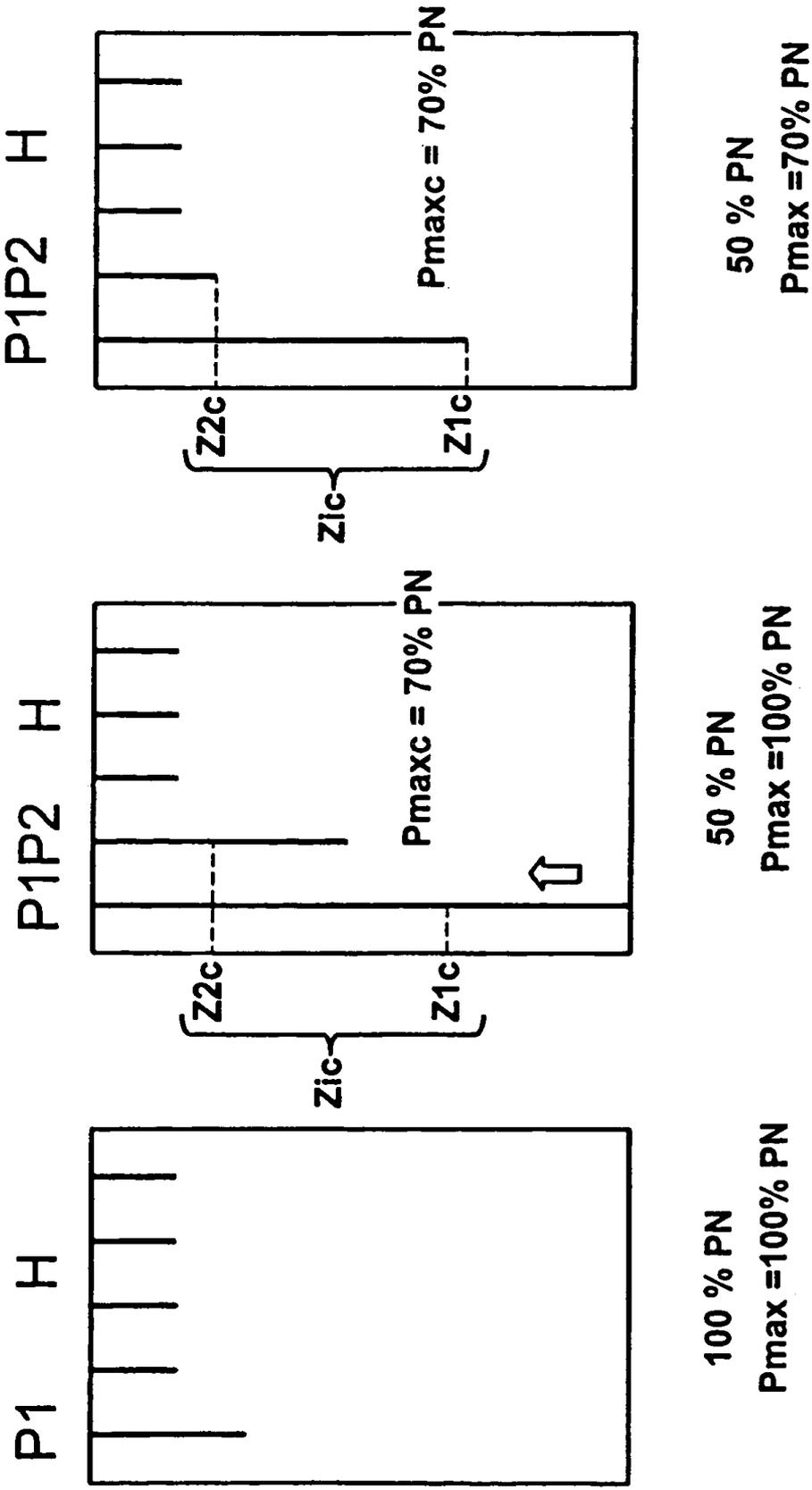


FIG.6A

FIG.6B

FIG.6C

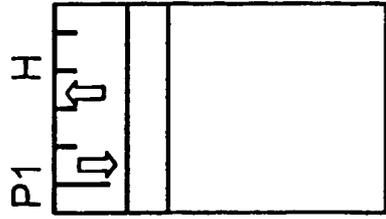


FIG.8A

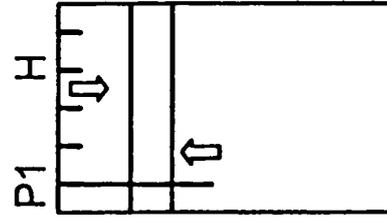


FIG.8B

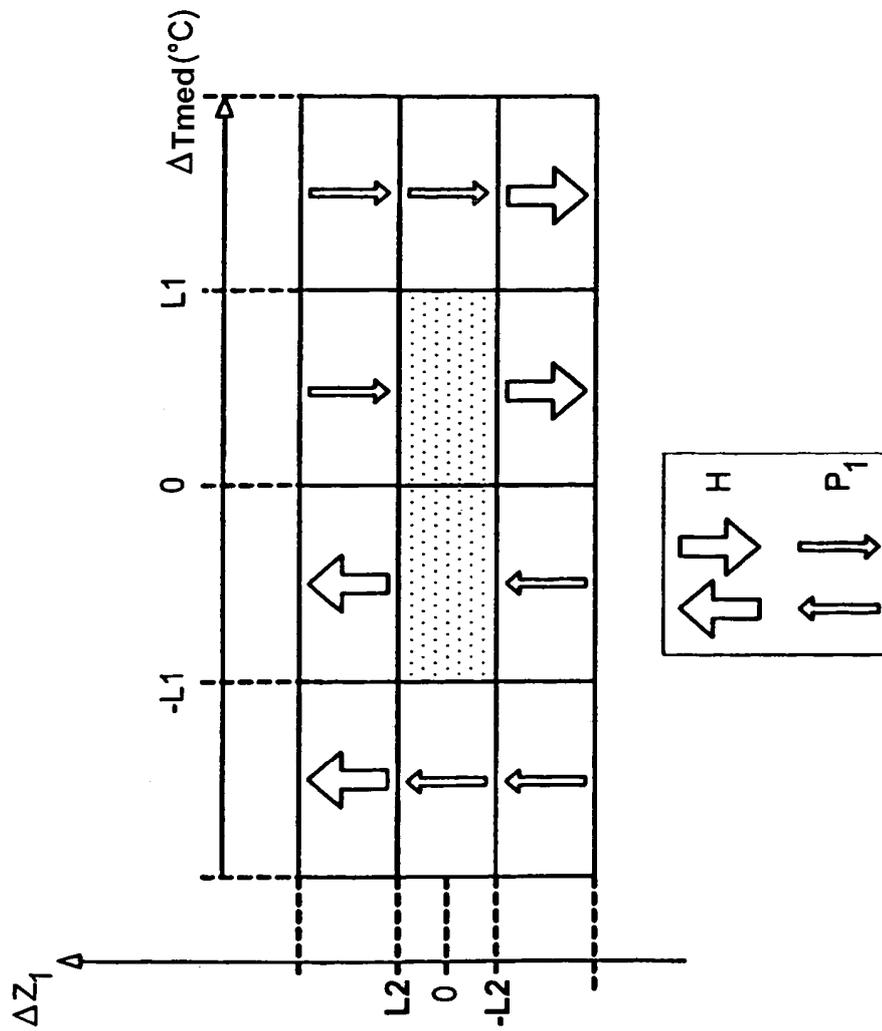


FIG.7