

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 977 820**

51 Int. Cl.:

**G21D 3/00** (2006.01)

**G21D 3/10** (2006.01)

**G21C 7/04** (2006.01)

**G21C 7/08** (2006.01)

**G21C 17/108** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.12.2019 PCT/EP2019/084945**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.06.2021 WO21115605**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.12.2019 E 19831616 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.03.2024 EP 4073821**

54 Título: **Procedimiento de control de una central nuclear y controlador**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**30.08.2024**

73 Titular/es:  
**FRAMATOME GMBH (100.0%)  
Paul-Gossen-Strasse 100  
91052 Erlangen, DE**

72 Inventor/es:  
**KUHN, ANDREAS;  
HORNUNG, KLAUS-PETER;  
HEIKE, DREVES y  
PETRASCH, ANDREAS**

74 Agente/Representante:  
**PONTI & PARTNERS, S.L.P.**

ES 2 977 820 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 control de una central nuclear y controlador

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un procedimiento para controlar una central nuclear que comprende un reactor de agua a presión.
- [0002]** Es más, la presente invención se refiere a un controlador para una central nuclear.
- 10 **[0003]** La red eléctrica se alimenta con energía eléctrica generada de múltiples tipos de fuentes de energía. En particular, las fuentes de energía renovables, por ejemplo, la energía eólica y solar, son bastante volátiles. Por lo tanto, también las centrales nucleares deben participar cada vez más en la regulación de la red para estabilizarla. La regulación de la red eléctrica se realiza mediante varios modos de regulación de la red, a saber, el control primario que proporciona un cambio de energía inmediato en cuestión de segundos para soportar la frecuencia de la red, un control secundario o una operación de seguimiento de carga, donde se ordena de forma remota una solicitud de energía adicional o menor, donde el cambio de energía eléctrica debe proporcionarse a más tardar en 15 minutos. El modo de control terciario proporciona una modificación de la energía a mediano y largo plazo.
- 15 **[0004]** En la actualidad, el uso de centrales nucleares para los diferentes modos de regulación es bastante complicado. Por ejemplo, el operador de la planta nuclear estima la reactividad del Xenón en función de la experiencia previa.
- [0005]** El documento EP 0 540 951 A1 describe un procedimiento y un aparato para controlar un reactor nuclear para minimizar la concentración de boro durante la operación de seguimiento de carga. Con respecto a esto, el enfoque principal se pone en el control de la distribución de energía axial y la oscilación axial de Xenón correspondiente durante la operación de seguimiento de carga en combinación con el objetivo de minimizar las inyecciones de ácido bórico y agua desionizada.
- 25 **[0006]** El documento DE 10 2017 205 553 A1 describe un procedimiento para predecir la concentración de Xenón durante el período de aumento de una central nuclear en una operación de seguimiento de carga.
- [0007]** El documento EP 2 686 851 B1 describe un procedimiento para hacer funcionar un reactor de agua a presión durante la operación de seguimiento de carga.
- 35 **[0008]** El documento EP 2 157 582 A1 describe un procedimiento para predecir la vibración del Xenón. Para ese propósito, la distribución axial de la energía del reactor se determina con el fin de suprimir rápidamente la oscilación del Xenón.
- [0009]** En vista de lo anterior, el objeto de la invención es proporcionar un procedimiento mejorado para controlar un reactor nuclear, que pueda funcionar en muchos modos de control de red diferentes con una alta fiabilidad.
- 40 **[0010]** Según un aspecto, se proporciona un procedimiento para controlar una central nuclear c según la reivindicación 1.
- 45 **[0011]** Otras realizaciones pueden referirse a una o más de las siguientes características, que pueden combinarse en cualquier combinación técnica factible:
- el cálculo del punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía se basa además en uno o más valores de reactividad y/o coeficientes de reactividad del reactor nuclear, en particular uno o más coeficientes de reactividad de una o más barras de control, un coeficiente de reactividad de una o más barras L, un cambio de reactividad debido a la diferencia de la Temperatura Media del Refrigerante (ACT - *Average Coolant Temperature*) entre la energía real y la energía diana, un cambio de reactividad debido a la diferencia entre la energía real y la energía diana, y/o la contribución de reactividad de un flujo de seguimiento de ácido bórico o agua desionizada inyectada en combinación con el coeficiente de ácido bórico en el fluido de enfriamiento primario;
  - 50 - el cálculo del punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía se basa además en el punto de ajuste de energía máxima de las barras de control y/o el punto de ajuste de energía máxima de las barras L;
  - en caso de que las barras de control alcancen un límite de control superior o una posición de carga completa al salir del núcleo del reactor, agregar algo de agua desionizada para mantener el reactor a una energía parcial para compensar la pérdida de reactividad debido al aumento de la concentración de Xenón, en particular para garantizar la controlabilidad de la energía del reactor;
  - 60 - el procedimiento comprende además determinar un límite de tiempo para que una o más barras de control se muevan al punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía en función de la posición real de las barras de control, el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía y la concentración real de ácido bórico en el fluido de enfriamiento primario, para mover una o más barras de control hacia el núcleo del

reactor al punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía antes del límite de tiempo determinado mediante la inyección de agua desionizada en el circuito primario, y agregar agua desionizada al circuito primario;

- 5 - el límite de tiempo se determina adicionalmente en función de la velocidad mínima de alimentación del agua desionizada;
- cuando el período de espera es más corto que un segundo tiempo predeterminado, siendo el segundo tiempo predeterminado más largo que el primer tiempo predeterminado, donde una o más barras de control (16) se mueven, después de que la concentración de Xenón haya alcanzado su máximo durante el período de espera, hacia el núcleo del reactor para compensar el aumento de reactividad debido a la disminución de la concentración de Xenón.
- 10 - cuando el período de espera es más corto que un segundo tiempo predeterminado, siendo el segundo tiempo predeterminado más largo que el primer tiempo predeterminado, el procedimiento comprende además, cuando durante el movimiento hacia el núcleo del reactor, las barras de control alcanzan el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía, agregar ácido bórico al circuito primario y mantener las barras de control en el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía, en particular para garantizar la reactividad de apagado;
- 15 - cuando el período de espera es más largo que un segundo tiempo predeterminado, siendo el segundo tiempo predeterminado más largo que el primer tiempo predeterminado, el procedimiento comprende además, después de que la concentración de Xenón haya alcanzado su máximo durante el período de espera, agregar ácido bórico al circuito primario para compensar el aumento de reactividad debido a la disminución de la concentración de Xenón,
- 20 donde, en particular, las barras de control permanecen en el límite de control superior o en la posición de máxima energía hasta el movimiento de una o más barras de control (16) hacia el núcleo del reactor hasta el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía antes del final del período de espera;
- el primer tiempo predeterminado corresponde a un tiempo de 2h después del máximo de Xenón o el 30 % del tiempo de espera hasta el máximo de Xenón después del máximo de Xenón;
- 25 - el primer tiempo predeterminado está entre 6h y 10h y/o el segundo tiempo predeterminado está entre 20h y 60h; y/o
- se calcula una reactividad total que incluye la reactividad de Xenón para el final del período de espera y el final del período de aumento para aumentar la energía a la energía diana para calcular el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía.

30 **[0012]** Según otro aspecto, se proporciona un controlador según la reivindicación 13.

**[0013]** Otras ventajas, características, aspectos y detalles son evidentes a partir de las reivindicaciones dependientes, la descripción y los dibujos.

35 **[0014]** Para que la manera en que las características citadas de la presente invención se puedan entender en detalle, una descripción más particular de la invención, brevemente resumida anteriormente, puede leerse por referencia a las realizaciones. Cabe señalar, sin embargo, que los dibujos adjuntos ilustran solo realizaciones típicas de esta invención y, por lo tanto, no deben considerarse como limitativos de su alcance, ya que la invención puede admitir otras realizaciones igualmente efectivas.

40

**[0015]** Los dibujos adjuntos se relacionan con realizaciones de la invención y se describen a continuación:

La Figura 1 muestra esquemáticamente un diagrama de flujo de un procedimiento según una realización;

La Figura 2 muestra gráficamente la reactividad del Xenón en función de aumentos de energía del reactor,

45 La Figura 3 muestra esquemáticamente el control del cálculo de la reactividad del Xenón durante el periodo de espera y el periodo de aumento,

La Figura 4 muestra esquemáticamente el modelo para determinar los valores reales de Yodo y Xenón,

La Figura 5 muestra esquemáticamente el modelo para predecir la concentración de Xenón,

50 La Figura 6 muestra una gráfica con la concentración de Xenón y las barras de control o la posición de las barras D, el suministro de ácido bórico, el suministro de agua desionizada y la energía del reactor a lo largo del tiempo durante un primer período de espera, que es inferior a 8 horas correspondiente al máximo de Xenón y la o las posiciones de las barras D permanecen sustancialmente a un valor que es necesario para el siguiente aumento en comparación con la operación en el modo secundario.

55 La Figura 7 muestra una gráfica con la concentración de Xenón y las barras de control o la posición de las barras D, el suministro de ácido bórico, el suministro de agua desionizada y la energía del reactor a lo largo del tiempo durante un segundo período de espera, que está entre 8 horas y aproximadamente 30 horas con inyección minimizada de ácido bórico y agua desionizada mediante el uso de las barras de control para la compensación de Xenón.

60 La Figura 8 muestra una gráfica con la concentración de Xenón y la posición de las barras D, el suministro de ácido bórico, el suministro de agua desionizada y la energía del reactor a lo largo del tiempo durante un tercer período de espera, que es más largo que aproximadamente 30 horas con una posición de las barras de control para una operación de plena energía para una Operación de Baja Energía Extendida (ELPO - *Extended Low Power Operation*) utilizando Xenón para extraer las barras D y el agua desionizada a través del equilibrio de reactividad automática para devolverlas a la posición necesaria para la aumento al final del tiempo de espera ajustado.

La Figura 9 muestra una gráfica que detalla el error de predicción de la concentración de Xenón en función de un ajuste de la predicción de Xenón con 200 etapas de cálculo, y

La Figura 10 muestra la visualización de la gestión de la reactividad con el fin de aumentar la energía del reactor nuclear en un sistema informático de procedimiento para el operador del reactor.

5

**[0016]** La Figura 1 muestra esquemáticamente un diagrama de flujo de un procedimiento según una realización para un reactor nuclear de agua a presión. El reactor nuclear 3 incluye una vasija a presión del reactor que incluye barras de combustible en un núcleo del reactor. El reactor nuclear 3, en particular la vasija a presión del reactor, está conectada a uno o más circuitos de fluido de enfriamiento primario 5 o circuitos primarios 5, donde el fluido de enfriamiento es impulsado por una bomba de refrigerante principal 7. El uno o más circuitos primarios 5 transportan con el fluido de enfriamiento el calor generado por la fisión nuclear del combustible nuclear en las barras de combustible a uno o más intercambiadores de calor 9. La presión en el uno o más circuitos primarios 5 es tan alta que impide la evaporación del agua o del fluido de enfriamiento que circula en el circuito primario.

10

**[0017]** El uno o más intercambiadores de calor o generadores de vapor 9 generan vapor, por ejemplo, a partir de agua o un fluido de enfriamiento secundario que circula en uno o más circuitos secundarios. A continuación, el vapor se transporta a través del uno o más circuitos secundarios 11 a una o más turbinas de vapor, donde el vapor generado a partir del fluido de enfriamiento secundario se expande y genera una rotación que es utilizada por una o más máquinas eléctricas para generar energía eléctrica. El fluido de enfriamiento secundario se condensa y se devuelve al intercambiador de calor 9.

15

**[0018]** El reactor nuclear 3 incluye una pluralidad de barras que están adaptadas para ser accionadas entre las barras de combustible para controlar la energía generada por el reactor nuclear 3. Por ejemplo, el reactor nuclear incluye las denominadas barras L 14 y las barras D 16. Las barras L 14 se proporcionan principalmente para controlar la densidad de energía local dentro del núcleo del reactor o la distribución de energía axial. Las barras D o barras de control 16 se proporcionan para controlar la energía absoluta del núcleo del reactor. Las barras de control 16 absorben neutrones y, dependiendo de la profundidad de inserción, se puede controlar la producción de energía del reactor nuclear, por ejemplo, debido a la influencia del flujo de neutrones dentro del reactor. Por lo tanto, mediante el uso de las barras de control 16, la energía del reactor nuclear 3 se puede adaptar rápidamente. Las barras de control 16 están organizadas en conjuntos (o bancos) de barras de control 16. Por ejemplo, un reactor nuclear 3 puede incluir una pluralidad de conjuntos de barras de control 16, cada uno de los cuales incluye entre 3 y 8 barras de control 16.

25

30

**[0019]** Es posible un movimiento de las barras de control 16 o conjunto de barras D entre la posición de las barras L, en particular el extremo libre de las barras L 14, por ejemplo, donde el extremo libre de las barras de control 16 corresponde al extremo libre de las barras L 14, y la posición final completamente insertada o posición final inferior para las barras de control 16. El extremo libre de las barras L 14 y las barras de control 16 corresponde al extremo inferior, si las barras se insertan desde la parte superior del reactor nuclear 3. En una realización, la posición final completamente insertada de los extremos de las barras de control 16 es casi la parte inferior del núcleo del reactor nuclear 3. Por ejemplo, la posición final inferior es de aproximadamente 300 cm de inserción de las barras de control 16. La profundidad de inserción de las barras de control 16 y las barras L 14 se determina en función del extremo libre que se extiende hacia el núcleo del reactor. En el presente ejemplo, se considera que las barras de control 16 y las barras L 14 se insertan desde la parte superior en el reactor nuclear 3. Otros tipos de reactores nucleares pueden tener barras de control 16 y barras L 14 que se insertan desde la parte inferior. A continuación, la posición final completamente insertada es una posición final superior para las barras de control 16.

35

40

45

**[0020]** Por ejemplo, un PWR (*pressurized water reactor* - reactor de agua a presión) típico con diseño alemán con aproximadamente 1500 MW de energía eléctrica tiene 4 conjuntos móviles (o bancos) de barras de control 16 con 4 barras de control cada uno para controlar la energía del reactor. Dicho reactor puede tener un conjunto de barras L con aproximadamente 45 barras L.

50

**[0021]** Para monitorear y controlar el reactor nuclear 3 se proporciona una pluralidad de detectores para la detección continua de la densidad de flujo de neutrones, donde según una realización se proporcionan ocho veces seis detectores en una denominada lanza SPND (*self powered neutron detector* - detector de neutrones autoalimentado) 18.

55

**[0022]** Cómo controlar la distribución de energía axial y la oscilación de Xenón axial correspondiente con las barras L, es, de acuerdo con las realizaciones, parte de un control de reactor estándar 58, ya que se utiliza con el "control de distribución de energía adaptativo" en PWR con diseño alemán. Este "control de distribución de energía adaptativo" se activa mediante un módulo de "cálculo axial de 2 puntos de Xenón" (un punto para la mitad superior y el otro punto para la mitad inferior del núcleo; la entrada viene dada por las lanzas SPND 18). La dinámica del "control de distribución de energía adaptativo" se adapta de tal manera que el cambio de posición de las barras L necesario se realiza en paralelo al cambio de carga. Por lo tanto, este control de distribución de energía adaptativo no necesita sustancialmente inyecciones de ácido bórico y agua desionizada para compensar el cambio de la posición de las barras L que se usa para controlar la distribución de energía PD (*Power Distribution*) axial a carga parcial. En otras

60

palabras, los cambios de posición de las barras L para controlar la distribución de energía axial se compensan, con respecto a la reactividad, por el efecto de reactividad debido al cambio de la energía del reactor.

5 **[0023]** De acuerdo con realizaciones, los conjuntos de barras de control 16 pueden insertarse uno después del otro. Los conjuntos de barras de control o las barras de control 16 tienen solo una ligera influencia en la distribución de energía axial. La energía del reactor nuclear se controla y, por lo tanto, el movimiento de las barras de control 16 depende de la medición de la temperatura media del refrigerante - ACT (*Average Coolant Temperature*).

10 **[0024]** La minimización de las inyecciones de BODE (*Boric acid and/Or DEionized water* - inyecciones de ácido bórico y/o agua desionizada) se realiza de acuerdo con la presente descripción y se proporciona mediante un control de reactividad completo, que se adapta a los diversos modos de control relacionados con la red.

15 **[0025]** Además, el reactor nuclear incluye sensores 20 para detectar la energía del reactor nuclear 3, por ejemplo, a través del flujo de neutrones.

20 **[0026]** De acuerdo con realizaciones, la energía del reactor nuclear 3 se controla a través de la energía regulada a nivel de generador. Las barras de control 16 y las barras L 14 se mueven luego para adaptar la energía del reactor nuclear 3 a la energía requerida por el generador. Cuando se adapta la energía del reactor nuclear 3, también se cambia la temperatura del fluido refrigerante primario. Una mayor energía da como resultado una mayor temperatura del fluido de refrigeración primario. La temperatura del fluido refrigerante también tiene un efecto sobre la reactividad del reactor nuclear 3.

25 **[0027]** La modificación a largo plazo de la reactividad, en particular debido al Xenón y al consumo de combustible, se controla modificando la concentración de ácido bórico y/o agua desionizada. Esta adición de uno de estos dos fluidos también podría denominarse adición o inyección de BODE en la presente descripción. El ácido bórico dentro del circuito primario 5 actúa como un absorbente de neutrones. De este modo, con una mayor concentración de ácido bórico, se reduce la energía o la reactividad. Para aumentar la reactividad, se añade agua desionizada al circuito primario 5 con el fin de reducir la concentración de ácido bórico y, por lo tanto, aumentar la reactividad. Hay bombas separadas 22, 23 para inyectar agua desionizada 24 y/o ácido bórico 26 en el circuito primario 5. La bomba 30 22 se proporciona para inyectar agua desionizada 24 y la bomba 23 se proporciona para inyectar ácido bórico 26 en el circuito primario 5. La cantidad de agua desionizada 24 y/o ácido bórico 26 se puede controlar usando las válvulas 28, 30 y/o las bombas 22, 23. Las bombas 22, 23 se operan solo en el caso de una inyección de BODE requerida.

35 **[0028]** El control de un reactor nuclear se complica debido a la compleja función dependiente del tiempo de la concentración de Xenón-135 (llamado Xenón o Xe a continuación) en el núcleo del reactor. El Xenón actúa como veneno de neutrones o absorbente de neutrones. Los valores de Xenón cambian en cuestión de horas. El Xenón se crea debido a la cadena de fisión del combustible nuclear y desaparece al absorber neutrones y por la desintegración del Xenón. Sin embargo, la creación y la absorción de neutrones aparece con un retardo de tiempo, de modo que para la energía real y futura del reactor nuclear, se deben tener en cuenta los valores reales, pasados y futuros del Xenón, 40 en particular para el control óptimo de la posición de las barras de control 16 a través de la concentración del ácido bórico (por inyección de BODE). Cuando una central nuclear funciona durante mucho tiempo a una energía constante, la concentración de Xenón alcanza un equilibrio o estado estacionario. La reactividad del Xenón es una función lineal de la concentración de Xenón.

45 **[0029]** La Figura 2 muestra dos ejemplos de un reactor nuclear que funciona durante un tiempo específico a una energía parcial.

50 **[0030]** En la Figura 2 (a), la energía  $P_R$  es primero del 100 % (es decir, la energía total del reactor nuclear) y luego se reduce al 30 % de la energía total. La energía parcial del 30 % de la energía total se mantiene durante aproximadamente 2 h antes de que la energía aumente, en el punto A, al 98 % de la energía total. Durante la energía parcial, la concentración de Xenón aumenta y, por lo tanto, también la reactividad del Xenón. En el punto B, el reactor nuclear alcanza la energía diana del 98 % de la energía total. Como se puede observar, la reactividad del Xenón, al aumentar, es decir, entre los puntos A y B, se reduce a medida que el reactor quema el Xenón-135, que comienza a absorber más neutrones y reduce la reactividad poco después del punto A. Como se puede observar a partir de la 55 Figura 2(a), la reducción de la reactividad del Xenón entre el punto A y el punto B debido a la quema del Xenón es de aproximadamente 100 pcm, lo que corresponde al movimiento de aproximadamente el 20% de una longitud de un conjunto de barras D o barras de control.

60 **[0031]** En la Figura 2(b), la energía  $P_R$  es primero del 100 % (es decir, la energía total del reactor nuclear) y luego se reduce al 30 % de la energía total. La energía parcial del 30 % de la energía total se mantiene durante aproximadamente 6 h antes de que la energía aumente, en el punto A, al 98 % de la energía total. En el punto B, el reactor nuclear alcanza la energía diana del 98 % de la energía total. Como se puede observar, la reactividad del Xenón, al aumentar, es decir, entre los puntos A y B, se reduce a medida que el reactor quema el Xenón-135, que comienza a absorber más neutrones y reduce la reactividad poco después del punto A. Como se puede observar a

partir de la Figura 2(b), la reducción de la reactividad del Xenón entre el punto A y el punto B debido a la quema del Xenón es de aproximadamente 500 pcm, lo que corresponde al movimiento de aproximadamente el 100 % de un conjunto de barras D o barras de control.

5 **[0032]** Por lo tanto, se puede observar que la concentración de Xenón y, por lo tanto, la reactividad basada en el Xenón depende en gran medida del período de espera y del funcionamiento previo del reactor nuclear 3.

**[0033]** Una central nuclear puede funcionar en varios modos de funcionamiento relacionados con las necesidades de la red eléctrica.

10

**[0034]** En un modo de control primario se proporciona energía inmediata en segundos para soportar la frecuencia de la red, donde la energía adicional se proporciona entre 0 y 15 minutos (normalmente en segundos) para estabilizar la frecuencia de la red. El control primario se deduce de la desviación de frecuencia de red a la frecuencia estándar.

15

**[0035]** En un modo de control secundario que proporciona la energía requerida de la planta de energía a más tardar después de 15 minutos. Esto también se denomina operación de seguimiento de carga. En el modo de control secundario, para el cual se ordena de forma remota una solicitud de energía adicional a través de la energía diana del generador, que se puede cambiar paso a paso. La energía eléctrica adicional debe proporcionarse a más tardar en 15 minutos. Solo el gradiente de energía máximo  $dPG/dt$  y el 'intervalo de energía se conocen de antemano. El tiempo de funcionamiento con energía parcial puede ser de varias horas. Los cambios de energía se solicitan de manera estocástica. En el control secundario, la energía diana  $P_R$  debe lograrse en cualquier momento, de modo que las barras de control 16 deben tener una posición específica predefinida o predeterminada.

20

25 **[0036]** El modo de control terciario proporciona una modificación de la energía a mediano y largo plazo. En el control terciario, la duración y la energía requerida se determinan entre el operador de la red y el operador del reactor.

**[0037]** El control primario se puede aplicar en paralelo al control secundario y al terciario.

30 **[0038]** En el control terciario, se llevará a cabo un aumento de energía después de un tiempo de espera según el acuerdo entre el operador del reactor y el operador de la red eléctrica. El aumento de energía depende de la energía real del reactor  $P_R$ , la energía diana  $P_R$  y el aumento de energía, también llamado gradiente de energía  $dPG/dt$ . Como se indicó anteriormente, la solicitud de energía es proporcionada por el control del generador al reactor nuclear. Por lo tanto, también el gradiente de energía  $dPG/dt$ , que debe proporcionarse a la red eléctrica, es proporcionado por el control del generador. En el modo de control terciario esto corresponde al valor que se utiliza y en el modo de control secundario esto corresponde al gradiente de energía máximo.

35

**[0039]** En la Figura 1, el diagrama de flujo incluye varios valores de entrada, en particular la energía real del reactor  $P_R$ , que se mide utilizando los sensores 20, la energía diana  $P_R$  32, que es proporcionada, por ejemplo, por el operador del reactor, el período de espera 34, por ejemplo, proporcionado por el operador del reactor, hasta el aumento de la energía a la energía diana  $P_R$  32, el control secundario de la red 36, que puede activarse o desactivarse, por ejemplo, mediante un botón 36, el control primario de la red 38, que puede activarse o desactivarse, por ejemplo, mediante un botón 38, los coeficientes de reactividad 40, que se determinan automáticamente, y un impacto del predictor del valor establecido de control 42 para activar o desactivar el ajuste del punto de ajuste de los conjuntos de barras de control en función de un equilibrio de reactividad total.

45

**[0040]** La energía real del reactor  $P_R$  también se puede determinar utilizando otros medios, por ejemplo, determinando la energía del generador eléctrico.

50 **[0041]** Los coeficientes de reactividad 40 se proporcionan mediante el cálculo del diseño del núcleo, que se realiza para cada ciclo del elemento combustible. Estos coeficientes son variables en el software del control del reactor y dependen de la concentración de boro de equilibrio del núcleo del reactor, que disminuye durante todo el ciclo del elemento combustible para compensar la quema de combustible. En otras palabras, los coeficientes de reactividad se calculan en función de la concentración de boro de equilibrio del núcleo del reactor. Estas variables se establecen a través de una unidad de servicio durante la interrupción del cambio del elemento de combustible, respectivamente. En otras palabras, se utiliza una curva característica para determinar cada coeficiente de reactividad en función de la concentración de boro de equilibrio del reactor nuclear 3. Los coeficientes de reactividad 40 cambian lentamente durante el ciclo del elemento combustible. La concentración de boro en equilibrio del núcleo del reactor es la concentración de ácido bórico que se utiliza durante una operación del reactor nuclear 3 a una energía constante o constante durante un largo período de tiempo, en particular cuando la concentración de Xenón alcanza un valor constante a plena energía. Una pluralidad de coeficientes de reactividad, que se utilizan, se explicará con la Figura 10 a continuación. Como los coeficientes de reactividad 40 cambian muy lentamente, pueden considerarse constantes para el cálculo del equilibrio de reactividad. En otras palabras, los coeficientes de reactividad son variables, que dependen de los "días de carga completa" en el ciclo real del elemento combustible (por ejemplo, 1 año) o un parámetro

60

relacionado (como concentración de boro de referencia en condiciones de equilibrio de carga completa) y se pueden establecer como una característica a través de una interfaz o unidad de servicio del control del reactor durante el cambio del elemento combustible de acuerdo con el diseño del núcleo del siguiente núcleo.

5 **[0042]** El diagrama de flujo de la Figura 1 incluye un módulo de cálculo del valor real 44 donde los valores de concentración real de Xenón y Yodo en el reactor nuclear 3, en particular en el núcleo del reactor nuclear 3, se calculan en función de la energía real y pasada  $P_R$  del reactor nuclear 3. El valor real de Xenón también se designa valor Xe en la Figura 1 y el valor real de Yodo se designa valor J. En otras realizaciones, como se muestra en la Figura 4, se proporciona la reactividad de Xenón  $\rho_{Xe}$  en lugar de la concentración de Xenón.

10

**[0043]** La Figura 4 muestra el cálculo de los valores de concentración real de Xenón y Yodo en función de la energía real y pasada  $P_R$  del reactor nuclear. El cálculo se adapta al tipo de reactor nuclear 3 y a la carga con combustible nuclear. El valor de entrada es la energía real  $P_R$  del reactor nuclear. Las casillas marcadas con  $\Gamma_{Xe}$ ,  $\lambda_j$ ,  $\lambda_{Xe}$ , BXE,  $A_j$ , AXE son funciones lineales que utilizan parámetros conocidos. Las casillas con una cruz son multiplicadores. El integrador 45a tiene en cuenta los valores pasados de la energía  $P_R$  del reactor nuclear 3 con respecto a la concentración de Yodo. En otras palabras, el integrador obtiene a través de la integración de la diferencia entre la producción de Yodo y la descomposición del Yodo el valor real de la concentración de Yodo. La descomposición del Xenón y la pérdida de Xenón debido a la absorción de neutrones se resta de la suma de la producción directa de Xenón y el Xenón de la descomposición del Yodo. El integrador 45b calcula a partir del gradiente de concentración de Xenón el valor real de la concentración de Xenón. En la realización mostrada en la Figura 4, usando  $\rho_{Xe}$ , el cálculo obtiene el valor de reactividad de Xenón real  $\rho_{Xe}$ . Por ejemplo, el valor de reactividad del xenón se proporciona en unidades porcentuales por mil.

15 **[0044]** El diagrama de flujo de la Figura 1 incluye además un módulo predictor 46. El módulo predictor realiza una predicción cíclica de la concentración de Xenón, y en particular Yodo, en el reactor nuclear 3, en particular el núcleo nuclear del reactor nuclear 3.

**[0045]** El módulo predictor 46 predice la concentración de Xenón para el periodo de espera, en particular para el final del periodo de espera restante y el final del periodo de aumento. Para ese propósito, el módulo predictor obtiene los valores reales de concentración de Xenón y Yodo del módulo de cálculo del valor real 44, el tiempo necesario para el aumento  $\Delta t_{\text{aumento}}$  y los valores establecidos para la energía del reactor  $P_R$  para el periodo de espera y el periodo de aumento de un módulo de control 48.

20 **[0046]** El módulo de control 48 proporciona todos los valores necesarios para la predicción de Xenón en función del valor de entrada de la energía diana  $P_R$ , si el reactor nuclear 3 debe funcionar en un modo de control secundario (obtenido del bloque 36), el periodo de espera restante y la energía real  $P_R$  del reactor nuclear 3.

**[0047]** El funcionamiento del módulo predictor 46 se explica con respecto a las Figuras 3 y 5. El módulo predictor 46 calcula de manera iterativa la concentración de Xenón y, por lo tanto, la reactividad del Xenón. En una realización, además, también se calculan los valores de concentración de Yodo. Las casillas marcadas con  $\Gamma_{Xe}$ ,  $\lambda_j$ ,  $\lambda_{Xe}$ , BXE,  $A_j$ , AXE son funciones lineales que utilizan parámetros conocidos. Las casillas con una cruz son multiplicadores. Para tener en cuenta la dependencia del tiempo de la concentración de Yodo, se utiliza el integrador 48a. En otras palabras, el integrador obtiene a través de la integración de la diferencia entre la producción de Yodo y la descomposición de Yodo el valor de concentración de Yodo. La descomposición del Xenón y la pérdida de Xenón debido a la absorción de neutrones se resta de la suma de la producción directa de Xenón y el Xenón de la descomposición del Yodo. El integrador 48B calcula a partir del gradiente de concentración de Xenón  $dXe/dt$  el valor de concentración real de reactividad de Xenón  $\rho_{Xe}$ . Para comenzar la predicción, el valor real de la concentración de Xenón y los valores reales de la concentración de Yodo se leen una vez al comienzo de la operación del predictor. La casilla 48c activa cada etapa de cálculo con incrementos de tiempo específicos, como se explicará a continuación. Usando  $\Gamma_{Xe}$ , el cálculo obtiene los valores de reactividad de Xenón predichos  $\rho_{Xe}$  para el final del periodo de espera o el final del aumento, como también se explicará a continuación. De acuerdo con las realizaciones, el final del periodo de espera corresponde al inicio del aumento de energía.

25 **[0048]** El periodo de espera (restante) y el periodo de aumento se dividen a efectos de cálculo en un número predefinido de etapas. Según un ejemplo, se utilizan entre 50 y 500 etapas, en particular entre 100 y 300. En la realización mostrada, 200 etapas se calculan respectivamente para el periodo de espera y el aumento. Esto significa que para el periodo de espera y el periodo de aumento, la distancia de tiempo  $\Delta T$  o  $\Delta t_{\text{incremento}}$  entre dos etapas de cálculo posteriores puede ser diferente, ya que, por ejemplo, el periodo de aumento puede ser sustancialmente más corto que el periodo de espera. Por ejemplo, como la concentración de Xenón y/o la reactividad del Xenón durante el periodo de espera, después de alcanzar su máximo, siempre tienden a alcanzar un estado de equilibrio, se puede usar un número fijo de etapas de cálculo a pesar de las duraciones del periodo de espera de, por ejemplo, 40 horas o 100 horas o más.

**[0049]** Si el periodo de espera es cero, por ejemplo, cuando el reactor nuclear 3 funciona en el modo

secundario, ver a continuación, solo se calcula la predicción para el periodo de aumento. A efectos de cálculo, el módulo predictor 46 almacena la concentración de Xenón predicha calculada, los valores de reactividad de Xenón y/o los valores de concentración de Yodo en una memoria respectiva. En un ejemplo, el valor de concentración de Xenón y/o la reactividad de Xenón  $p_{Xe}$  se almacena durante el final del periodo de espera (véase el punto A en la Figura 3) y después del periodo de aumento (véase el punto B) en la Figura 3.  $\Delta t_{\text{incremento}}$  en la Figura 5 corresponden a  $\Delta t_{\text{aumento}}$  y  $\Delta t_{\text{periodo de espera}}$  en la Figura 1.

5 [0050] Cabe señalar que la predicción para el periodo de espera solo se realiza, en caso de que el reactor nuclear funcione en el modo de control terciario y no en el modo de control secundario (o la operación de seguimiento de carga marcada con N-SR en los dibujos).  
10

[0051] La concentración real de Yodo y la concentración real de Xenón o los valores de reactividad se leen respectivamente para el comienzo del periodo de espera para el cálculo, si existe un periodo de espera, o para el comienzo del aumento (en caso de que no haya periodo de espera o cuando haya transcurrido el periodo de espera).  
15

[0052] Cabe señalar que el periodo de espera disminuye con el progreso del tiempo, es decir, el comienzo para el propósito del cálculo avanza cada vez que el módulo de predicción 46 comienza nuevamente con el cálculo completo de la concentración de Xenón, la reactividad de Xenón y/o los valores de concentración de Yodo.

20 [0053] Con base en el valor establecido de la energía del reactor  $P_R$  para el periodo de espera y el periodo de aumento, se almacena la reactividad del Xenón  $p_{Xe}$  o la concentración de Xenón en particular después del periodo de espera (punto A en las Figuras 3 y 5) y después del periodo de aumento (punto B en las Figuras 3 y 5).

[0054] La concentración de Xenón o la reactividad del Xenón  $p_{Xe}$  después del periodo de aumento (Punto B) y la concentración de Xenón o la reactividad del Xenón antes del periodo de aumento o el inicio de la aumento de energía (Punto A; ya sea al final del periodo de espera para el modo de control terciario o la concentración real de Xenón para el modo de control secundario) para determinar, por el predictor 46, el cambio de concentración de Xenón y/o el cambio de reactividad de Xenón  $Ap_{Xe}$  durante el periodo de aumento.  
25

30 [0055] De acuerdo con realizaciones, el módulo predictor 46 calcula también la concentración de Yodo para el periodo de espera y/o el periodo de aumento, en particular al final del periodo de espera.

[0056] El módulo de cálculo de valor real 44 y el módulo predictor 46 y el módulo de control 48 forman juntos un módulo en tándem 50 que se ejecuta automáticamente y en tiempo real en un sistema de control de reactor digital. Por ejemplo, cada módulo de cálculo del valor real 44 y el módulo predictor 46 calculan respectivamente los valores de reactividad y/o concentración de Xenón predichos cada 50 milisegundos. La nueva predicción del módulo predictor 46 se basa en los valores reales de concentración de Xenón y Yodo respectivamente actualizados. El tiempo para el cálculo de la reactividad del Xenón para cada uno, lo que significa que para el periodo de espera y para el periodo de aumento, se requiere respectivamente unos 10 segundos basados en 200 etapas de cálculo. Eso significa 20 segundos totalmente relacionados con el control terciario y solo 10 segundos relacionados con el control secundario estocástico, donde se desean resultados de cálculo más rápidos. La precisión de este procedimiento se analiza más adelante.  
35  
40

[0057] Los valores de predicción permiten calcular el soporte de la reactividad del Xenón  $p_{Xe}$  durante la fase de aumento. Cabe señalar que la reactividad del Xenón y/o la concentración de Xenón solo dependen de la energía y su cambio dependiente del tiempo del reactor nuclear. Esta predicción de reactividad o concentración de Xenón es solo una parte de un equilibrio de reactividad completo que se necesita para determinar la posición óptima de las barras de control 16 antes de la siguiente rampa.  
45

50 [0058] El cambio de reactividad de Xenón predicho  $\Delta p_{Xe}$  durante el aumento desde el módulo de predicción 46 se proporciona a un módulo de equilibrio de reactividad 52, que considera adicionalmente esa parte del equilibrio de reactividad total que se basa en los coeficientes de reactividad proporcionados por el módulo de coeficiente de reactividad 40. En detalle, también se consideran uno o más de los siguientes efectos de reactividad, además del Xenón, para calcular un punto de ajuste de las barras de control predeterminado para el inicio del aumento de energía o al comienzo del aumento de energía y/o el equilibrio de reactividad total. En particular, de acuerdo con la Figura 10, el equilibrio de reactividad se visualiza para un operador del reactor.  
55

[0059] El equilibrio de reactividad (total) está adaptado para determinar, en función de los valores de reactividad, la posición óptima de las barras de control 16, de modo que el reactor nuclear pueda alcanzar la energía diana de  $P_R$  en cualquier momento o después del periodo de espera utilizando las barras de control 16. Esta posición óptima de las barras de control también puede denominarse punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el inicio del aumento de energía en la presente solicitud.  
60

[0060] La posición de las barras de control puede proporcionarse entonces al ajuste del punto de ajuste

establecido de las barras de control 54. En la Figura 10, la energía diana  $P_R$  se establece en el 100 % de la carga completa, que es la energía máxima permitida del reactor nuclear 3. Para ese propósito, la reactividad total ( $\Sigma p$  en la Figura 10) teniendo en cuenta también el cambio de reactividad de Xenón predicho  $\Delta p_{Xe}$  durante el aumento debe ser en el caso óptimo cero.

5

**[0061]** La reactividad potencial  $p_D$  (posible aumento de la reactividad debido a la elevación de las barras D o barras de control 16 ( $\Delta D$ )). El potencial de reactividad se puede calcular en función de la efectividad  $\Gamma_{DM}$ , de las barras de control, que es un coeficiente de reactividad proporcionado por el módulo de coeficiente de reactividad 40, y su profundidad de inserción real ( $\Delta D$ ) por debajo del extremo inferior de las barras L; la efectividad  $\Gamma_{DM}$  se promedia con respecto a la eficiencia variable dependiendo de la profundidad de inserción. El potencial de reactividad  $p_D$  se calcula multiplicando la efectividad  $\Gamma_{DM}$  por la profundidad de inserción real ( $\Delta D$ ) y corresponde al potencial de reactividad elevando las barras de control o barras D hasta el extremo inferior de las barras L.

10

**[0062]** Las barras de control o barras D se elevarán hasta su punto de ajuste de energía máxima estacionaria (del reactor nuclear) (aquí aproximadamente 45 cm por debajo de las barras L como margen de control), que se indica en la Figura 10 como valor de VFA. Esto reducirá el posible aumento de la reactividad en el valor de reactividad  $p_{VFA}$ . El punto de ajuste estacionario de plena energía se utiliza opcionalmente para proporcionar, incluso a plena energía, la posibilidad de elevar las barras de control con el fin de regular pequeñas variaciones de energía. La reactividad  $p_{VFA}$  del margen de maniobra de las barras de control a plena carga se considera por separado con el coeficiente de reactividad a esa profundidad de inserción  $\Gamma_D$ . El potencial de reactividad  $p_{VFA}$  se calcula multiplicando la efectividad  $\Gamma_D$  por la distancia del punto de ajuste de carga completa al conjunto de barras L, en particular el extremo inferior de las barras L. Aquí, la efectividad  $\Gamma_D$ , que es un coeficiente de reactividad, es proporcionada por el módulo de coeficiente de reactividad 40.

15

20

25

**[0063]** Un valor de reactividad potencial adicional puede ser la reactividad  $p_L$  de las barras L debido a la profundidad de inserción real de las barras L ( $\Delta L$ ) por debajo de su punto de ajuste de energía máxima estacionaria. El coeficiente de reactividad correspondiente ( $\Gamma_L$ ), que corresponde a la efectividad de las barras L, es proporcionado por el módulo de coeficiente de reactividad 40. El movimiento de las barras L es principalmente necesario para contrarrestar la tendencia máxima de la distribución de energía axial a carga parcial. El potencial de reactividad  $p_L$  se calcula multiplicando la efectividad  $\Gamma_L$  por la profundidad de inserción real  $\Delta L$ .

30

**[0064]** Otro valor es la reactividad  $p_P$  debido al aumento futuro de la energía del reactor a la energía diana  $P_R$  ( $\Delta P$ ) con su coeficiente de reactividad ( $\Gamma_P$ ), que es proporcionado por el módulo de coeficiente de reactividad 40.

35

**[0065]** La reactividad  $p_{ACT}$  debido a la diferencia de la temperatura promedio del refrigerante (ACT) del circuito primario 5 a la temperatura de referencia a plena carga ( $\Delta ACT$ ; en el presente ejemplo aproximadamente 310 °C a plena carga) con su coeficiente de reactividad  $\Gamma_T$ , que es proporcionado por el módulo de coeficiente de reactividad 40.

40

**[0066]** Según una realización, el equilibrio de reactividad también puede tener en cuenta el impacto de reactividad  $p_{CVCS}$  causado por los efectos de tiempo muerto de las inyecciones de BODE a través del Sistema de Control de Volumen Químico CVCS (*Chemical Volume Control System*) que se determina mediante una simulación de tiempo muerto combinada con el coeficiente de reactividad relevante de la concentración de boro  $\Gamma_C$ . En este ejemplo, también el coeficiente de reactividad de la concentración de boro  $\Gamma_C$  es proporcionado por el módulo del coeficiente de reactividad 40.

45

**[0067]** Para poder aumentar la energía diana de  $P_R$ , utilizando en particular las barras de control o barras D 16, la suma de reactividad de todos los valores de reactividad considerados debe ser cero. Puede haber incluso más o menos valores de reactividad para calcular la suma de reactividad, el equilibrio de reactividad, la posición óptima de las barras de control y/o el punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el inicio del aumento de energía. A la energía diana  $P_R$ , es decir, después del aumento, también debe ser cero. Por lo tanto, se determina la posición óptima de las barras de control 16 para el aumento y se utiliza para el cálculo del equilibrio de reactividad. Por lo tanto, de acuerdo con las realizaciones, la posición óptima de las barras de control o el punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el inicio del aumento de energía se calcula en función de la reactividad total (predicha).

50

55

**[0068]** Si hay alguna desviación, por ejemplo, como se muestra en la Figura 10 con  $\Sigma p=56$  pcm, cuando las barras de control no están en la posición óptima para el aumento y, en particular, se proporcionan al ajuste del punto de ajuste de las barras de control 54, la cantidad de inyección de BODE necesaria se calcula en función del coeficiente de reactividad de la concentración de boro  $\Gamma_C$  y las ecuaciones de mezcla linealizadas (simplificadas) (ver a continuación) en relación con la suma de la masa del circuito primario junto con los CVC para determinar la cantidad de BODE en kg y/o kg/s (según lo prefiera el operador). Como datos de entrada para la ecuación de mezcla relevante de ácido bórico, se necesita la concentración de boro en los tanques de almacenamiento de ácido bórico  $c_B$ . Las ecuaciones de mezcla son las siguientes:

60

$$Q_B = M \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta c}{c_B - c}\right) \approx M \cdot \frac{\Delta c}{c_B - c} \quad (1)$$

$$\Delta c = (c_B - c) \cdot \left(e^{\frac{Q_B}{M}} - 1\right) \approx \frac{Q_B}{M} \cdot (c_B - c) \quad (2)$$

$$Q_D = M \cdot \ln\left(\frac{c - c_D}{(c - c_D) - \Delta c}\right) \approx M \cdot \frac{\Delta c}{c} \quad (3)$$

$$-\Delta c = (c - c_D) \cdot \left(1 - e^{-\frac{Q_D}{M}}\right) \approx \frac{c - c_D}{M} \cdot Q_D \quad (4)$$

donde  $Q_B$  es la cantidad de masa de ácido bórico inyectada,  $Q_D$  es la cantidad de masa de agua desionizada,  $c$  la concentración del ácido bórico en el fluido de refrigeración primario,  $\Delta c$  el cambio de la concentración de ácido bórico en el fluido de refrigeración primario,  $c_B$  es la concentración de ácido bórico en el ácido bórico inyectado,  $c_D$  es la concentración de ácido bórico en el agua desionizada inyectada, y  $M$  es la masa del fluido de refrigeración primario junto con el Sistema de Control de Volumen Químico CVCS. Por ejemplo, la concentración de ácido bórico en el ácido bórico inyectado es de aproximadamente 7000 ppm y la concentración de ácido bórico en el agua desionizada inyectada es inferior a 1000 ppm (partes por millón). Por ejemplo, la masa  $M$  es de aproximadamente 300 t a 310 °C.

**[0069]** En general, los coeficientes de reactividad del módulo de coeficientes de reactividad 40 no tienen efectos de retardo de tiempo o dependen en gran medida del tiempo. Los coeficientes de reactividad en el módulo de coeficientes de reactividad 40 no incluyen coeficientes para el coeficiente de reactividad de Xenón.

**[0070]** De acuerdo con las realizaciones, cuando el reactor nuclear funciona en el modo de control terciario, derivado de las consideraciones y coeficientes anteriores, se calcula un criterio de tiempo, en particular mediante el módulo de equilibrio de reactividad 52, que determina el tiempo antes del aumento que se necesita para llevar las barras de control 16 al punto de ajuste de las barras de control predeterminado para el inicio del aumento de energía, que se necesita para aumentar el valor de energía diana, por ejemplo, mediante el uso de inyecciones de ácido bórico o agua desionizada. Por ejemplo, para ese propósito, no solo se tiene en cuenta el punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el inicio del aumento de energía, sino también la posición real de las barras de control y la mezcla del fluido de enfriamiento primario en función de una o más de las ecuaciones anteriores (1) a (4) para el cálculo del tiempo para alcanzar el punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el inicio del aumento de energía. Si se alcanzan los criterios de tiempo, el módulo de equilibrio de reactividad 52 se adapta para informar al módulo flotante/ELPO 56 que los modos flotante o ELPO deben terminarse, que se denominan segundo y tercer submodo a continuación. Los criterios de tiempo dependen en particular de los coeficientes de reactividad proporcionados por el módulo de coeficientes de reactividad 40 y/o el ajuste real de las barras de control 16. En algunas realizaciones, se añade algo de tiempo adicional para tener un margen de seguridad.

**[0071]** Teniendo en cuenta los modos de funcionamiento de la red seleccionados, se utilizan automáticamente las siguientes estrategias y adaptaciones: Si se selecciona el modo de control secundario, por ejemplo, si el botón 36 está activado, lo que significa que el tiempo de espera debe ser cero, (N-SR está ENCENDIDO; tiempo de espera es cero), el reactor nuclear tiene que alcanzar una energía diana de  $P_R$  en cualquier momento, lo que no se puede predecir. Para ese propósito, las barras de control 16 deben ajustarse de tal manera que se pueda alcanzar la energía diana  $P_R$  a través del movimiento de las barras de control 16 en cualquier momento. Esto se hace prediciendo la reactividad del Xenón durante el aumento de energía, en particular al principio y al final durante el aumento de energía, con el fin de conocer la porción de la reactividad del Xenón que soporta el aumento de energía con el gradiente de energía seleccionado máximo  $dPG/dt$ .

**[0072]** En el modo de control secundario, el alcance de la energía diana es preponderante en comparación con la minimización de la adición de ácido bórico y/o agua desionizada. Por ejemplo, la acumulación de Xenón hasta el Xenón máximo a carga parcial debe compensarse mediante la inyección de agua desionizada, después de que se necesite la inyección de ácido bórico, como se muestra en la Figura 6. La inyección de ácido bórico y la inyección de agua desionizada se realizan, en particular automáticamente por el control de reactor estándar 58, que mantiene las barras de control 16 en los puntos de ajuste ajustados o posiciones proporcionadas por el módulo de ajuste del punto de ajuste de las barras de control 54, que es proporcionado por el módulo de equilibrio de reactividad 52. En otras palabras, la posición óptima de las barras de control o el punto de ajuste predeterminado de las barras de control para

el inicio del aumento de energía se utiliza directamente como punto de ajuste por el módulo de ajuste del punto de ajuste de las barras de control 54. En el modo de control secundario, no es necesario calcular una predicción de la reactividad de Xenón para el período de espera. En la Figura 6, se muestran gráficos para el modo secundario y un primer submodo del modo terciario. Con respecto a la inyección de agua desionizada y la posición de las barras de control 16, el modo secundario se muestra con las líneas gruesas continuas 60a, 60b. Las otras curvas o gráficos son iguales en este caso especial para el modo secundario y el primer submodo del modo terciario que se analiza a continuación. La gráfica 60b muestra el punto de ajuste de las barras de control 16 y su valor real. En la Figura 6, debido a la escala, no se puede distinguir el punto de ajuste y el valor real de la posición de las barras de control o barras D 16.

10

**[0073]** Típicamente, las barras de control 16 (banco D o conjunto de barras D), después de bajarse con el fin de reducir la energía del reactor nuclear 3, se elevan continuamente un poco durante el período de espera hasta el máximo de Xenón de acuerdo con el punto de ajuste calculado a través del módulo de equilibrio de reactividad 52, porque el soporte de reactividad de Xenón para el aumento aumenta por el mayor efecto de quemado del Xenón.

15

**[0074]** De acuerdo con las realizaciones, el modo de control terciario se detecta mediante la entrada de un período de espera donde el reactor nuclear funciona a carga parcial, de modo que, por ejemplo, puede ser posible una minimización adicional de las inyecciones de BODE.

20

**[0075]** Dependiendo del período de espera, el reactor nuclear puede controlarse en uno o más, en particular tres submodos diferentes. El comienzo del período de espera se define como el momento en que la energía se reduce a una energía parcial. Por ejemplo, la energía parcial puede estar entre el 30 % y el 90 % de la energía máxima del reactor nuclear. A continuación, se detallan estos tres modos diferentes.

25

**[0076]** Cuando se reduce la energía, el módulo flotante/ELPO 56 almacena automáticamente dependiendo del tiempo de espera ajustado, qué submodo se utiliza.

30

**[0077]** De acuerdo con realizaciones, el control de los puntos de ajuste durante el modo flotante o ELPO tiene preponderancia sobre el control del punto de ajuste dado por el equilibrio de reactividad 52. Por ejemplo, si el módulo flotante/ELPO 56 proporciona información al módulo de ajuste del punto de ajuste establecido de las barras de control 54, si se utiliza un modo flotante o un modo ELPO, esto anula los puntos de ajuste proporcionados por el módulo de equilibrio de reactividad 52. En otras palabras, dependiendo del tiempo de espera ajustado, el módulo flotante/ELPO 56 proporciona información al módulo de ajuste del punto de ajuste establecido de las barras de control 54, ya sea que se use un modo flotante o un modo ELPO. A continuación, el módulo de ajuste del punto de ajuste de ajuste de las barras de control ignora los puntos de ajuste proporcionados por el módulo de equilibrio de reactividad 52.

35

40

**[0078]** Por ejemplo, en el caso de un período de espera  $t_{PL}$ , que corresponde a un tiempo de carga parcial o duración de la fase de carga parcial, a una carga parcial que es menor que un primer tiempo predeterminado, se utiliza un primer submodo. El primer tiempo predeterminado está relacionado con el tiempo para alcanzar la concentración máxima de Xenón. Eso significa, que se puede esperar, que solo haya una pérdida de reactividad por parte de Xenon en este período de tiempo de aproximadamente 8 horas. En algunas realizaciones, el primer tiempo predeterminado es, por ejemplo, 2 h después del máximo de Xenón o el 30 % del tiempo de espera hasta el máximo de Xenón después del máximo de Xenón. Según una realización, que se muestra en la Figura 6, los puntos de ajuste de las barras de control 61 (línea delgada) se determinan de modo que se pueda alcanzar la energía diana de  $P_R$  después del tiempo de espera. Aquí, el punto de ajuste 61a corresponde a la posición predicha de las barras de control que permiten alcanzar la energía diana después del aumento de energía. La reducción de la reactividad debido a la concentración de Xenón se compensa mediante la adición de agua desionizada a través del control del reactor 58 como en el modo de control secundario. La primera línea y la segunda línea muestran las fases en las que se añade ácido bórico y agua desionizada al circuito primario. En comparación con el modo secundario, la inyección de agua desionizada comienza un poco más tarde como en el ejemplo mencionado anteriormente del modo de control secundario, ver línea delgada 63a, porque las barras de control 16 (conjunto de barras D) deben retirarse, compensando la acumulación de Xenón, para alcanzar su punto de ajuste para el aumento de energía, ver línea discontinua 63b que alcanza el punto de ajuste de las barras de control 61a. La inyección de ácido bórico se bloquea mediante la señalización de la acumulación de Xenón en el control estándar del reactor 58. Teniendo en cuenta el período de espera, este punto de ajuste para las barras de control 16 considera el soporte de reactividad de Xenón para el aumento en el máximo de Xenón debido al mayor efecto de quemado desde el comienzo del período de espera. Las curvas restantes del primer submodo del modo de control terciario corresponden a las curvas del modo de control secundario en la Figura 2, es decir, durante la reducción de la energía, la posición real de las barras de control corresponde a la línea gruesa.

50

**[0079]** La cantidad de ácido bórico y agua desionizada está determinada por el control del reactor estándar 58, que mantiene las barras de control 16 en los puntos de ajuste ajustados proporcionados por el módulo de ajuste del punto de ajuste de las barras de control 54, que es proporcionado por el módulo de equilibrio de reactividad 52. Como se indicó anteriormente, el módulo flotante/ELPO 56 no proporciona puntos de ajuste al módulo de ajuste del punto de ajuste del conjunto de barras de control 54. Se utiliza el punto de ajuste de las barras de control predeterminado

para el inicio del aumento de energía proporcionado por el módulo de equilibrio de reactividad 52.

**[0080]** La tercera línea muestra la concentración de Xenón a lo largo del tiempo, la cuarta línea la posición de las barras de control 16 (su inserción en el núcleo del reactor en centímetros) y la quinta línea la energía del reactor nuclear 3 a lo largo del tiempo. Este submodo de control funciona de forma similar al modo de control secundario. En este caso, solo se considera el tiempo de espera en la Predicción Xe. De este modo, la visualización del equilibrio de reactividad, por ejemplo, como se muestra en la Figura 10, en la fase de aumento para el operador del reactor es más precisa incluso al comienzo del tiempo de espera.

**[0081]** De acuerdo con este ejemplo, se muestra un punto de ajuste de las barras de control 61a para/al final del período de espera, que se basa en todo el equilibrio de reactividad que incluye la reactividad de Xenón predicha para soportar el aumento gradual del reactor nuclear 3 en el máximo de Xenón. En otras palabras, es el punto de ajuste de las barras de control previsto para el inicio del aumento de energía. Al entrar en el modo de energía parcial, las barras de control o barras D 16 se bajan para reducir la energía del reactor nuclear 3, aquí a aproximadamente el 75 % de la energía total. Como se puede observar a partir de la Figura 6, la concentración de Xenón aumenta durante el período de espera. Esto se compensa añadiendo agua desionizada al circuito primario 3 después de alcanzar el punto de ajuste predicho 61a por las barras de control 16. Más tarde hasta el final del período de espera (aquí, el período de espera es de aproximadamente 6 h), las barras de control 16 alcanzan el punto de ajuste de las barras de control 61a en una posición para el inicio del aumento de energía. Durante el aumento, la concentración de Xenón se reduce debido a los efectos ya descritos anteriormente (es decir, el Xenón-135 se quema). Después de alcanzar la energía diana  $P_R$ , la concentración de Xenón aún se reduce, de modo que se añade ácido bórico al circuito primario para disminuir la reactividad, lo que se debe a la disminución de la concentración de Xenón.

**[0082]** En la Figura 7, el período de espera  $t_{PL}$  a carga parcial está entre el primer tiempo predeterminado, por ejemplo, 8 horas, y un segundo tiempo predeterminado, por ejemplo, aproximadamente 30 horas. Eso significa que se puede esperar que después de la pérdida de reactividad por Xenon haya una ganancia de reactividad y esto se puede compensar moviendo las barras de control 16 para minimizar extremadamente las inyecciones de BODE. Para este propósito, se utiliza un segundo submodo, el llamado modo flotante. El segundo período predeterminado (aquí aproximadamente 30 horas) corresponde a un momento donde se deben considerar diferentes aspectos, en particular con respecto a ELPO, durante la operación de carga parcial a largo plazo, en particular que los conjuntos D o barras de control estarán en su "posición de carga completa" para tener un quemado de combustible optimizado y un núcleo acondicionado óptimo con respecto a la interacción de revestimiento de pastillas (PCI - *pellet cladding interaction*).

**[0083]** En el segundo submodo, el módulo flotante/ELPO 56 informa al módulo de ajuste del punto de ajuste establecido de las barras de control 54 que se debe utilizar el segundo submodo o modo flotante. De acuerdo con realizaciones, el módulo 54, tras la recepción de la información de que se debe usar el segundo submodo o modo flotante, ordena al control de reactor estándar 58 que inhiba las inyecciones de BODE para compensar el cambio de concentración de Xenón, en particular dentro del límite de control superior (UCL – *upper control limit*) y el límite de control inferior de las barras de control 16. Por lo tanto, en caso de energía constante del reactor nuclear 3, la concentración de Xenón es compensada por el movimiento de las barras de control 16 por el control de reactor estándar 58, por ejemplo indirectamente a través del control ACT. En otras palabras, el módulo 54 ignora los puntos de ajuste proporcionados por el módulo de equilibrio de reactividad 52.

**[0084]** El segundo submodo o modo flotante se explicará en detalle con la ayuda de la Figura 7. La primera línea y la segunda línea muestran las fases en las que se añade ácido bórico y agua desionizada al circuito primario. La cantidad de ácido bórico y agua desionizada se minimiza extremadamente en comparación con los casos anteriores, porque el control del conjunto de barras de control D normal se desactiva con respecto a la activación de las inyecciones de BODE y el conjunto D o barras de control se mueven para compensar el cambio de reactividad del Xenón (por ejemplo, a través del controlador ACT dentro del control del reactor 58). De acuerdo con las realizaciones, las barras de control 16 se mueven entre los valores límite de regulación dentro del control de reactor estándar (por ejemplo, UCL = "límite de control superior - upper control limit" para garantizar una distancia mínima al extremo inferior del conjunto de barras L). Por lo tanto, se garantiza que las barras de control 16 no se inserten demasiado poco. La tercera línea muestra la concentración de Xenón a lo largo del tiempo, la cuarta línea la posición de las barras de control 16 (su inserción en el núcleo del reactor o núcleo nuclear en centímetros) y la quinta línea la energía del reactor nuclear 3 a lo largo del tiempo.

**[0085]** En este segundo submodo, el aumento de la concentración de Xenón es compensado por las barras de control 16. En otras palabras, las barras de control 16 se mueven fuera del núcleo del reactor hasta que alcanzan su límite de control superior UCL. Si aún se necesita una compensación adicional del aumento de la concentración de Xenón, se agrega algo de agua desionizada al circuito primario, consulte el máximo del gráfico de concentración de Xenón, entre aproximadamente 6h y 8h. Cuando la concentración de Xenón disminuye después de su máximo, la reactividad total aumenta de modo que las barras de control se mueven hacia abajo en el núcleo del reactor hasta una profundidad de aproximadamente 300 cm, que alcanzan a las 15 h aproximadamente. En este caso especial, las barras alcanzan aproximadamente a las 15 h la posición predeterminada para aumentar la energía a la energía diana

P<sub>R</sub>.

**[0086]** Cuando la energía debe aumentarse a la energía diana P<sub>R</sub>, aquí el 100 % de la energía del reactor nuclear 3, las barras de control 16 se elevan. Al mismo tiempo, la concentración de Xenón disminuye, de modo que después de alcanzar la energía diana, la reducción adicional de la concentración de Xenón se compensa mediante la adición de ácido bórico. Después de la concentración mínima de Xenón, la concentración de Xenón se eleva a un estado de equilibrio después de aproximadamente 30 h. La creación de Xenón corresponde en el estado de equilibrio a la quema de Xenón debido a la absorción de neutrones y la descomposición del Xenón. Durante la subida, se añade de nuevo agua desionizada para compensar el cambio de concentración del Xenón.

**[0087]** Como se puede observar en la Figura 7, que muestra con las regiones sombreadas la comparación con un control del reactor, donde las barras de control permanecen insertadas para el aumento posterior. El ejemplo de la Figura 7 muestra la reducción máxima de ácido bórico y agua desionizada en comparación con una regulación estándar sin considerar el tiempo de espera. Cabe señalar que la reducción de ácido bórico y agua desionizada aumenta cuando se acerca el final del ciclo, es decir, antes de que las barras de combustible tengan que intercambiarse por otras nuevas, ya que las adiciones de agua desionizada aumentan extremadamente. Por ejemplo, para tener el mismo efecto, la adición de agua desionizada es al final del ciclo exponencialmente mayor (en el último 20 % del ciclo del elemento combustible más de 10 veces mayor) en comparación con el comienzo del ciclo. Por lo tanto, los costos para tratar o reciclar el agua de refrigeración del circuito primario 5 aumentan o de lo contrario la flexibilidad de carga disminuirá.

**[0088]** Si el tiempo de espera fuera más corto que en este ejemplo en la Figura 7 (por ejemplo, 11 horas), las barras de control no alcanzarían el punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el aumento de energía o el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía simplemente compensando la disminución de la concentración de Xenón, el módulo flotante/ELPO 56 recibe una señal del módulo de equilibrio de reactividad 52, por ejemplo, una señal de terminación "criterios de tiempo alcanzados", para terminar el modo flotante. Por la presente, el control se traspassa al control de reactor estándar 58, que está adaptado para controlar la válvula 28 con el fin de añadir más agua desionizada al circuito primario 5 para que las barras de control 16 puedan alcanzar el punto de ajuste de barra de control predeterminado para el inicio del aumento de energía, proporcionado por el módulo de equilibrio de reactividad 52, hasta el final del período de espera para aumentar la energía. En otras palabras, el punto de ajuste de las barras de control predeterminado para el inicio del aumento de energía se proporciona mediante el ajuste del valor de ajuste de las barras de control 54 de acuerdo con el resultado del equilibrio de reactividad 52 y con el tiempo de espera calculado en el módulo de predicción de Xenón 46.

**[0089]** Si el tiempo de espera fuera más largo que en este ejemplo en la Figura 7 (por ejemplo, 20 horas), las barras de control excederían el punto de ajuste de barra de control predeterminado para el inicio del aumento de energía, el punto de ajuste de barra de control predeterminado se determina por el módulo de equilibrio de reactividad 52, simplemente compensando la disminución adicional de la concentración de Xenón, el módulo flotante/ELPO 56, por ejemplo, recibiendo una señal del módulo de equilibrio de reactividad 52, termina el segundo submodo "flotante" y el control se entrega al control de reactor estándar 58. Esto es importante para poder insertar aún más las barras de control 16 en el núcleo del reactor en caso de una parada de emergencia (garantizar la reactividad de parada). En otras palabras, las barras de control 16 no se bajan más porque el control del reactor estándar comienza la inyección de ácido bórico de acuerdo con la desviación de control, que viene dada por la posición real de las barras de control en comparación con su punto de ajuste previsto proporcionado por el ajuste del punto de ajuste de las barras de control 54.

**[0090]** En la Figura 8, cuando el período de espera t<sub>PL</sub> a carga parcial es mayor que el segundo tiempo predeterminado, por ejemplo, aproximadamente 30 horas, se utiliza un tercer submodo. El tercer submodo también puede denominarse modo de operación extendida de baja energía (ELPO - *Extended Low Power Operation*).

**[0091]** Este segundo período predeterminado (aquí aproximadamente 30 h, pero puede ser mucho más largo, por ejemplo, 60 h) corresponde a un momento donde se deben considerar diferentes aspectos con respecto a ELPO: durante la operación de carga parcial a largo plazo, los conjuntos D estarán en su "posición de carga completa" para tener un quemado de combustible optimizado y un núcleo acondicionado óptimo con respecto a la interacción de revestimiento de pastillas (PCI - *pellet cladding interaction*). Por ejemplo, el segundo período predeterminado es de al menos 30 h.

**[0092]** El tercer submodo se explicará con la ayuda de la Figura 8. La primera línea y la segunda línea muestran las fases en las que se añade ácido bórico y agua desionizada al circuito primario. La cantidad de ácido bórico y agua desionizada también se minimiza en este caso porque la acumulación de Xenón (después de alcanzar la carga parcial) se utiliza para retirar el conjunto D a la "posición de carga completa". En otras palabras, el núcleo del reactor está casi libre de barras de control. La tercera línea muestra la concentración de Xenón a lo largo del tiempo, la cuarta línea la posición de las barras de control 16 (su inserción en el núcleo del reactor en centímetros) y la quinta línea la energía del reactor nuclear 3 a lo largo del tiempo.

**[0093]** En el tercer submodo terciario, el módulo flotante/ELPO 56 tiene prioridad con respecto al módulo de ajuste del valor del conjunto de barras de control 54 en comparación con el punto de ajuste previsto del módulo de equilibrio de reactividad 52. En el tercer submodo, el módulo flotante/ELPO 56 informa al módulo de ajuste del punto de ajuste del conjunto de barras de control 54 que se debe utilizar el tercer submodo o modo ELPO. Según las realizaciones, el módulo 54, tras la recepción de la información de que se debe usar el tercer submodo o ELPO, ordena que los valores establecidos para las barras de control 16 sean la "posición de carga completa" (posición casi libre de barras de control o de energía completa). Por lo tanto, en caso de una energía constante del reactor nuclear 3, después de que las barras de control hayan alcanzado la posición de carga completa, la concentración de Xenón se compensa mediante inyecciones de BODE mediante el control de reactor estándar 58, por ejemplo, indirectamente a través del control ACT. En otras palabras, el módulo 54 ignora los puntos de ajuste proporcionados por el módulo de equilibrio de reactividad 52.

**[0094]** En una primera etapa, las barras de control se bajan o insertan en el núcleo del reactor con el fin de reducir la energía del reactor nuclear 3. En el ejemplo de la Figura 8, la energía se reduce al 75 % de la energía total. Luego, la concentración de Xenón aumenta y las barras de control 16 se retiran del núcleo del reactor para compensar la pérdida de reactividad debido al aumento de la concentración de Xenón. Las barras de control 16 se mueven fuera del núcleo del reactor hasta que alcanzan su "posición de carga completa" (casi libre de barras de control) o, en paralelo, el límite de control superior UCL. Si aún se necesita una compensación adicional del aumento de la concentración de Xenón, se agrega algo de agua desionizada al circuito primario, consulte el máximo de la gráfica de concentración de Xenón, entre 6h y 8h, consulte el signo de referencia 62. Cuando la concentración de Xenón disminuye después de su máximo, la reactividad total aumenta y el ácido bórico se añade al circuito primario 5 mediante el control de reactor estándar 58, que viene dado por el punto de ajuste "posición de carga completa" del módulo de ajuste de punto de ajuste de las barras de control 54 y la posición real de las barras de control 16. De acuerdo con realizaciones, el ácido bórico se añade de manera discontinua. El ácido bórico se añade, hasta que se alcanza un equilibrio de la concentración de Xenón, es decir, que el gradiente de Xenón es casi cero, en la Figura 8 durante el período con el signo de referencia 64.

**[0095]** Antes del final del período de espera, las barras de control 16 deben moverse al punto de ajuste predeterminado de las barras de control para aumentar la energía. Por lo tanto, a su debido tiempo antes del final del período de espera, el tercer submodo o modo ELPO se termina en el submódulo flotante/ELPO 56, al recibir la señal de terminación "criterios de tiempo alcanzados" del módulo de equilibrio de reactividad 52. Luego, el módulo de equilibrio de reactividad 52 proporciona los puntos de ajuste para las barras de control 16 al módulo de ajuste del punto de ajuste de las barras de control 54, que corresponde a la posición o punto de ajuste predeterminado de las barras de control antes del aumento, y el control del reactor estándar 58 inyecta agua desionizada, que mueve las barras de control 16 al punto de ajuste predeterminado de las barras de control para el inicio del aumento de energía proporcionado por el ajuste del valor de ajuste de las barras de control 54. Se añade agua desionizada, véase el signo de referencia 66, al circuito primario 5 durante el movimiento de las barras de control 16 al valor de ajuste de barra de control predeterminado.

**[0096]** En este tercer submodo, las barras de control se mueven fuera del núcleo del reactor para que las barras de combustible se quemen de forma homogénea y debido a la interacción del revestimiento de pastillas (PCI).

**[0097]** El tercer submodo o submodo ELPO se termina entre 1h y 3h antes de que finalice el tiempo de espera, de acuerdo con la generación de la señal "criterios de tiempo alcanzados" proporcionada por el módulo de equilibrio de reactividad 52 en función de la reactividad y el equilibrio de mezcla del fluido de enfriamiento primario. Cabe señalar que las barras de control 16 no exceden un límite de regulación inferior LIF, en particular en cada uno de los submodos de control terciario. El límite inferior de regulación LIF depende de la energía real  $P_R$  del reactor nuclear. Cuanto mayor sea la energía real, mayor será el límite de regulación inferior para permitir que el reactor nuclear se apague en cualquier momento utilizando las barras de control 16.

**[0098]** De acuerdo con las realizaciones, como ya se analizó anteriormente, el módulo de equilibrio de reactividad 52 determina además, en función de la reactividad de Xenón predicha y los coeficientes de reactividad del módulo de coeficientes de reactividad 40, si los modos de control terciario Flotante o ELPO deben terminarse. Para este propósito, el módulo de equilibrio de reactividad 52 determina, en función de los coeficientes de reactividad reales, el punto de ajuste de las barras de control predeterminado, la posición real de las barras de control 16 y el equilibrio de la mezcla (según las ecuaciones de mezcla simplificadas (1) a (4) mencionadas anteriormente) el tiempo de inyección necesario para llevar los conjuntos D a la posición necesaria para el aumento gradual. Si este tiempo de inyección necesario más una tolerancia se vuelve mayor que el tiempo de espera restante, la señal "Criterios de tiempo alcanzados" está activa y finaliza el modo ELPO o flotante.

**[0099]** El control del reactor 58 también puede funcionar sin los valores de reactividad de Xenón previstos y también funciona sin los módulos 52, 56 y 38. En este caso, el punto de ajuste de las barras D debe establecerse manualmente.

**[0100]** En la Figura 9, se muestra la precisión del módulo de predicción de Xenón con 200 etapas de cálculo, para cada tiempo de espera y tiempo de aumento, con un ejemplo de un tiempo de carga parcial de 15 horas. Como se puede observar en la Figura 9, que muestra de arriba a abajo la concentración de Xenón, el error de predicción, la posición de las barras de control o barras D 16 y la energía del reactor en un ejemplo del modo de control terciario que utiliza el segundo submodo (modo flotante), el error de predicción disminuye a medida que se acerca el final del período de espera. Esto se debe al cálculo repetido cíclicamente de la predicción de la reactividad del Xenón, que funciona con el período de espera restante. El error se compara con la precisión de regulación sustancialmente baja. Incluso al comienzo del tiempo de espera, este error de cálculo es pequeño con un valor de 10 pcm. Esto es comparable con una desviación del conjunto de barras de control de aproximadamente 8 cm, si el coeficiente de reactividad del conjunto de barras de control es de 1,2 pcm/cm. En comparación con el umbral de control para las barras de control ajustada a una carga parcial de 30 cm es insignificante.

**[0101]** La Figura 10 muestra una visualización para un operador de un reactor nuclear. La visualización puede proporcionarse en una pantalla. La visualización muestra, además de la flecha de equilibrio de reactividad discutida al principio, el período de espera restante y si se establecen los submodos relevantes de la red ELPO o el modo flotante. Además, la Figura 10 muestra la energía diana  $P_R$ , la velocidad de aumento de 2,1 %/min ( $PG-Grad_{dPG/dt}$ ), que se deriva del control de turbina. "Hd. SW-Fkt." se refiere al punto de ajuste manual para las barras de control 16 como una propuesta para el operador del reactor, si se debe cambiar la influencia del predictor al control del reactor, mientras que el "valor real Hd. SW Fkt." es el valor realmente efectivo en el control del reactor de las barras de control 16.

**[0102]** Según algunas realizaciones, las constantes de tiempo y las bandas de intensidad de control pueden adaptarse para el control del reactor nuclear en el caso del modo de control primario seleccionado.

**[0103]** De acuerdo con las realizaciones, el procedimiento o los algoritmos para la predicción de Xenón permiten etapas de cálculo minimizadas y se adaptan al modo de control de red seleccionado para determinar la contribución de Xenón en la fase de aumento esperada que se necesita para la implementación en un control de reactor digital en tiempo real. El procedimiento utilizado en las realizaciones permite todos los modos de control relevantes para la red (incluso transitorios inesperados como rechazo de carga a carga interna), incluidos los cambios de carga controlados remotamente estocásticos mediante el cálculo de Xenón en tándem con un cálculo del valor real de Xenón y Yodo como base para el segundo cálculo predictivo de la contribución de Xenón en la fase de aumento.

**[0104]** En algunos ejemplos de implementación, cualquier característica de cualquier realización descrita en esta invención se puede usar en combinación con cualquier característica de cualquier otra realización descrita en esta invención.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar una planta de energía nuclear que comprende un reactor nuclear de agua a presión (3) que tiene un núcleo del reactor que produce energía, un circuito primario (5) que conecta el núcleo del reactor a un generador de vapor (9), una o más barras de control (16), que se pueden mover hacia el núcleo del reactor para controlar la energía del núcleo del reactor, un dispositivo de inyección (22, 23, 24, 26, 28, 30) para inyectar ácido bórico y/o agua desionizada en el circuito primario (5) para controlar la reactividad del núcleo del reactor, comprendiendo el procedimiento:
- 5
- 10 determinar una energía real,  $P_R$ , del reactor nuclear (3),  
determinar automáticamente una concentración real de Xenón, una concentración real de Yodo y/o una reactividad real de Xenón,  
obtener una energía diana y un gradiente de energía,  $dPG/dt$ , durante un período de aumento de energía hasta una energía diana,
- 15 **caracterizado porque** el procedimiento comprende además:
- obtener un período de espera y/o un período de espera restante donde el reactor nuclear (3) funciona a una energía parcial hasta que aumenta hasta una energía diana que es mayor que la energía parcial, calcular, para el final del período de espera y/o el período de espera restante, la reactividad de Xenón y/o la concentración de Xenón en función de la concentración real de Xenón, la concentración real de Yodo y el período de espera obtenido, calcular, para el final del período de aumento de energía, la reactividad de Xenón y/o la concentración de Xenón,
- 20 calcular un punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía para una o más barras de control (16) en función de la reactividad de Xenón y/o la concentración de Xenón calculadas al final del período de espera y el final del período de aumento de energía, de modo que el aumento de energía se pueda realizar utilizando las barras de control (16), posicionar, durante el período de espera, una o más barras de control (16) en función del período de espera y el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía, de modo que una o más barras de control alcancen el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía al final del período de espera, donde, cuando el período de espera es mayor que un primer tiempo predeterminado, permitir elevar la concentración de Xenón al valor máximo, el procedimiento incluye además:
- 25 mover una o más barras de control (16) hacia fuera del núcleo del reactor para compensar la pérdida de reactividad debido al aumento de la concentración de Xenón, y  
mover una o más barras de control (16) hacia el núcleo del reactor hasta el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía antes del final del período de espera.
- 30
- 35
2. El procedimiento según la reivindicación 1, donde el cálculo del punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía se basa además en uno o más valores de reactividad y/o coeficientes de reactividad del reactor nuclear, en particular uno o más coeficientes de reactividad de una o más barras de control, un coeficiente de reactividad de o más barras L, un cambio de reactividad debido a la diferencia de la Temperatura Media del Refrigerante, ACT (*Average Coolant Temperature*), entre la energía real y la energía diana, un cambio de reactividad debido a la diferencia entre la energía real  $P_R$  y la energía diana, y/o la contribución de la reactividad de un flujo de seguimiento de ácido bórico o agua desionizada inyectada en combinación con el coeficiente del ácido bórico en el fluido de enfriamiento primario.
- 40
- 45
3. El procedimiento según la reivindicación 1 o 2, donde el cálculo del punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía se basa además en el punto de ajuste de plena energía de las barras de control (16) y/o el punto de ajuste de plena energía de las barras L.
- 50
4. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde en caso de que las barras de control (16) alcancen un límite de control superior o una posición de carga completa cuando se mueven hacia fuera del núcleo del reactor, agregar algo de agua desionizada para mantener el reactor (3) a una energía parcial para compensar la pérdida de reactividad debido al aumento de la concentración de Xenón, en particular para garantizar la controlabilidad de la energía del reactor.
- 55
5. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además:
- determinar un límite de tiempo para que una o más barras de control (16) se muevan al punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía en función de la posición real de las barras de control, el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía y la concentración real de ácido bórico en el fluido de enfriamiento primario,
- 60 para mover una o más barras de control (16) hacia el núcleo del reactor al punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía antes del límite de tiempo determinado mediante la inyección de agua

desionizada en el circuito primario, y añadir agua desionizada al circuito primario (5).

6. El procedimiento según la reivindicación 5, donde el límite de tiempo se determina adicionalmente basándose en la velocidad de alimentación mínima de agua desionizada.

5

7. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde, cuando el período de espera es más corto que un segundo tiempo predeterminado, el segundo tiempo predeterminado es más largo que el primer tiempo predeterminado del procedimiento, donde una o más barras de control (16) se mueven, después de que la concentración de Xenón haya alcanzado su máximo durante el período de espera, hacia el núcleo del reactor para compensar el aumento de reactividad debido a la disminución de la concentración de Xenón.

10

8. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1 a 4 o 7, donde, cuando el período de espera es más corto que un segundo tiempo predeterminado, siendo el segundo tiempo predeterminado más largo que el primer tiempo predeterminado, el procedimiento comprende además, cuando durante el movimiento hacia el núcleo del reactor, las barras de control (16) alcanzan el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía, agregar ácido bórico al circuito primario y mantener las barras de control (16) en el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía, en particular para garantizar la reactividad de apagado.

15

9. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde, cuando el período de espera es más largo que un segundo tiempo predeterminado, siendo el segundo tiempo predeterminado más largo que el primer tiempo predeterminado, el procedimiento comprende además, después de que la concentración de Xenón haya alcanzado su máximo durante el período de espera, agregar ácido bórico al circuito primario (5) para compensar el aumento de reactividad debido a la disminución de la concentración de Xenón, donde, en particular, las barras de control permanecen en el límite de control superior o en la posición de máxima energía hasta el movimiento de una o más barras de control (16) hacia el núcleo del reactor hasta el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía antes del final del período de espera.

20

25

10. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el primer tiempo predeterminado corresponde a un tiempo de 2h después del máximo de Xenón o 30 % del tiempo de espera hasta el máximo de Xenón después del máximo de Xenón.

30

11. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde el primer tiempo predeterminado está entre 6h y 10h y/o el segundo tiempo predeterminado está entre 20h y 60h.

35

12. El procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde se calcula una reactividad total que incluye la reactividad de Xenón para el final del período de espera y el final del período de aumento de energía para aumentar la energía a la energía diana para calcular el punto de ajuste de las barras de control para el inicio del aumento de energía.

40

13. Controlador para una planta de energía nuclear que comprende un reactor de agua a presión (3) que tiene un núcleo del reactor que produce energía, un circuito primario (5) que conecta el núcleo del reactor a un generador de vapor (9), una o más barras de control (16), que se pueden mover hacia el núcleo del reactor para controlar la energía del núcleo del reactor, un dispositivo de inyección (22, 23, 24, 26, 28, 30) para inyectar ácido bórico y/o agua desionizada en el circuito primario (5) para controlar la reactividad del núcleo del reactor, donde el controlador está adaptado para realizar el procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

45

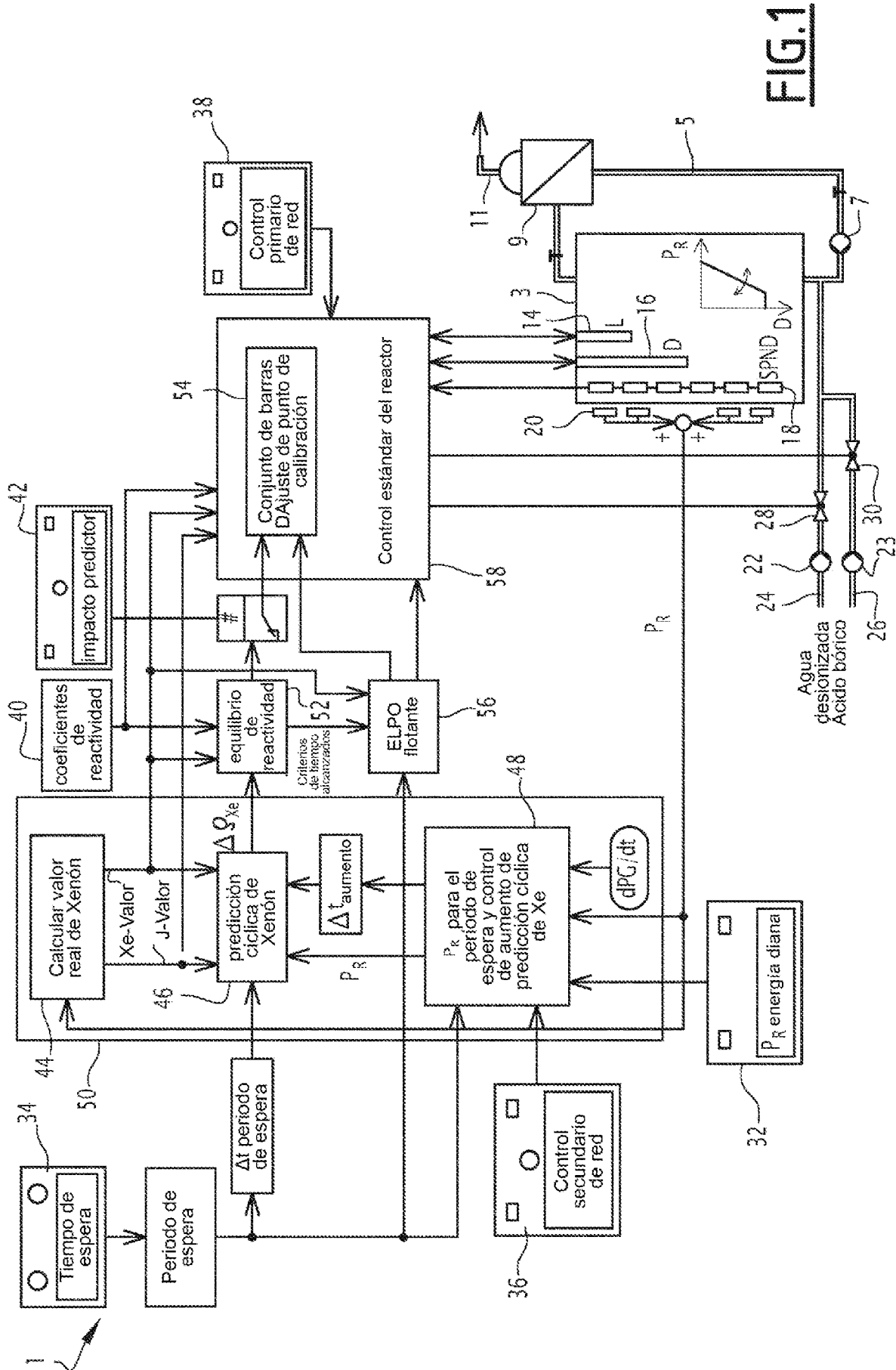
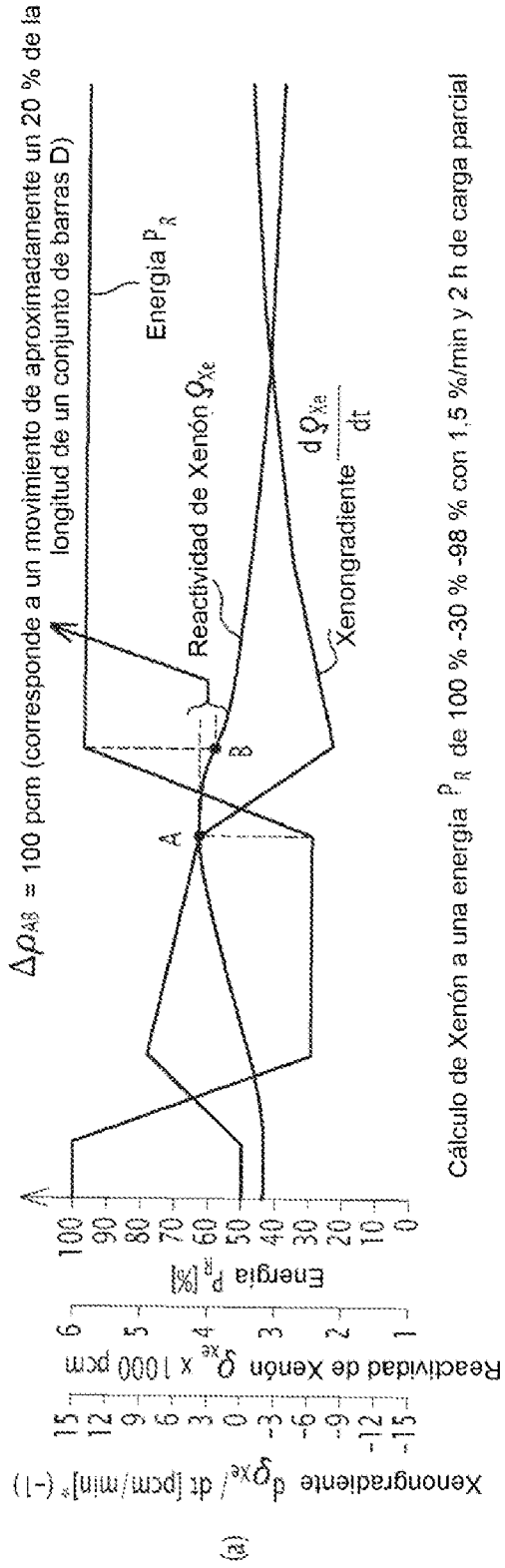
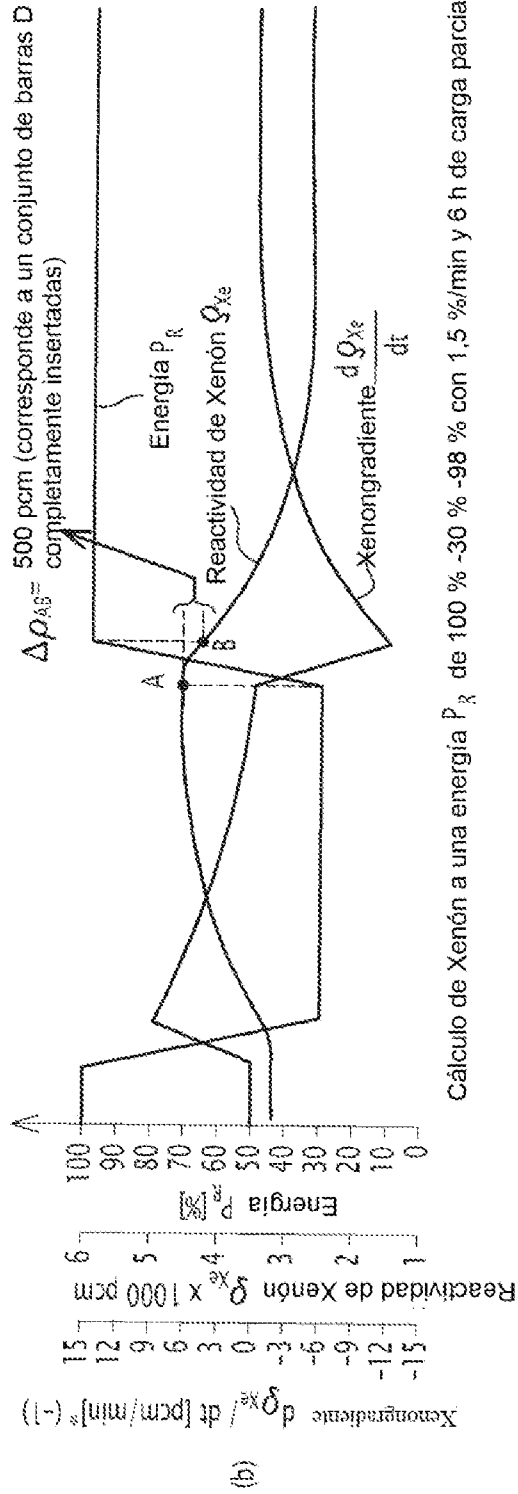


FIG.1



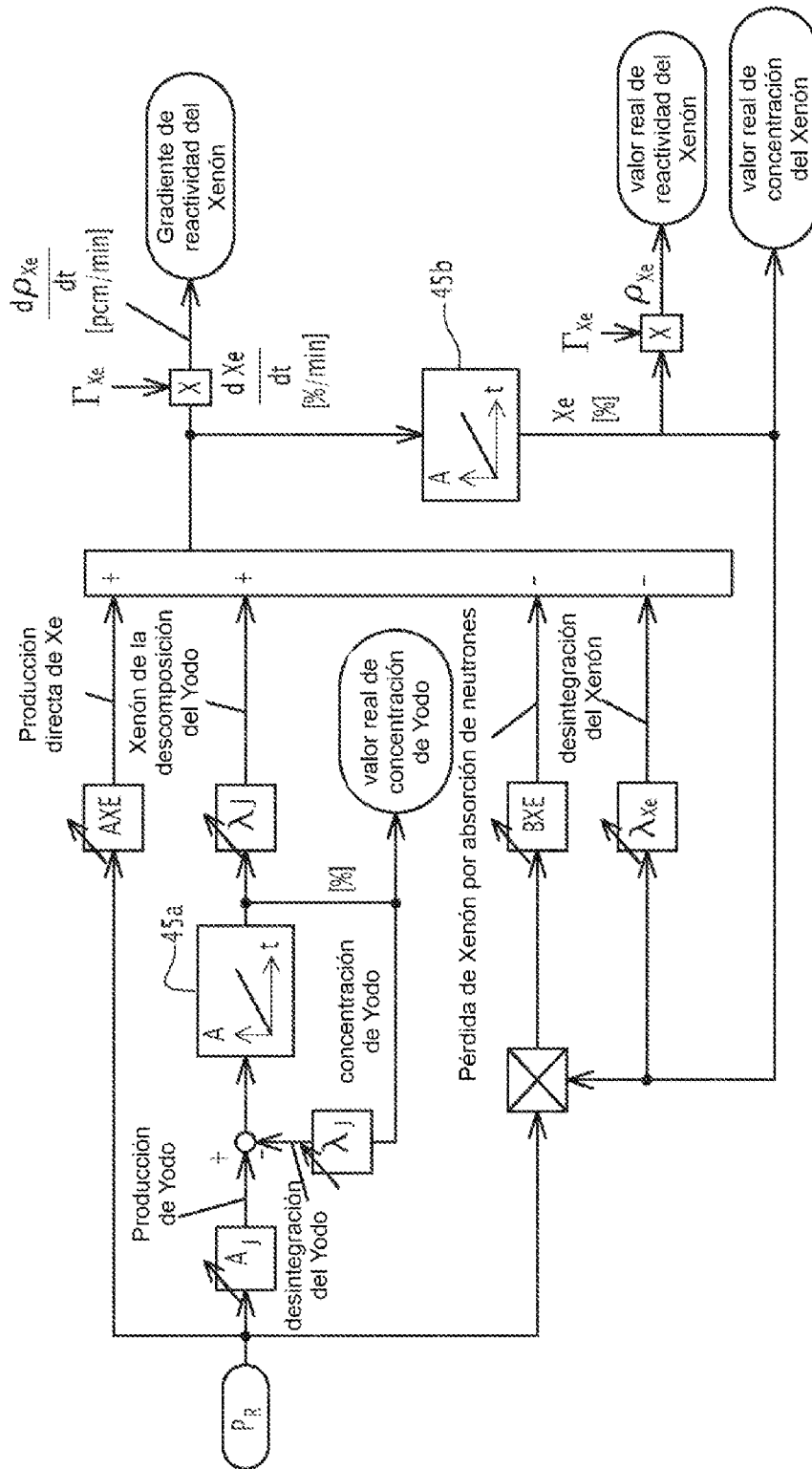
Cálculo de Xenón a una energía  $P_R$  de 100 % -30 % -98 % con 1,5 %/min y 2 h de carga parcial



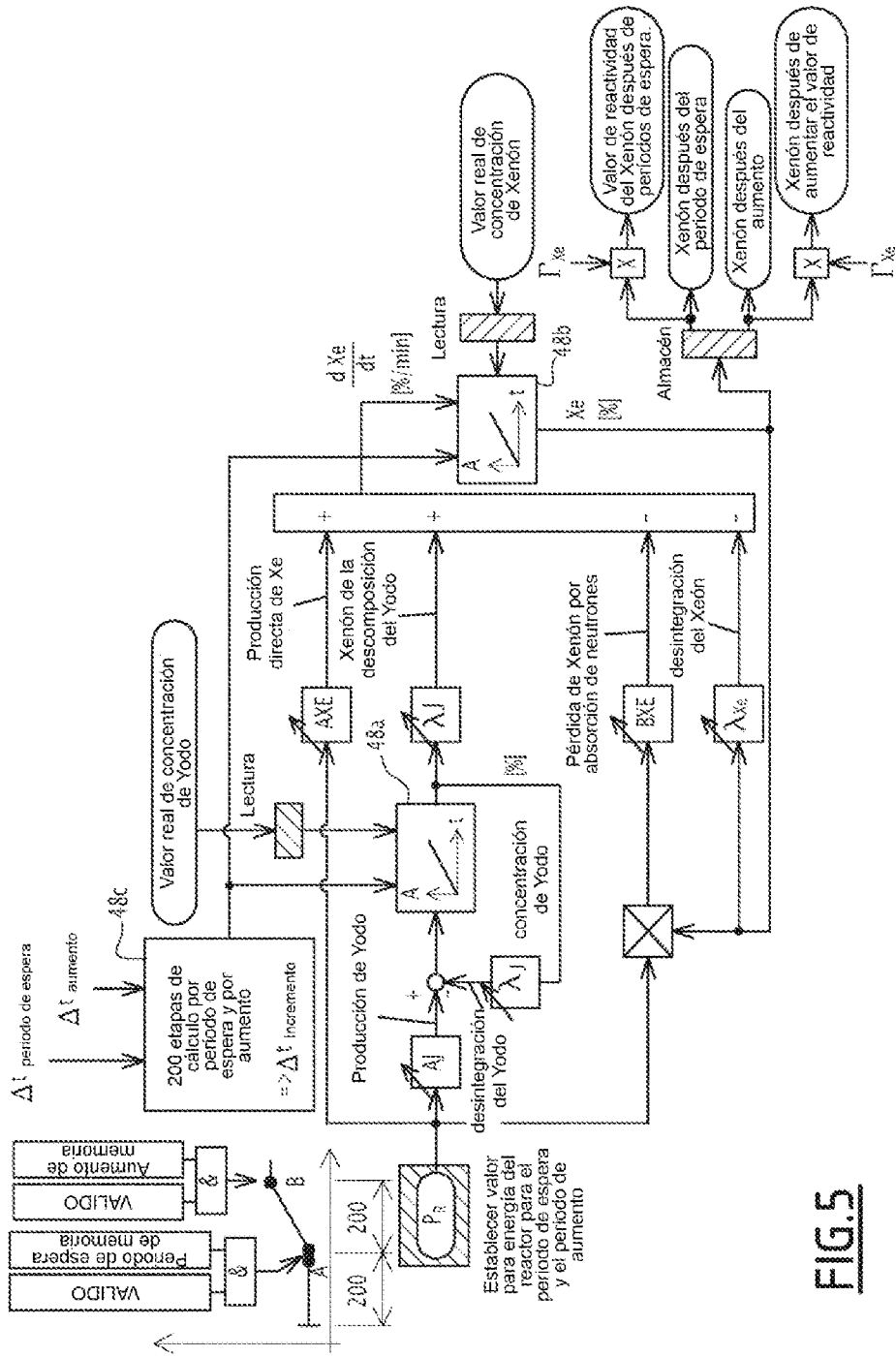
Cálculo de Xenón a una energía  $P_R$  de 100 % -30 % -98 % con 1,5 %/min y 6 h de carga parcial

**FIG.2**

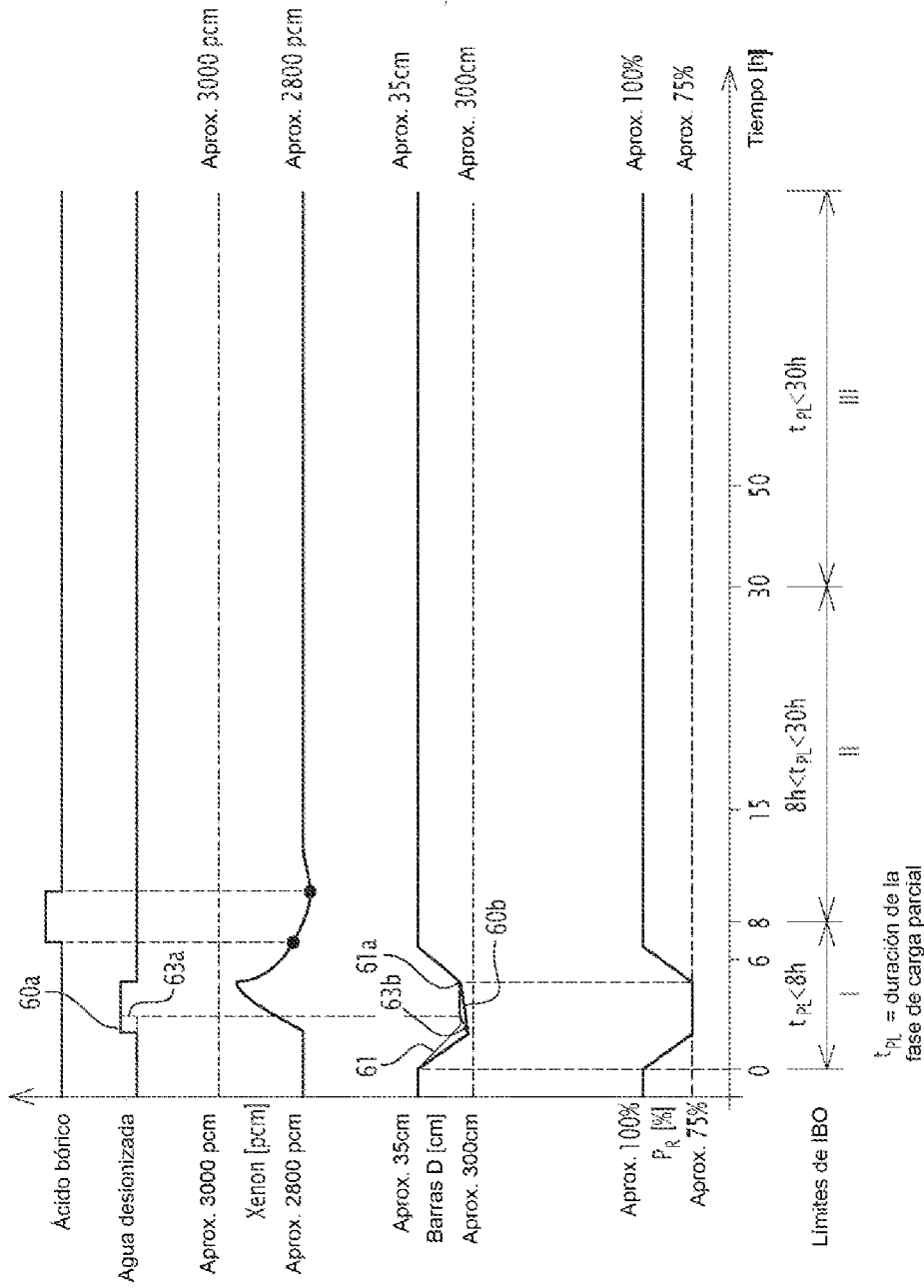




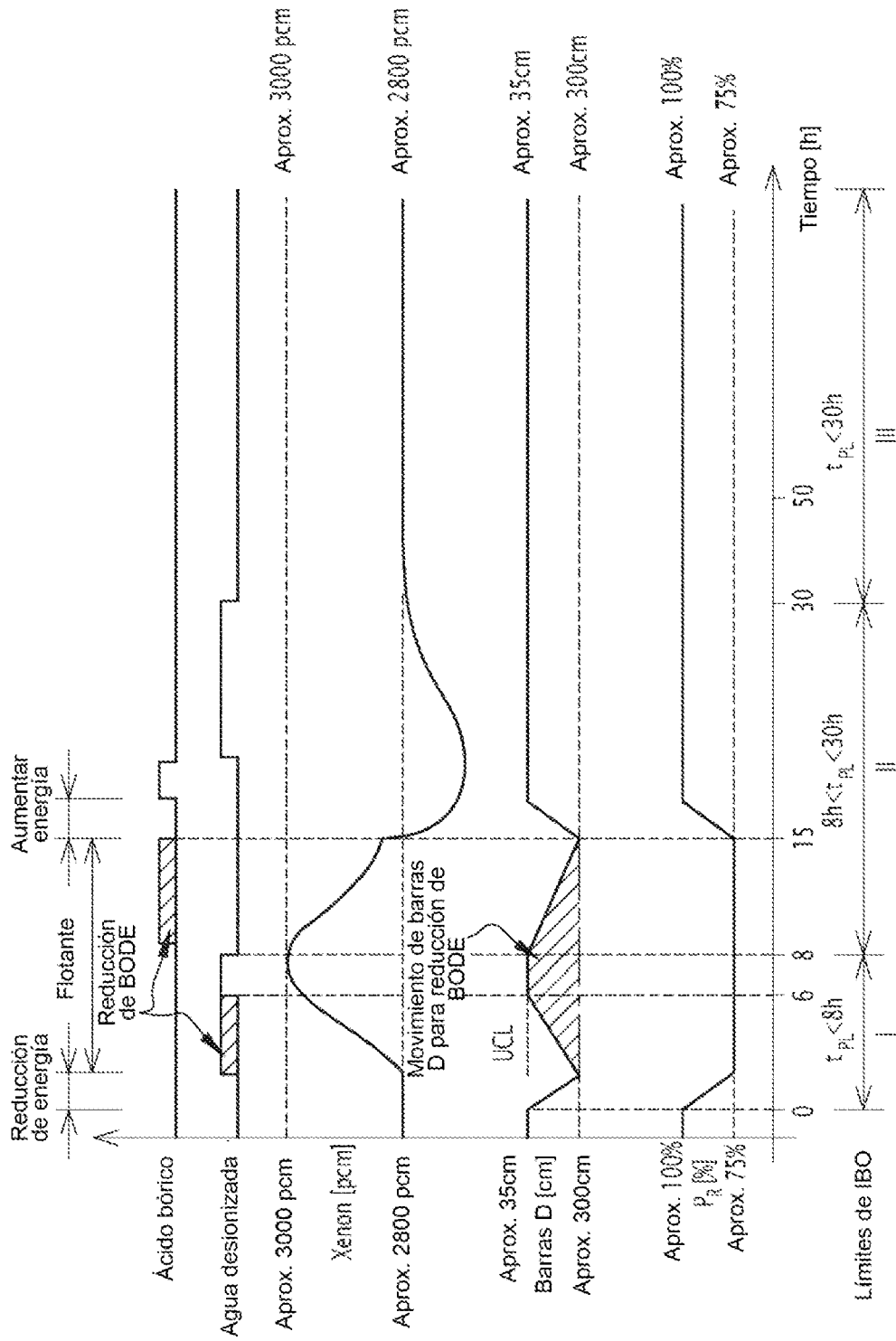
**FIG.4**



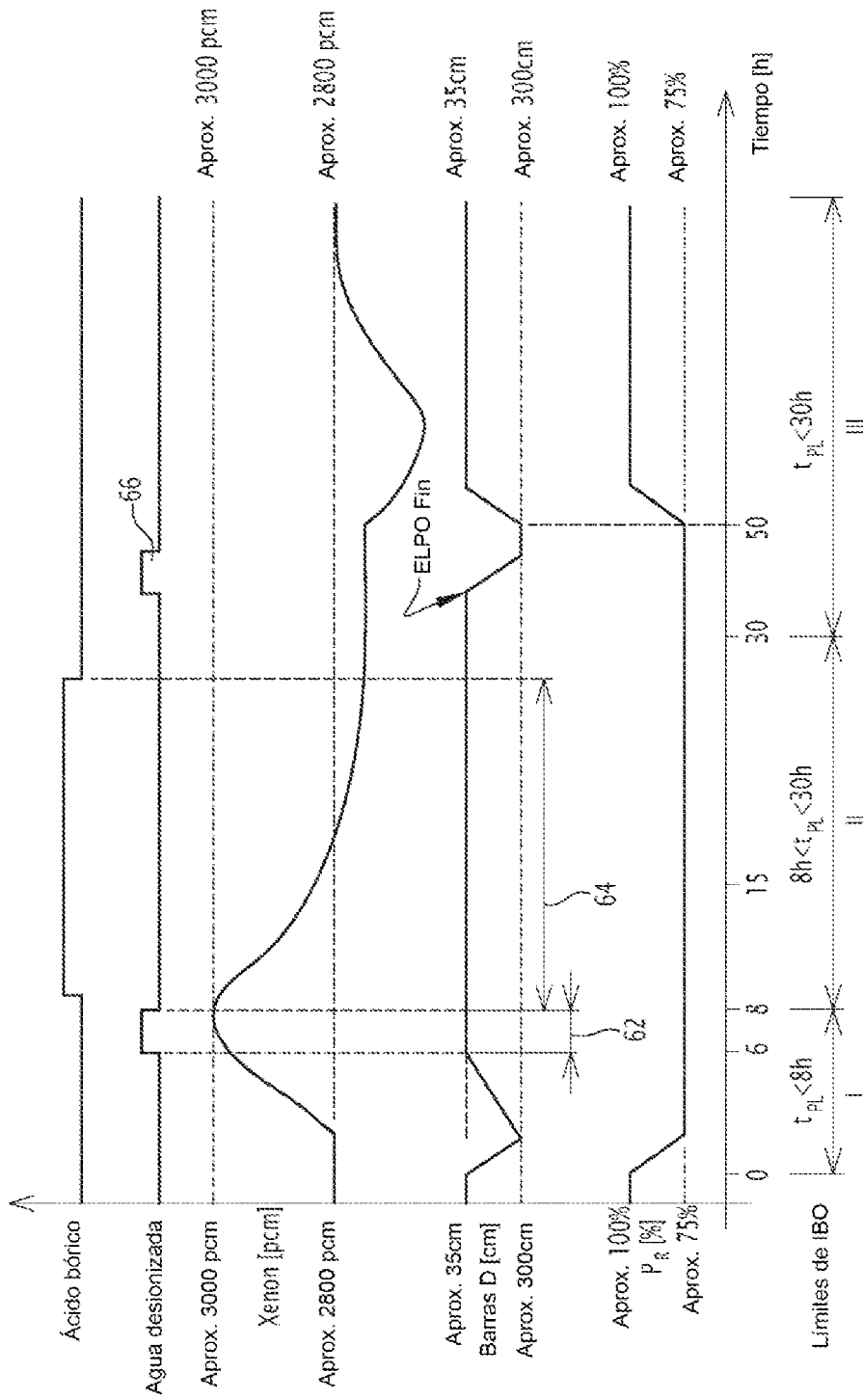
**FIG.5**



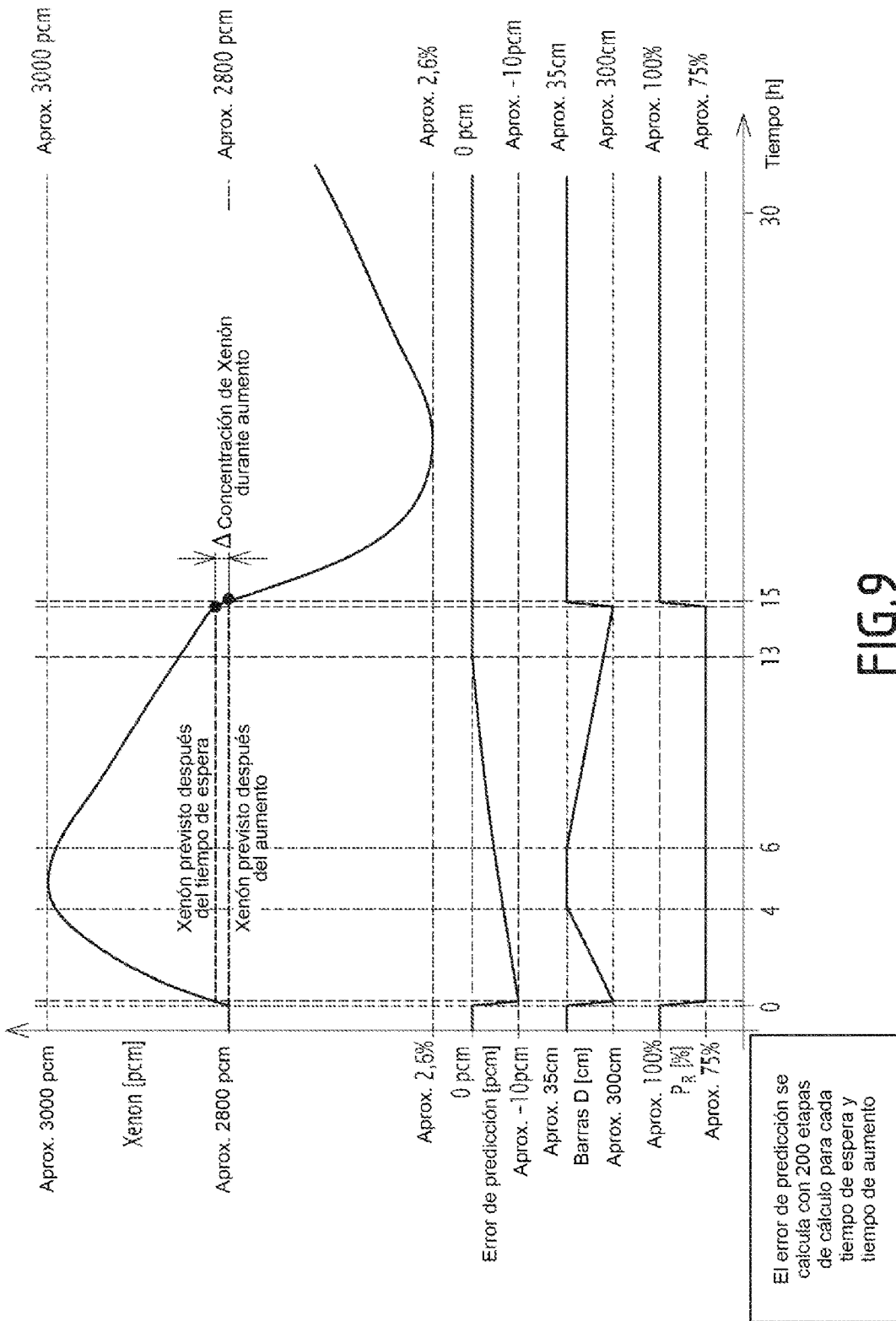
**FIG.6**



**FIG.7**



**FIG.8**



**FIG.9**

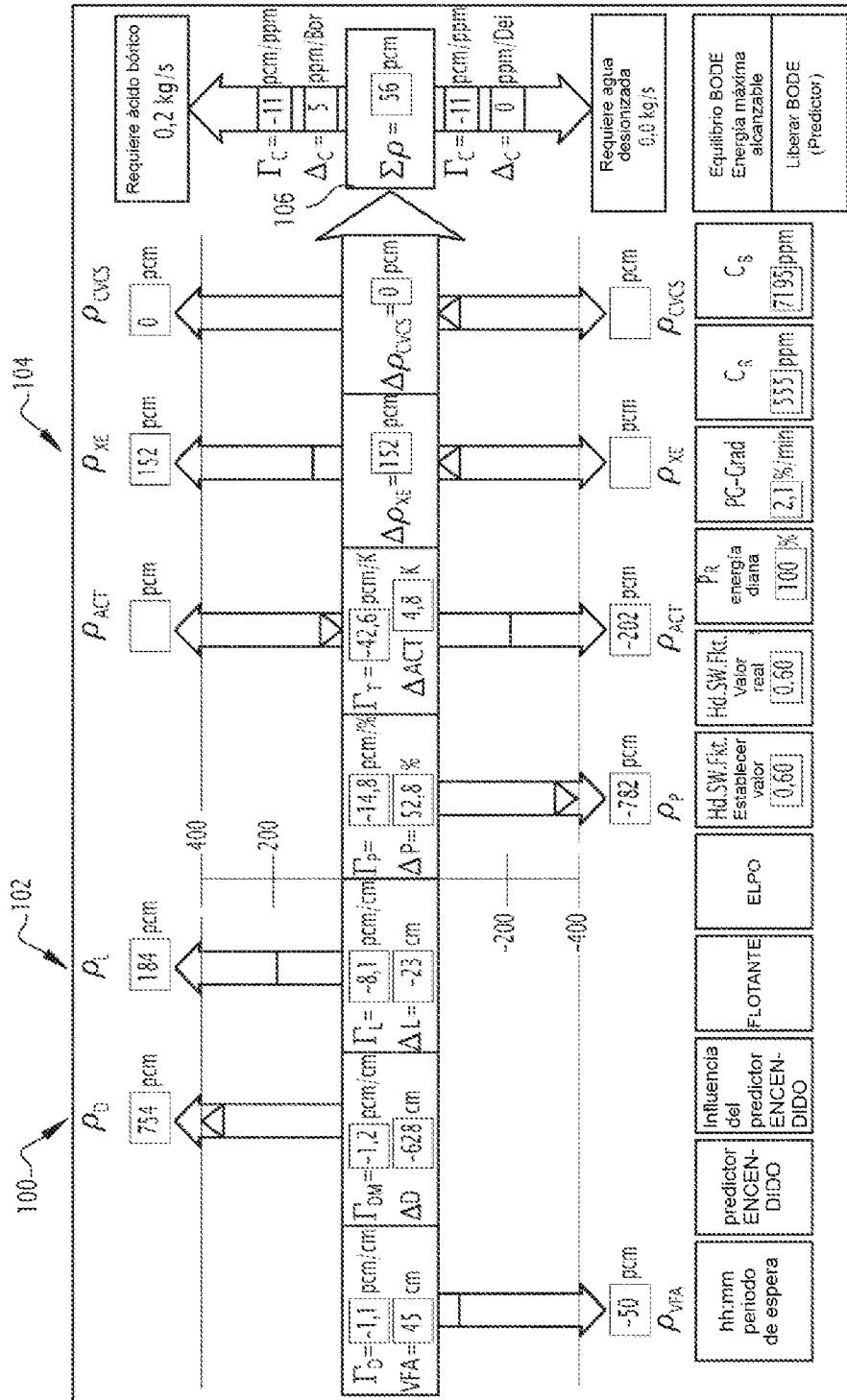


FIG.10