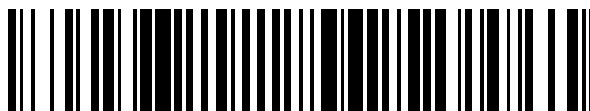


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 401 824**

51 Int. Cl.:

**G21C 17/10** (2006.01)

**G21D 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.03.2008 E 08788005 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2012 EP 2147441**

54 Título: **Procedimiento de determinación de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de un reactor nuclear**

30 Prioridad:

**19.03.2007 FR 0701965**

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

**24.04.2013**

73 Titular/es:

**AREVA NP (100.0%)  
TOUR AREVA 1 PLACE DE LA COUPOLE  
92400 COURBEVOIE, FR**

72 Inventor/es:

**GAUTIER, ANTOINE y  
DUREY, DAVID**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 401 824 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 determinación de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de un reactor nuclear.

5 La presente invención concierne a un procedimiento de determinación de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de un reactor nuclear. Ésta tiene igualmente por objeto un procedimiento de vigilancia de al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo de un reactor nuclear. La invención está más particularmente adaptada a los reactores nucleares de agua a presión.

10 En funcionamiento normal, el núcleo de un reactor nuclear debe respetar ciertas condiciones que garanticen el respeto de los criterios de seguridad en caso de accidente. Estas condiciones (denominadas de categoría 1) corresponden a las situaciones iniciales consideradas en los estudios de seguridad; rebasarlas en funcionamiento normal pone por tanto en cuestión la demostración de seguridad. La verificación en continuo del respeto de los límites de funcionamiento normal define la función "vigilancia de las condiciones preaccidentales del núcleo".

15 Estas condiciones son formuladas a partir de parámetros representativos de una solución particular de los lápices combustibles constitutivos del núcleo del reactor nuclear. A título de ejemplo pueden citarse parámetros simples como el nivel de potencia del núcleo o los factores representativos de la forma de la distribución de potencia ( $\Delta I$ ,  $F\Delta H$  etc.) pero también parámetros más elaborados como la Relación de Flujo Térmico Crítico (asociado al fenómeno de ebullición crítica) o la potencia lineal (asociada al fenómeno de fusión del combustible). La vigilancia de las condiciones preaccidentales del núcleo pasa por tanto por el cálculo de uno o varios de estos parámetros y por la comparación con un umbral predefinido, resultante de los estudios de seguridad. Por otra parte, cuando los parámetros elegidos para definir la función de vigilancia son simples, deben considerarse hipótesis penalizantes para cubrir el número importante de situaciones preaccidentales correspondientes a un valor límite de estos parámetros. La compatibilidad de estas hipótesis penalizantes con el respeto de los criterios de seguridad en los estudios de accidente impone reducir el ámbito de funcionamiento normal del núcleo del reactor. Aparece por tanto que un refinamiento de la función de vigilancia, es decir la utilización de parámetros más elaborados para definir los límites del funcionamiento normal del núcleo del reactor, permite una extensión del ámbito de funcionamiento normal del núcleo del reactor y por tanto una ganancia en explotación.

20 La contrapartida del refinamiento de la función de vigilancia es la necesidad de disponer en línea de un procedimiento de evaluación del parámetro elaborado en el cual ésta se funda. Ahora bien, esta evaluación necesita generalmente acceder a una imagen de repartición de la potencia producida en el núcleo del reactor nuclear. En este caso también, cuanto más simples son los medios utilizados para acceder a esta imagen de la repartición de la potencia en el núcleo, más importante es el conservadurismo asociado y más reducido es el ámbito de funcionamiento normal del núcleo del reactor. La mayoría de los procedimientos utilizados actualmente para vigilar los límites del funcionamiento normal del núcleo de un reactor nuclear reconstituyen una imagen de la repartición de potencia en el núcleo combinando una imagen radial en dos dimensiones y una imagen axial en una dimensión.

30 Se conocen igualmente procedimientos de reconstitución de la repartición de potencia en el núcleo en tres dimensiones.

Sin embargo, estos procedimientos necesitan la adición de instrumentación complementaria en el interior del núcleo.

40 Ejemplos conocidos de la técnica anterior están descritos en los documentos US4774049, que divulga un procedimiento de determinación de la distribución de potencia del núcleo de un reactor nuclear utilizando un método analítico ajustado periódicamente con mediciones facilitadas por detectores de medición de flujo neutrónico dispuestos en el exterior de la cuba del reactor y sondas de medición de temperatura, y el documento EP1197970, que divulga un procedimiento de determinación de la distribución de potencia del núcleo de un reactor nuclear utilizando un código de cálculo neutrónico de tipo BEACON ajustado por mediciones de la temperatura del caloportador a la salida de los ensamblajes obtenidas con la ayuda de un conjunto de termopares.

45 En este contexto, la presente invención tiene por objetivo paliar los inconvenientes antes citados y pretende facilitar un procedimiento eficiente de determinación de la distribución tridimensional de potencia del núcleo y que no necesite ninguna adición de instrumentación complementaria.

50 A tal fin, la invención propone un procedimiento de determinación de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de un reactor nuclear puesto en práctica por un dispositivo programado, comprendiendo el citado núcleo una pluralidad de ensamblajes combustibles utilizando un conjunto de detectores de medición de flujo neutrónico dispuestos al exterior de la cuba del reactor y un conjunto de sondas de medición de la temperatura del caloportador a la salida de los citados ensamblajes combustibles, comprendiendo el citado procedimiento las etapas siguientes:

55 - determinación, al cabo de un tiempo  $t_i$ , de una primera distribución tridimensional de potencia utilizando un código de cálculo neutrónico que resuelve instantáneamente la ecuación de la difusión y que actualiza el balance isotópico del núcleo en el transcurso del agotamiento del combustible, a partir de valores de parámetros de funcionamiento del reactor,

- determinación, al cabo del tiempo  $t_i$ , de una nueva distribución tridimensional de potencia por ajuste de la citada primera distribución tridimensional de potencia con mediciones facilitadas por los citados detectores de medición de flujo neutrónico dispuestos al exterior de la cuba del reactor y las citadas sondas de medición de temperatura,
- 5 - control continuo del citado cálculo neutrónico, comprendiendo el citado control las etapas siguientes:
  - o cálculo, al cabo del tiempo  $t_i$ , de una nueva distribución tridimensional de potencia corriente del núcleo a partir de valores de parámetros que caracterizan el funcionamiento corriente del reactor,
  - o cálculo, al cabo del tiempo  $t_i$ , de una nueva distribución tridimensional de potencia después del
  - 10 ajuste de uno o varios parámetros que caracterizan el funcionamiento corriente del reactor para minimizar la diferencia entre el cálculo y la medición del desequilibrio axial de potencia promediado en un conjunto de ensamblajes en la periferia del núcleo,
  - o utilización de la nueva distribución de potencia resultante del cálculo precedente, como condición inicial del cálculo neutrónico al cabo del tiempo siguiente  $t_{i+1}$ .

15 Se entiende por « instantáneamente » un cálculo neutrónico realizado en cada paso de tiempo con un paso de tiempo inferior a un minuto (del orden de 30 segundos).

20 Gracias a la invención, se puede acceder a la repartición de potencia en el núcleo a partir de una información en tres dimensiones facilitada por un cálculo neutrónico realizado en línea. Esta información es corregida por las mediciones resultantes de la instrumentación existente (termopares y sondas dispuestas al exterior de la cuba del reactor, denominados extranucleares) en los reactores de agua a presión para tener en cuenta todas las particularidades del núcleo en el momento del cálculo. El procedimiento no necesita ninguna instrumentación adicional. El resultado de esta corrección es una imagen en tres dimensiones de la distribución de potencia corriente del núcleo que sirve de base para la determinación de parámetros elaborados, limitativos del funcionamiento normal (por ejemplo la Relación de Flujo Térmico Crítico, denominado RFTC, y la potencia lineal).

25 Así, porque realiza un cálculo neutrónico en tres dimensiones de la repartición de la potencia corriente del núcleo del reactor nuclear, porque permite combinar a este cálculo en tres dimensiones la información de medición facilitada en continuo por la instrumentación existente y porque funda en el resultado de esta combinación el cálculo de un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo del reactor, y esto, en el sitio del reactor y en un tiempo compatible con las exigencias de la función de vigilancia del núcleo en línea, el procedimiento de acuerdo con la invención permite poner en práctica, con un impacto mínimo sobre el equipo del grupo nuclear, una vigilancia

30 precisa y eficiente de las condiciones preaccidentales del núcleo del reactor y por tanto obtener ganancias utilizables para una explotación optimizada del grupo nuclear.

El objetivo del control continuo del cálculo neutrónico es optimizar la representación por el código neutrónico de fenómenos transitorios que tengan un impacto directo sobre la distribución de potencia del núcleo.

35 El procedimiento de acuerdo con la invención puede igualmente presentar una o varias de las características que a continuación se indican, consideradas individualmente o según todas las combinaciones técnicamente posibles.

De acuerdo con un modo de realización preferente, la etapa de determinación de una nueva distribución de potencia comprende las etapas siguientes:

- 40 - una primera etapa de ajuste de la primera distribución de potencia calculada, siendo realizado el ajuste por una función matemática que minimiza las diferencias entre la componente axial de la distribución de potencia calculada y las mediciones facilitadas por los detectores « extranucleares » de medición de flujo neutrónico dispuestos al exterior de la cuba,
- una segunda etapa de ajuste de la primera distribución de potencia calculada, siendo realizado el ajuste por una función matemática que minimiza las diferencias entre la componente radial de la distribución de potencia calculada y las mediciones facilitadas por las sondas de medición de temperatura.

45 Preferentemente, el procedimiento de reconstrucción de acuerdo con la invención comprende una etapa de corrección periódica del modelo de núcleo en la base del código de cálculo neutrónico, comprendiendo esta corrección periódica una etapa de modificación de los parámetros intrínsecos del modelo de núcleo para minimizar las diferencias entre la distribución tridimensional de potencia calculada por el código neutrónico y la distribución tridimensional de potencia deducida de mediciones facilitadas por detectores de medición de flujo neutrónico en el interior del núcleo del reactor, denominados sondas intranucleares.

50

La presente invención tiene por objeto igualmente un procedimiento de vigilancia de al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo del reactor nuclear que comprende las etapas siguientes:

- Puesta en práctica del procedimiento de determinación de la distribución tridimensional de potencia del citado núcleo de acuerdo con la invención,
- Cálculo de al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo del reactor a partir de esta distribución tridimensional de potencia del núcleo,

5 - Cálculo de la diferencia del parámetro calculado con respecto a un umbral predeterminado.

Así, la distribución de potencia reconstruida por el procedimiento de acuerdo con la invención es utilizada como soporte del cálculo de al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo del reactor, cuyo margen con respecto a un límite predefinido puede ser restituido entonces en línea y cuya vigilancia puede permitir la activación de una alarma en caso de rebasamiento de este límite.

10 Ventajosamente, el procedimiento de vigilancia comprende una etapa de activación de una alarma en la sala de control en caso de rebasamiento del umbral por el parámetro calculado.

Ventajosamente, los parámetros limitativos del funcionamiento normal del núcleo del reactor son elegidos entre los parámetros siguientes: potencia lineal, denominada Plin, Relación de Flujo Térmico Crítico, denominado RFTC, desequilibrio axial de potencia, denominado Dpax, desequilibrio acimutal de potencia denominado Dpaz.

15 Los diferentes parámetros calculados, la distribución de potencia o también los márgenes calculados pueden igualmente ser visualizados permanentemente en una o varias pantallas de la sala de control.

La presente invención tiene igualmente por objeto un programa informático de los medios de programación para la ejecución del procedimiento de acuerdo con la invención cuando el programa informático es ejecutado en un ordenador.

20 Otras características y ventajas de la invención se pondrán de manifiesto claramente en la descripción que de ella se da a continuación, a título indicativo y en modo alguno limitativo, refiriéndose a las figuras anejas, en las cuales:

- la figura 1 representa esquemáticamente la cuba de un reactor de agua a presión que ilustra la puesta en práctica del procedimiento de acuerdo con la invención;
- la figura 2 es un esquema funcional de las diferentes etapas del procedimiento de acuerdo con la invención;

25 La figura 1 representa esquemáticamente una cuba 1 de un reactor de agua a presión.

La cuba 1 comprende un núcleo 6 provisto de ensamblajes combustibles y está equipada:

- con sondas de medición de temperatura del refrigerante (o caloportador) 3 a la salida de los ensamblajes combustibles constitutivos del núcleo (denominadas termopares en la salida del núcleo).
- con cámaras de medición del flujo neutrónico externas 4 al núcleo (denominadas cámaras extranucleares).
- con una instrumentación interna 8 al núcleo constituida por sondas intranucleares 7.

30 El procedimiento de vigilancia del núcleo de acuerdo con la invención es puesto en práctica por un dispositivo programado 5. Este procedimiento de vigilancia está fundado en el cálculo de al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo 6 del reactor a partir de una distribución en tres dimensiones (por unidad de volumen) de la potencia corriente del núcleo 6, determinada a partir de un cálculo neutrónico en tres dimensiones y de las mediciones facilitadas por la instrumentación existente en los reactores de agua a presión (REP) que son las cámaras de medición del flujo neutrónico externas 4 al núcleo y los termopares 3 en la salida del núcleo.

35 Las cámaras extranucleares 4 comprenden varias etapas de medición 4a, 4b (por ejemplo seis, estando representadas solamente dos en la figura 1) según la altura del núcleo 6 y generalmente están dispuestas en la periferia del núcleo 6, en cuatro posiciones simétricas con respecto a dos planos de simetría axial del núcleo 6 que forman entre sí un ángulo de 90 °C. Las cámaras escalonadas 4a a 4d de los detectores extranucleares permiten así obtener mediciones de flujo neutrónico a diferentes niveles según la altura del núcleo 6 y en cuatro zonas repartidas alrededor del núcleo 6 a diferentes acimuts. Las cámaras extranucleares 4 facilitan por tanto una información de naturaleza axial y acimutal sobre la distribución de potencia del núcleo 6. Se observará que la figura representa dos cámaras extranucleares 4 de dos etapas, respectivamente 4a-4b y 4c-4d pero que generalmente se utilizan cuatro cámaras extranucleares, especialmente en los reactores de potencia 1300 MWe (con seis etapas por cámara) y de potencia 900 MWe (con dos etapas por cámara).

40 Los termopares 3 en la salida del núcleo forman una red en el plano horizontal, es decir perpendicular a la altura del núcleo 6, y están implantados por encima de los ensamblajes combustibles y enfrente de estos últimos. Los termopares 3 en la salida del núcleo permiten así obtener mediciones de temperatura del refrigerante a la salida de ciertos ensamblajes combustibles constitutivos del núcleo 6 (denominados ensamblajes instrumentados). Estando

ligada la temperatura del refrigerante a la salida de los ensamblajes combustibles a la potencia nuclear producida por estos ensamblajes, los termopares 3 en la salida del núcleo facilitan entonces una información de naturaleza radial sobre la distribución de potencia del núcleo 6.

5 Para calibrar estas dos instrumentaciones 4 y 3 y proceder de modo que la salida que su respuesta sea bien representativa de los que éstas deben medir, se efectúan mediciones periódicamente con una instrumentación « intranuclear » 8 interna al núcleo, constituida por sondas intranucleares 7, que son generalmente cámaras de fisión móviles y que facilitan una información de medición en tres dimensiones. Las sondas intranucleares 7 están fijadas cada una a la extremidad de un cable flexible denominado cable teleflex que asegura su desplazamiento en el interior de una vía de medición 9. La imagen que facilitan periódicamente las sondas intranucleares 7 de la distribución tridimensional de la potencia en el núcleo 6 es denominada mapa de flujo.

10 En el procedimiento de vigilancia de acuerdo con la invención, estos mapas de flujo sirven de base para la determinación de los coeficientes de ajuste de las mediciones extranucleares y de los termopares para que éstas sean representativas respectivamente de la distribución axial de potencia periférica y de la temperatura del caloportador a la salida de los ensamblajes. Por distribución axial de potencia periférica se designa la media ponderada de las distribuciones axiales de potencia por ensamblaje en un conjunto de ensamblajes en la proximidad de la periferia del núcleo 6. El procedimiento de acuerdo con la invención puede utilizar en sustitución de esta distribución axial de potencia periférica, la magnitud de desequilibrio axial (denominado también « axial offset ») periférico que designa la media ponderada de los axial offset de potencia en un conjunto de ensamblajes en la proximidad de la periferia del núcleo 6.

15 El dispositivo programado 5 para la puesta en práctica del procedimiento de vigilancia del núcleo de acuerdo con la invención dispone por tanto de informaciones que provienen:

- de los termopares 3,
- de las cámaras extranucleares 4,
- de la instrumentación intranuclear 8.

20 El dispositivo programado 5 dispone igualmente de valores corrientes 2 de los parámetros de funcionamiento del reactor (por ejemplo la potencia térmica media del núcleo, la temperatura de entrada media del refrigerante en la cuba y la posición controlada de los grupos de control).

25 Para describir más en detalle el procedimiento de vigilancia de acuerdo con la invención, se propone en la figura 2 un esquema funcional que representa en una primera columna el encadenamiento de las etapas para la puesta en práctica del procedimiento de vigilancia de acuerdo con la invención y en una segunda columna las informaciones de medición utilizadas en cada etapa.

30 Las etapas reagrupadas en el marco 30 designan las etapas del procedimiento de reconstrucción o de determinación de la distribución de potencia por unidad de volumen (denominada también en tres dimensiones) del núcleo de acuerdo con la invención.

35 Este procedimiento de reconstrucción 30 utiliza las mediciones extranucleares 80 y las mediciones 100 de los termopares, ajustadas en los mapas de flujo por medio de coeficientes de calibrado.

Esta reconstrucción de la distribución de potencia en tres dimensiones 30 está fundada en el encadenamiento de una fase de cálculo 40 de la distribución de potencia por un código neutrónico y de dos fases de ajuste 60 y 90 de la distribución de potencia calculada con las mediciones extranucleares 80 y termopares 100.

40 La fase de cálculo de la distribución de potencia 40 pone en práctica un código neutrónico en tres dimensiones que, a partir de los valores corrientes de los parámetros de funcionamiento del reactor 50 (por ejemplo la potencia térmica media del núcleo, la temperatura de entrada media del refrigerante en la cuba y la posición controlada de los grupos de control), actualiza el balance isotópico del núcleo en el transcurso del agotamiento del combustible y resuelve en línea la ecuación de la difusión para restituir la distribución en tres dimensiones de la potencia corriente del núcleo, en forma de un conjunto de valores de potencia nuclear en diferentes puntos repartidos en el núcleo. Se puede citar a título de ejemplo el código de cálculo neutrónico SMART fundado en una modelación 3D de tipo nodal avanzado. Los principios del cálculo neutrónico de núcleo están descritos más en detalle en el documento « Méthodes de calcul neutronique de coeur » (Techniques de l'ingénieur – B 3 070 – Giovanni B. Bruna et Bernard Guesdon).

45 La primera fase de ajuste 60 de la distribución de potencia a partir de mediciones extranucleares 80 pone en práctica un proceso matemático destinado a hacer próximas las distribuciones axiales de potencia o el axial offset periféricos resultantes del cálculo y las distribuciones axiales de potencia o el axial offset periféricos medidos por las cámaras extranucleares 80 calibradas en los mapas de flujo. El algoritmo puesto en práctica difiere según que la información utilizada sea de tipo distribución axial de potencia o de tipo axial offset (estos dos términos pueden ser reagrupados en el término genérico de componente axial de la distribución tridimensional de potencia).

Si la información utilizada es del tipo distribución axial de potencia, el algoritmo utiliza un método del tipo de los “mínimos cuadrados” para restituir un vector de  $N_z$  coeficientes correctores (siendo  $N_z$  el número de mallas axiales del modelo de núcleo en la base del código de cálculo neutrónico) que hay que aplicar a la distribución axial de potencia de cada ensamblaje para minimizar las diferencias entre cálculo y medición en la distribución axial de potencia periférica. Este algoritmo es aplicado para los cuatro pares (distribuciones axial de potencia periférica calculada, distribución axial de potencia periférica medida) disponibles. Se restituyen por tanto cuatro coeficientes correctores, siendo asociado cada vector a una cámara extranuclear. La distribución axial de potencia de cada ensamblaje del núcleo es corregida después por una combinación lineal de estos cuatro vectores, siendo correlacionados los coeficientes de esta combinación lineal con la distancia del ensamblaje a las cuatro cámaras extranucleares y garantizando el respeto de la potencia media del núcleo.

Si la información utilizada es del tipo axial offset, el algoritmo restituye una función del tipo  $\sum_{i=1}^N \alpha(i) \text{sen}^i(2\pi f(z))$  que hay que aplicar a la distribución axial de potencia de cada ensamblaje para minimizar la diferencia entre cálculo y medición en el axial offset periférico. Esta función puede ser vista como un vector de  $N_z$  coeficientes correctores, donde  $N$  es el número de mallas axiales del modelo de núcleo en la base del código de cálculo neutrónico. La función  $f(z)$  que interviene en la definición de esta función correctora es parametrizable y está predefinida. Los coeficientes  $\alpha(i)$  y el rango  $N$  son obtenidos por un proceso iterativo. Este algoritmo es aplicado para los cuatro pares (axial offset periférico calculado, axial offset periférico medido) disponibles. Se restituyen por tanto cuatro vectores de coeficientes correctores, estando asociado cada vector a una cámara extranuclear. La distribución axial de potencia de cada ensamblaje del núcleo es corregida después por una combinación lineal de estos cuatro vectores, siendo correlacionados los coeficientes de esta combinación con la distancia del ensamblaje a las cuatro cámaras extranucleares y garantizando el respeto de la potencia media del núcleo.

La segunda fase de ajuste de la distribución de potencia 90 (a partir de mediciones de termopares 100) pone en práctica un proceso matemático destinado a hacer próximas las potencias medias de los ensamblajes instrumentados, tales como calculadas por el código neutrónico y tales como deducidas de las temperaturas del refrigerante medidas 100 a la salida de estos ensamblajes por los termopares calibrados en los mapas de flujo. El algoritmo utiliza un método de regresión polinómica en dos dimensiones y restituye una función correctora que hay que aplicar a la distribución axial de potencia para minimizar las diferencias entre cálculo y medición en la potencia de los ensamblajes instrumentados de termopares. Esta función correctora puede ser vista como un conjunto de  $N_{\text{ass}}$  coeficientes correctores donde  $N_{\text{ass}}$  es el número de ensamblajes del núcleo del reactor nuclear.

Este procedimiento de determinación de la distribución tridimensional de potencia 30 del núcleo de acuerdo con la invención, que se acaba de describir como el encadenamiento de una fase de cálculo 40 y de dos fases de ajuste 60 y 90, es aplicado durante el funcionamiento del reactor nuclear, con una periodicidad del orden de 30 segundos. Cada 30 segundos aproximadamente, se restituye por tanto por el procedimiento de acuerdo con la invención una distribución en tres dimensiones de la potencia corriente del núcleo del reactor. Esta distribución de potencia puede ser vista como un conjunto de  $N_{\text{ass}} \times N_{\text{cray}} \times N_z$  valores de potencia nuclear en diferentes puntos repartidos en el núcleo donde  $N_{\text{ass}}$  es el número de ensamblajes constitutivos del núcleo,  $N_{\text{cray}}$  es el número de lápices combustibles constitutivos de un ensamblaje y  $N_z$  el número de mallas axiales del modelo de núcleo en la base del código de cálculo neutrónico.

Esta nueva distribución en tres dimensiones de la potencia corriente del núcleo es utilizada para la puesta en práctica del procedimiento de vigilancia de acuerdo con la invención que permite el cálculo 110 de parámetros limitativos del funcionamiento normal del núcleo de reactor nuclear y en particular de los parámetros definidos a continuación:

- Plin: Potencia lineal, es decir la potencia por unidad de longitud de los elementos combustibles del núcleo,
- RFTC: Relación de Flujo Térmico Crítico representativo de la diferencia de las condiciones termohidráulicas del refrigerante con respecto a una situación de ebullición crítica,
- Dpax: Desequilibrio axial de potencia en el núcleo (o axial offset de potencia),
- Dpaz: desequilibrio acimutal de potencia en el núcleo (o tilt de potencia).

Los parámetros limitativos del funcionamiento normal del núcleo calculados por el procedimiento de vigilancia de acuerdo con la invención son comparados con valores límites definidos en los estudios de seguridad. Esta comparación permite calcular márgenes (etapa 120) con respecto a los valores límites y eventualmente elaborar, en caso de rebasamiento de un valor límite, una señal de alarma en la sala de control del reactor nuclear. Se observará que el cálculo de ciertos parámetros limitativos puede necesitar el conocimiento de los valores corrientes de los parámetros de funcionamiento 50 del reactor que no constituyen datos de entrada directos necesarios para el cálculo neutrónico 40 (de donde la presencia de la flecha F): éste es el caso por ejemplo del RFTC que necesita el conocimiento del caudal y de la presión que no son necesariamente datos de entrada de cálculo neutrónico 40. Los

diferentes parámetros calculados, la distribución de potencia o también los márgenes calculados pueden igualmente ser visualizados permanentemente en una o varias pantallas de la sala de control.

El procedimiento de reconstrucción 30 de acuerdo con la invención, tal como ha sido descrito hasta ahora, permite calcular en línea una distribución de potencia según la etapa 40 y ajustarla según las etapas 60 y 90 para reducir al máximo las diferencias con respecto a las mediciones 80 y 100 extranucleares y de los termopares, representativas de la distribución de potencia real del núcleo en el momento del cálculo. Esta distribución de potencia calculada, una vez ajustada con las mediciones, es por tanto representativa de las particularidades físicas del núcleo en el momento del cálculo y sirve de soporte para el cálculo 110 de los parámetros limitativos del funcionamiento normal del núcleo para los cuales los márgenes con respecto a valores límites predefinidos pueden ser evaluados después según la etapa 120.

La precisión de la distribución de potencia ajustada, es decir su conformidad con la distribución de potencia real del núcleo, necesita un control de las diferencias entre cálculo y medición utilizadas en las fases de ajuste de la distribución de potencia 60 y 90. En efecto, cuando las diferencias entre cálculo y medición están fuera de una cierta gama en la que la eficacia de los procesos de ajuste de la distribución de potencia es óptima, la precisión de la distribución de potencia ajustada se degrada. Para mantener las diferencias entre cálculo y medición en la gama de eficacia óptima de los procesos de ajuste de la distribución de potencia 60 y 90, el procedimiento de la determinación de la distribución tridimensional de potencia 30 del núcleo de acuerdo con la invención prevé la posibilidad de actuar sobre el cálculo de dos modos distintos:

- un control continuo del cálculo neutrónico 70,
- un control periódico del cálculo neutrónico 10.

El objetivo del control continuo del cálculo neutrónico 70 es optimizar la representación por el código neutrónico de fenómenos transitorios que tengan un impacto directo sobre la distribución de potencia del núcleo, especialmente las oscilaciones de la distribución de xenón en el núcleo del reactor. Este modo de control es implementado en línea en el procedimiento de acuerdo con la invención y por tanto puede ser solicitado con la misma periodicidad que la propia del proceso de reconstrucción de la distribución de potencia 30 de acuerdo con la invención descrito anteriormente (aproximadamente 30 segundos). Se trata de un proceso iterativo que se basa en una modificación del valor de uno o varios parámetros de funcionamiento utilizados en la entrada del cálculo neutrónico 50 (por ejemplo la potencia térmica media del núcleo, la temperatura de entrada media del refrigerante en la cuba o la posición controlada de los grupos de control). A cada paso del tiempo de cálculo  $t_i$ , el axial offset periférico de la distribución de potencia calculada (pero todavía no ajustada a la medición) es comparado con el axial offset periférico medido 80 por las cámaras extranucleares. Si la diferencia entre cálculo y medición en el axial offset periférico no satisface un criterio predefinido, se efectúa una modificación del valor de uno o varios parámetros de funcionamiento 50 y se realiza un nuevo cálculo neutrónico por el código con el valor modificado de este o de estos parámetros. En otras palabras, se fuerza por tanto el valor de uno o varios parámetros de funcionamiento a un valor que no sea necesariamente representativo de la seguridad. Esta operación es repetida hasta la satisfacción del criterio sobre la diferencia entre cálculo y medición en el axial offset periférico. Cuando se acaba esta iteración, la distribución de potencia se dice controlada. Esta distribución de potencia controlada es utilizada como condición inicial para el cálculo neutrónico en el paso del tiempo siguiente  $t_{i+1}$ . Conviene observar que este proceso de control 70 de la distribución de potencia calculada funciona en paralelo con el proceso de reconstrucción 30 descrito anteriormente. Dicho de otro modo, el ajuste en las mediciones 60 y 90 inherente al proceso de reconstrucción 30 es realizado en la distribución de potencia calculada con los valores no modificados de los parámetros de funcionamiento 50 utilizados en la entrada del cálculo neutrónico 40, es decir representativos de la realidad.

El objetivo del control periódico del cálculo neutrónico 10 es optimizar la representación por el código neutrónico de fenómenos estacionarios con cinética de evolución lenta y que tengan un impacto directo sobre la distribución de potencia del núcleo, especialmente los desequilibrios de agotamiento o de moderación en el interior del núcleo del reactor nuclear. Este modo de control se basa en la utilización de mapas de flujo obtenidos periódicamente a partir de las mediciones 20 realizadas por las sondas intranucleares. Así pues, este modo de control puede ser solicitado con la misma periodicidad que la propia de los mapas de flujo (típicamente del orden del mes). Se trata de un proceso iterativo que se basa en una modificación de los parámetros intrínsecos del modelo de núcleo en tres dimensiones en la base del código de cálculo neutrónico. Se entiende por parámetros intrínsecos del modelo de núcleo los parámetros que intervienen en la ecuación de la difusión. Estos parámetros son así modificados de modo iterativo hasta satisfacción de un criterio sobre las diferencias entre la distribución de potencia calculada por el código y la distribución de potencia correspondiente al mapa de flujo. Así pues, se realiza periódicamente de este modo un reajuste del código neutrónico en el mapa de flujo. Entre dos reajustes consecutivos del código neutrónico (distantes aproximadamente un mes), los cálculos neutrónicos efectuados en cada paso de tiempo para el proceso de reconstrucción 30 o el proceso de control continuo 70 descritos anteriormente utilizan los valores modificados de los parámetros intrínsecos del modelo de núcleo, tales como los obtenidos durante el último reajuste efectuado.

Los dos métodos de control del cálculo neutrónico 10 y 70 puestos en práctica en el procedimiento de acuerdo con la invención permiten por tanto garantizar un cierto nivel de conformidad de la distribución de potencia calculada con

5 la distribución de potencia real del núcleo. Este nivel de conformidad entre las distribuciones de potencia calculada y real es necesario para el mantenimiento de la eficiencia del proceso de reconstrucción de la distribución de potencia 30 cualesquiera que sean los transitorios de funcionamiento normal a los cuales es sometido el reactor (por ejemplo seguimiento de carga, telerregulación o funcionamiento prolongado a potencia reducida) o las particularidades físicas del núcleo (por ejemplo desequilibrios de agotamiento del combustible o de moderación). El proceso de reconstrucción de la distribución de potencia 30 actúa entonces como un ajuste fino de la distribución de potencia en las mediciones continuas 80 y 100 facilitadas por la instrumentación extranuclear y la instrumentación de termopares. Esta acción mixta sobre el cálculo neutrónico de los controles 10 y 70 por una parte y los ajustes 60 y 90 por otra se funda respectivamente en la robustez y la precisión de la vigilancia de las condiciones preaccidentales del núcleo del reactor realizada por el procedimiento de acuerdo con la invención.

10 Naturalmente, la invención no está limitada al modo de realización que se acaba de describir. Así, la invención ha sido descrita para cuatro cámaras extranucleares, pero el número de cámaras puede variar.

15 Además, aunque la invención ha sido descrita en particular en el caso de un reactor de agua a presión, ésta podría aplicarse a cualquier tipo de reactor que comprenda un núcleo provisto de sondas de medición de temperatura y de una instrumentación extranuclear.

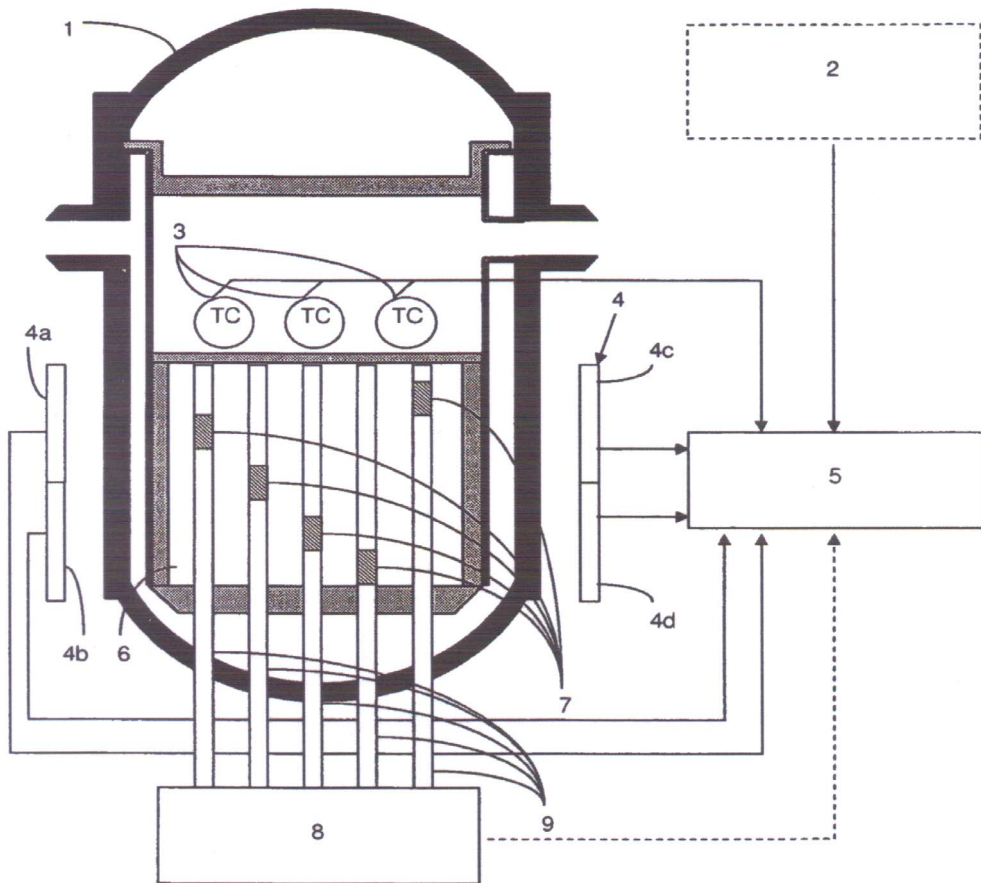
Se podrá reemplazar cualquier medio por un medio equivalente.



## REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento de determinación (30) de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de un reactor nuclear puesto en práctica por un dispositivo programado, comprendiendo el citado núcleo una pluralidad de ensamblajes combustibles, utilizando un conjunto de detectores de medición de flujo neutrónico dispuestos al exterior de la cuba del reactor y un conjunto de sondas de medición de la temperatura del caloportador a la salida de los citados ensamblajes combustibles, comprendiendo el citado procedimiento (30) las etapas siguientes:
- 10 - determinación, al cabo de un tiempo  $t_i$ , de una primera distribución tridimensional de potencia utilizando un código de cálculo neutrónico (40) que resuelve instantáneamente la ecuación de la difusión y que actualiza el balance isotópico del núcleo en el transcurso del agotamiento del combustible, a partir de valores de parámetros de funcionamiento del reactor,
- determinación, al cabo del tiempo  $t_i$ , de una nueva distribución tridimensional de potencia por ajuste (60, 90) de la citada primera distribución tridimensional de potencia con mediciones facilitadas por los citados detectores de medición de flujo neutrónico dispuestos al exterior de la cuba del reactor (80) y las citadas sondas de medición de temperatura (100),
- 15 - control continuo (70) del citado cálculo neutrónico, comprendiendo el citado control las etapas siguientes:
- 20     o cálculo, al cabo del tiempo  $t_i$ , de la distribución tridimensional de potencia corriente del núcleo a partir de valores de parámetros que caracterizan el funcionamiento corriente del reactor,
- 20     o cálculo, al cabo del tiempo  $t_i$ , de una nueva distribución tridimensional de potencia después del ajuste de al menos un parámetro que caracteriza el funcionamiento corriente del reactor para minimizar la diferencia entre el cálculo y la medición del desequilibrio axial de potencia promediado en un conjunto de ensamblajes en la periferia del núcleo,
- 20     o utilización de la citada nueva distribución de potencia resultante del cálculo precedente, como condición inicial del cálculo neutrónico al cabo del tiempo siguiente  $t_{i+1}$ .
- 25 2. Procedimiento de determinación (30) de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado porque la citada etapa de determinación de una nueva distribución de potencia comprende las etapas siguientes:
- 30 - una primera etapa de ajuste (60) de la citada primera distribución de potencia calculada, siendo realizado el citado ajuste por una función matemática que minimiza las diferencias entre la componente axial de la citada distribución de potencia calculada y las mediciones facilitadas por los citados detectores de medición de flujo neutrónico dispuestos al exterior de la cuba (80),
- una segunda etapa de ajuste (90) de la citada primera distribución de potencia calculada, siendo realizado el citado ajuste por una función matemática que minimiza las diferencias entre la componente radial de la citada distribución de potencia calculada y las mediciones facilitadas por las citadas sondas de medición de temperatura (100).
- 35 3. Procedimiento de determinación de la distribución tridimensional de potencia del núcleo de acuerdo con las reivindicaciones precedentes caracterizado porque comprende una etapa de corrección periódica (10) que comprende una etapa de modificación de los parámetros intrínsecos del modelo de núcleo, es decir los parámetros que intervienen en la ecuación de difusión, para minimizar las diferencias entre la distribución tridimensional de potencia calculada por el código neutrónico y la distribución tridimensional de potencia deducida de mediciones (20) facilitadas por detectores de medición de flujo neutrónico en el interior de la cuba del reactor, denominados sondas intranucleares.
- 40 4. Procedimiento de vigilancia de al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo de un reactor nuclear que comprende las etapas siguientes:
- 45 - Puesta en práctica del procedimiento de determinación (30) de la distribución tridimensional de potencia del citado núcleo de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3,
- Cálculo de al menos un parámetro limitativo (110) del funcionamiento normal del núcleo del reactor a partir de esta distribución tridimensional de potencia del núcleo,
- Cálculo de la diferencia (120) del citado parámetro calculado con respecto a un umbral predeterminado.
- 50 5. Procedimiento de vigilancia de acuerdo con la reivindicación 4 caracterizado porque comprende una etapa de activación de una alarma en la sala de control en caso de rebasamiento del citado umbral por el parámetro calculado.

6. Procedimiento de vigilancia de acuerdo con una de las reivindicaciones 4 o 5 caracterizado porque el citado al menos un parámetro limitativo del funcionamiento normal del núcleo del reactor es uno de los parámetros siguientes: potencia lineal, denominado Plin, Relación de Flujo Térmico Crítico, denominado RFTC, desequilibrio axial de potencia, denominado Dpax, desequilibrio acimutal de potencia denominado Dpaz.
- 5 7. Procedimiento de vigilancia de acuerdo con una de las reivindicaciones 4 a 6 caracterizado porque el citado al menos parámetro calculado, la nueva distribución de potencia o la diferencia calculada son visualizados permanentemente en al menos una pantalla de la sala de control.
8. Programa informático para la ejecución del procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 7.



**FIGURA 1**

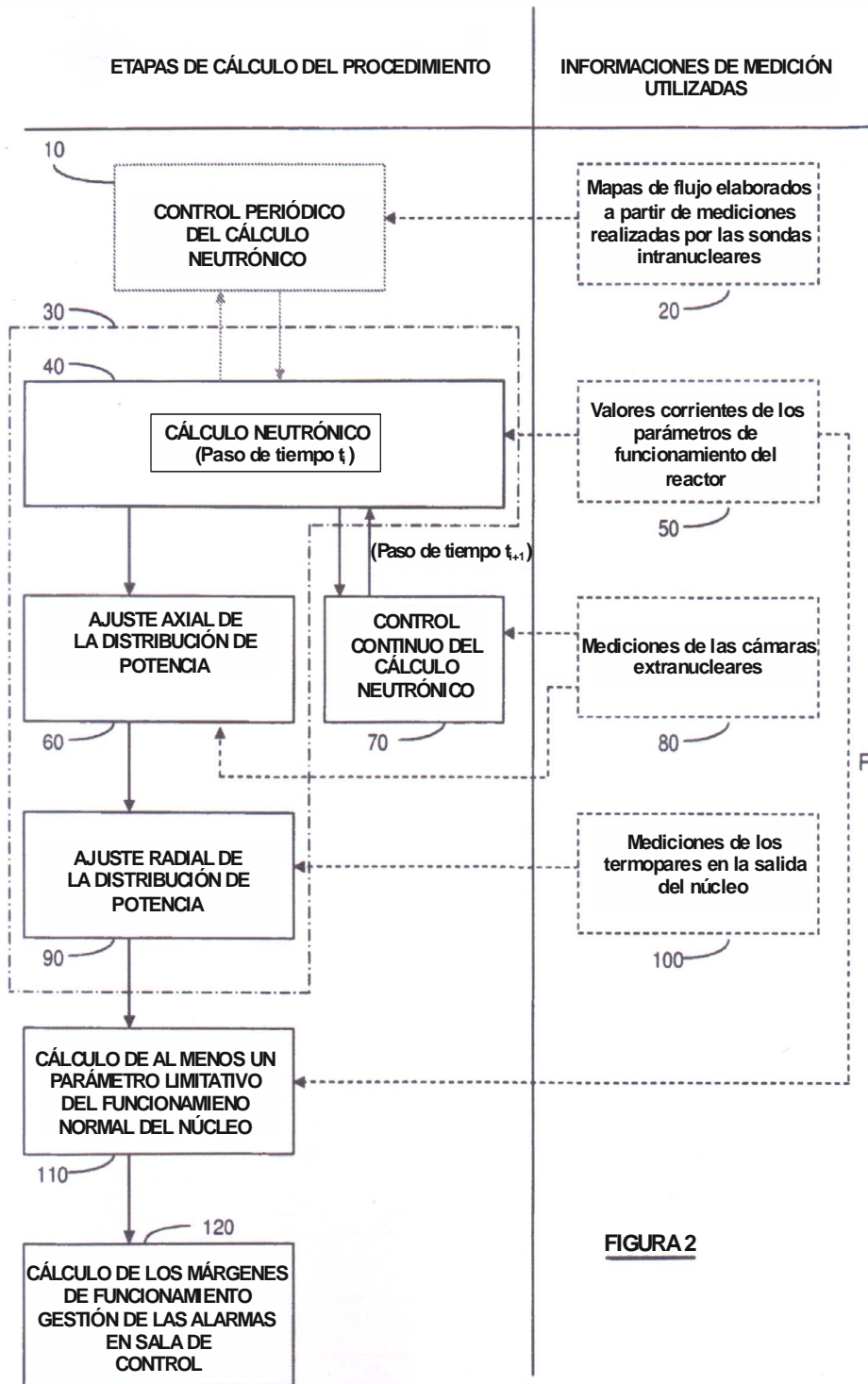


FIGURA 2