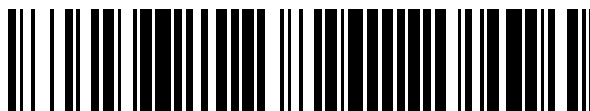


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 378 447**

51 Int. Cl.:  
**G21C 17/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **05290640 .1**
- 96 Fecha de presentación: **23.03.2005**
- 97 Número de publicación de la solicitud: **1585140**
- 97 Fecha de publicación de la solicitud: **12.10.2005**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de vigilancia del núcleo de un reactor nuclear**

30 Prioridad:  
**09.04.2004 FR 0403791**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**12.04.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**12.04.2012**

73 Titular/es:  
**AREVA NP  
TOUR AREVA 1 PLACE DE LA COUPOLE  
92400 COURBEVOIE, FR**

72 Inventor/es:  
**Vander Linden, Jean-Jacques**

74 Agente/Representante:  
**Carpintero López, Mario**

**ES 2 378 447 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 y dispositivo de vigilancia del núcleo de un reactor nuclear.

La invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo de vigilancia del núcleo de un reactor nuclear y en particular de un reactor nuclear enfriado por agua a presión.

5 Los reactores nucleares tales como los reactores nucleares enfriados por agua a presión, constan de un núcleo formado por conjuntos de combustible, por lo general de forma prismática recta, que se disponen de manera yuxtapuesta con sus ejes longitudinales en la dirección vertical, es decir, siguiendo la altura del núcleo.

10 Durante el funcionamiento del reactor nuclear, es necesario garantizar de manera permanente que el reactor funciona en perfectas condiciones y de manera conforme a las condiciones generales de seguridad fijadas por los reglamentos y las normas.

En particular, es necesario determinar si la producción y la distribución del volumen del flujo de neutrones, así como la distribución del volumen de la potencia liberada en el núcleo, son conformes a las condiciones que corresponden a un funcionamiento normal y satisfactorio del núcleo.

15 Para ello, hay que determinar y calcular unos parámetros de funcionamiento del núcleo del reactor nuclear, como la distribución del volumen de la potencia dentro del núcleo, los factores de forma del flujo neutrónico o incluso la tasa de crisis de ebullición. Estos parámetros se determinan en particular a partir de mediciones de flujo neutrónico dentro del núcleo que permiten determinar la distribución del flujo neutrónico en el conjunto del núcleo en tres dimensiones.

20 Los parámetros característicos del estado del núcleo en funcionamiento normal que se determinan a partir de las mediciones de flujo neutrónico no deben en ningún momento encontrarse fuera de los intervalos determinados en los estudios de diseño del reactor nuclear.

Cuando se detecta el rebasamiento de un valor límite mediante uno de los parámetros característicos del funcionamiento del núcleo, es necesario activar una alarma y tomar diferentes medidas relativas a la gestión del reactor nuclear.

25 Para ejercer una vigilancia eficaz sobre el funcionamiento del núcleo del reactor nuclear, es necesario determinar los parámetros físicos de funcionamiento del núcleo y la distribución de flujo neutrónico dentro del núcleo, en un tiempo tan corto como sea posible.

30 Las mediciones de flujo neutrónico dentro del núcleo necesarias para la vigilancia de forma continua del reactor nuclear en funcionamiento se realizan, por lo general, mediante unas cámaras dispuestas en el exterior del tanque del reactor y que de manera general se designan como "cámaras ex core".

Estas cámaras que constan de varias etapas de medición (por ejemplo, seis) siguiendo la altura del núcleo se disponen de manera general para realizar las mediciones en cuatro zonas en la periferia del núcleo del reactor nuclear y se sitúan de manera simétrica con respecto a dos planos de simetría axial del núcleo formando entre sí un ángulo de 90°.

35 Las cámaras por fases de los detectores ex-core permiten obtener unas mediciones de flujo en diferentes niveles siguiendo la altura del núcleo y en las cuatro zonas distribuidas alrededor del núcleo, en la dirección circunferencial. No obstante, estos dispositivos externos solo suministran unos valores aproximados del flujo neutrónico en el interior del núcleo y una representación aproximada de la distribución del flujo neutrónico. Por esta razón, los parámetros de vigilancia se obtienen de manera poco precisa y, por seguridad, se deben prever unos márgenes mayores con respecto a los valores críticos de estos parámetros que no se deben alcanzar o superar.

40 Para obtener una representación más exacta de la distribución de flujo neutrónico dentro del núcleo, se realiza, de manera complementaria, en intervalos regulares de tiempo, pero relativamente largos, por ejemplo del orden de un mes, unas mediciones de flujo neutrónico en el interior del núcleo, utilizando unas sondas de medición móviles de muy pequeñas dimensiones, denominadas "sondas in core", que están por lo general formadas por unas cámaras de fisión. Las sondas in-core se fijan cada una en el extremo de un cable flexible, denominado cable teleflex, que garantiza su desplazamiento en el interior de un canal de medición de la instrumentación del reactor nuclear. Cada uno de los canales de medición desemboca, en uno de sus extremos, en una sala de instrumentación situada en la parte baja del edificio del reactor. Se garantiza el desplazamiento de las sondas de fisión por de los canales de medición desde la sala de instrumentación. Cada uno de los canales de medición consta, en el interior del núcleo del reactor nuclear, de un tubo de instrumentación de un conjunto de combustible y de un dedo frío colocado en el interior del tubo de instrumentación por el que circula la sonda de fisión. Las mediciones de flujo neutrónico se realizan dentro de los canales de medición formados por los tubos de instrumentación de dirección vertical de un conjunto de elementos combustibles distribuidos por toda la sección del núcleo.

Se conoce por el documento US-A-3 932 211 un procedimiento de vigilancia de un núcleo de reactor nuclear por

medio de sondas in core.

Por ejemplo, en el caso de un núcleo que consta de ciento setenta y siete conjuntos de combustible, se utilizan por lo general cincuenta y seis canales de medición. Se utilizan cincuenta y ocho canales de medición para un núcleo de ciento noventa y tres conjuntos de combustible, cuarenta y ocho o cincuenta canales de medición para un núcleo de ciento cincuenta y siete conjuntos de combustible, y sesenta canales de medición para un núcleo de doscientos cinco conjuntos de combustible.

Las mediciones de flujo neutrónico se realizan durante el desplazamiento a baja velocidad de las sondas in-core móviles siguiendo toda la altura del núcleo. Se pueden realizar de este modo numerosos puntos de medición del flujo neutrónico siguiendo la altura del núcleo, con un pequeño intervalo. Se pueden realizar, por ejemplo, las mediciones de seiscientos puntos distribuidos siguiendo la altura de cada uno de los canales de medición. Por otra parte, teniendo en cuenta la distribución de los conjuntos de combustible instrumentados dentro del núcleo y las simetrías del núcleo, se obtiene una imagen lo suficientemente representativa del flujo neutrónico, en forma de un mapa de flujo. La determinación precisa del mapa del flujo solo se realiza de forma periódica utilizando las sondas móviles, en el caso de los procedimientos de explotación conocidos.

Se conocen, por otra parte, unas sondas de medición de flujo neutrónico que se pueden colocar y mantenerse en el interior del núcleo del reactor nuclear de forma permanente durante el funcionamiento del reactor nuclear. Este tipo de sondas de medición de flujo neutrónico que se pueden realizar en forma de "colectrones" están por lo general ensambladas en forma de bastones de medición en una disposición alineada verticalmente con un espacio constante entre dos cámaras sucesivas, para formar unos detectores de medición de flujo siguiendo toda la altura del núcleo del reactor nuclear. Estos bastones se introducen cada uno en un dedo frío normalmente asignado a la medición por una sonda móvil y se insertan en un canal de medición formado por un tubo de instrumentación de un conjunto de combustible. Cada uno de los detectores de medición de flujo o bastones de medición cuya longitud es prácticamente igual a la altura del núcleo puede constar, por ejemplo, de ocho sondas de medición formadas por unos colectrones.

Con el objetivo de optimizar los rendimientos de las centrales nucleares, para reducir los costes de producción, se puede realizar la vigilancia en tres dimensiones y de forma continua de la potencia nuclear producida por el reactor, lo que permite calcular de manera precisa los parámetros de vigilancia y tener en cuenta de la mejor manera posible los valores críticos de estos parámetros.

La vigilancia de la potencia producida por el reactor nuclear utilizando un sistema de instrumentación interno fijo que consta de unos bastones y de unas sondas de medición formadas por unos colectrones permite obtener unos resultados satisfactorios. Sin embargo, para reducir los tiempos de tratamiento de tal modo que se puede vigilar el reactor en todas sus fases de funcionamiento, se han propuesto, por ejemplo en las patentes francesas FR-2.796.196 y FR-2.796.197, unos procedimientos en los que solo se utiliza, para la vigilancia continua del reactor nuclear, un número reducido de bastones de medición con respecto al número de canales de medición de la instrumentación móvil manteniendo al mismo tiempo una precisión suficiente en la determinación de la distribución del flujo neutrónico para la vigilancia del núcleo a partir de un código de cálculo que tiene en cuenta las mediciones de la instrumentación fija.

Las sondas de medición de flujo neutrónico que se utilizan más a menudo en los bastones de medición de la instrumentación interna fija son los colectrones a base de rodio. Por efecto de la radiación neutrónica en el interior del núcleo del reactor nuclear, los colectrones producen una corriente eléctrica de intensidad directamente proporcional a la densidad del flujo neutrónico. Estos colectrones no necesitan alimentación eléctrica externa.

La instrumentación interna fija se debe calibrar, ya sea utilizando otra instrumentación interna (por ejemplo la instrumentación interna que incluye las sondas móviles), ya sea de manera absoluta determinando en todo momento la sensibilidad de los colectrones. Este último método de calibrado requiere el cálculo de la integral de la corriente eléctrica que fluye por cada uno de los colectrones.

La sensibilidad de un colectrón evoluciona con el tiempo. Por efecto de la radiación neutrónica, la cantidad de rodio contenida en un transmisor de colectrón se reduce (aproximadamente un 1 % por mes equivalente de funcionamiento del reactor a plena potencia). Es necesario, por lo tanto, aportar unas correcciones a la señal del colectrón a lo largo del tiempo para tener en cuenta este agotamiento. Estas correcciones se deben, a la vez, al cambio de la concentración en rodio y al efecto de pantalla del producto de desintegración del rodio activado, que es el paladio.

El seguimiento de la evolución de la sensibilidad de un colectrón para el cálculo de la integral de la corriente eléctrica que fluye por este colectrón solo se realiza con un cierto error que se debe, en particular, a la sensibilidad limitada del sistema de medición. El sistema de medición no puede detectar en particular los bajos niveles de corriente eléctrica correspondiente a unas bajas densidades de flujo neutrónico.

Debido a la reducción de concentración en rodio durante el funcionamiento del reactor, los colectrones tienen una vida útil limitada (del orden de 7 años) y, por consiguiente, se deben sustituir. La operación de sustitución requiere la extracción, por la parte de arriba del tanque del reactor, de unos bastones de medición formados por los colectrones

y los dedos fríos que contienen estos bastones. Los bastones se almacenan de manera temporal en el lugar del reactor nuclear y a continuación deben volver a ser tratados.

Las operaciones de extracción, de almacenamiento y de un nuevo tratamiento de los bastones de medición generan unos costes suplementarios en el marco de la explotación del reactor nuclear.

- 5 En el caso en el que se utilice una instrumentación interna fija para la vigilancia del núcleo, es necesario, por lo tanto, realizar numerosas operaciones de control y de calibrado de los colectores para garantizar una buena precisión de las mediciones y se debe hacer frente a unos costes suplementarios de mantenimiento y de sustitución de los colectores. Además, la instrumentación interna que utiliza unas sondas móviles debe en cualquier caso aplicarse de manera periódica, lo que también implica unos costes de mantenimiento de este sistema de instrumentación móvil. La instrumentación interna de sondas móviles, que permite realizar unas mediciones de flujo neutrónico con una muy buena precisión y que presenta una gran rapidez de ejecución y una gran flexibilidad, no se ha utilizado hasta ahora para las operaciones de vigilancia continua del núcleo de un reactor nuclear.

15 El objetivo de la invención es, por lo tanto, proponer un procedimiento de vigilancia del núcleo de un reactor nuclear formado por una pluralidad de conjuntos de combustible dispuestos de manera yuxtapuesta siguiendo una dirección vertical del núcleo del reactor nuclear que consta de un sistema de instrumentación interna de sondas móviles, que constan de una primera pluralidad de sondas de medición de flujo neutrónico fijadas cada una en el extremo de un cable de desplazamiento y de transmisión de medición y de unos medios de introducción y de desplazamiento de las sondas por medio de los cables a los que estas están fijadas, en una segunda pluralidad de canales de medición que se extienden siguiendo toda la altura del núcleo, cada una en el interior de un conjunto de combustible, en la dirección vertical, la vigilancia del núcleo realizándose por comparación con al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo que se obtiene por uno al menos de los métodos siguientes: determinación a partir de magnitudes físicas medidas dentro del núcleo, cálculo mediante un modelo numérico del núcleo, con al menos un valor de umbral predeterminado y emisión de una alarma en el caso de que el parámetro crítico supere un umbral, este procedimiento de vigilancia presentado una buena precisión y una gran flexibilidad, sean cuales sean las fases de funcionamiento del reactor nuclear, limitando al mismo tiempo los costes de explotación y de mantenimiento del reactor nuclear debidos a la aplicación de la vigilancia del núcleo.

Con este objetivo, durante el funcionamiento del reactor nuclear, en el caso de que se compruebe que el parámetro crítico se aproxima a un valor umbral o que su valor determinado a partir de las mediciones físicas se aleja de su valor calculado a partir del modelo:

- 30 – se introduce, en al menos un canal de medición, al menos una sonda móvil;  
 – se desplaza la sonda móvil siguiendo la altura del canal de medición;  
 – se realizan una pluralidad de mediciones de flujo neutrónico en unos puntos separados siguiendo la altura del canal de medición;  
 – se calcula el parámetro crítico teniendo en cuenta las mediciones de flujo neutrónico; y  
 35 – se compara el parámetro con el valor umbral.

De acuerdo con unas modalidades más particulares que se puede realizar solas o de manera combinada:

- 40 – antes de realizar una pluralidad de mediciones de flujo neutrónico por medio de al menos una sonda de medición móvil, se realiza un calibrado de al menos una sonda de la primera pluralidad de sondas móviles, estimando los factores  $k_s$  y  $\Phi_{in}(0)$  en la relación  $\Phi_{in} = \Phi_{in}(0) + k_s I_s$ , en la que  $I_s$  es la intensidad de la corriente eléctrica de ionización que circula por la sonda por efecto del flujo neutrónico,  $\Phi_{in}$  y  $\Phi_{in}(0)$  es el umbral de detección de la sonda, mediante el paso de la sonda por un canal de medición de un conjunto de calibrado, cálculo del flujo neutrónico mediante  $\Phi_{in}$  en un conjunto de calibrado y medición de una corriente de la sonda introducida en el conjunto de calibrado.  
 45 – se realiza el intercalibrado de las sondas móviles de la primera pluralidad de sondas de medición de flujo neutrónico mediante el paso de las sondas por unos conjuntos de combustible nuevos de los que se conoce la tasa de enriquecimiento del combustible, para determinar unos coeficientes de sensibilidad relativa de las sondas móviles de la primera pluralidad de sondas.  
 – en el caso en el que se realice el cálculo de al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo a partir de al menos un modelo numérico del núcleo, se utilizan, para los cálculos un primer modelo numérico del núcleo denominado modelo lento durante las fases de funcionamiento del reactor en el estado estacionario y un segundo modelo numérico denominado modelo rápido, en el caso en el que se prevea un funcionamiento transitorio del núcleo del reactor nuclear con una variación rápida de la distribución del flujo neutrónico dentro del núcleo del reactor, y se realiza una corrección de parámetros del modelo numérico aplicado, a partir de las mediciones de flujo neutrónico dentro del núcleo del reactor nuclear que se obtienen mediante las sondas móviles de medición de flujo neutrónico.  
 50 – se realiza la adquisición de las mediciones de flujo neutrónico dentro del núcleo por medio de las sondas móviles durante campañas de mediciones que se inician mediante uno de los procedimientos siguientes:  
 55 . de manera automática, en función de la distancia constatada entre la medición de un desequilibrio axial de potencia dentro del núcleo determinado a partir de las magnitudes físicas medidas dentro

- del núcleo y el valor del desequilibrio axial de potencia calculado por el modelo numérico;
- de manera automática, cuando al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo tiene un valor próximo al valor umbral;
- de manera manual mediante un operario que ha estimado la necesidad de que intervenga el sistema de instrumentación interno con sondas móviles.

- 5
- el modelo numérico lento del núcleo del reactor nuclear consta de un número de nodos al nivel de los que se calcula el flujo neutrónico en el interior del núcleo por los canales de medición del núcleo del reactor nuclear superior al número de nodos del modelo numérico rápido al nivel de los cuales se calcula el flujo neutrónico dentro del núcleo del reactor nuclear en el interior de los canales de medición.
  - para realizar la vigilancia del núcleo sin utilizar cálculos basados en un modelo numérico del núcleo, se calcula al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo del reactor a partir de las magnitudes físicas medidas dentro del núcleo del reactor nuclear y se corrigen los valores de al menos un parámetro crítico de funcionamiento calculado a partir de las mediciones de flujo neutrónico realizadas dentro del núcleo por el sistema de instrumentación interno con sondas móviles.
  - se realiza la corrección de los valores del parámetro crítico de funcionamiento del núcleo del reactor nuclear mediante unas pasadas sucesivas de las sondas móviles por los canales de medición del núcleo del reactor nuclear.
  - se determinan, en cada una de las pasadas sucesivas de las sondas de la primera pluralidad de sondas móviles por los canales de medición, los valores máximos del flujo neutrónico en los canales de medición distribuidos por la sección transversal del núcleo y la posición en la sección transversal del núcleo, del baricentro de los valores máximos de flujo utilizados como coeficientes de ponderación, se determina la posición exacta del baricentro de los valores máximos de flujo mediante aproximaciones sucesivas a partir de las posiciones de baricentros determinadas al término de las pasadas de las sondas sucesivas y de mediciones de flujo neutrónico en el interior de canales de medición distribuidos por el plano transversal del núcleo, alrededor de un canal de medición próximo a un baricentro determinado de forma previa y se asimila la posición de un canal caliente de circulación del fluido de refrigeración en la posición exacta del baricentro.
  - se realiza la vigilancia del núcleo mediante unas mediciones de flujo neutrónico por medio del sistema de instrumentación interna de sondas móviles en el interior de un canal de medición, el más cercano al canal caliente, determinado por las pasadas sucesivas previas de las sondas móviles por los canales de medición del núcleo del reactor nuclear.

La invención también se refiere a un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 11, un ejemplo de un dispositivo de vigilancia del núcleo de un reactor nuclear formado por una pluralidad de conjuntos de combustible dispuestos de manera yuxtapuesta siguiendo una dirección vertical del núcleo del reactor nuclear que consta de un sistema de instrumentación interna de sondas móviles, que consta de una primera pluralidad de sondas de medición de flujo neutrónico fijadas cada una en un extremo de un cable de desplazamiento y de transmisión de medidas y de unos medios de introducción y de desplazamiento de las sondas por medio de los cables a los que estas están fijadas, en una segunda pluralidad de canales de medición que se extienden siguiendo toda la altura del núcleo, cada uno en el interior de un conjunto de combustible en la dirección vertical, la vigilancia del núcleo del reactor realizándose por comparación con al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo que se obtiene mediante uno al menos de los métodos siguientes: determinación a partir de magnitudes físicas medidas dentro del núcleo, cálculo mediante un modelo numérico del núcleo, con al menos un valor umbral predeterminado, que se caracteriza por el hecho de que consta de:

- un sistema de instrumentación interna de sondas móviles del reactor nuclear;
- una herramienta de análisis de mapas de flujo neutrónico del núcleo del reactor nuclear;
- una unidad de adquisición de datos físicos del núcleo;
- unos medios de cálculo de al menos un parámetro crítico del núcleo del reactor nuclear a partir de valores del flujo neutrónico medidos dentro del núcleo del reactor nuclear mediante la instrumentación interna de sondas móviles y tratados con la herramienta de análisis de mapas de flujo neutrónico.

De preferencia, los medios de cálculo utilizan al menos un modelo numérico de cálculo de flujo neutrónico dentro del núcleo y al menos un algoritmo de corrección del modelo numérico conectado a una unidad de comparación de valores de flujo neutrónicos dentro del núcleo del reactor nuclear calculados mediante el modelo numérico y unos valores de flujo neutrónico medidos mediante el sistema de instrumentación interno con sondas móviles.

Para que se entienda bien la invención, se va a describir a continuación, a título de ejemplos, en referencia a las figuras que se adjuntan como anexo, la puesta en marcha del procedimiento de la invención en diferentes fases de funcionamiento de un reactor nuclear de agua a presión.

La figura 1 es una vista esquemática del conjunto del sistema de instrumentación interna que se utiliza en el marco de la invención.

La figura 2 es un esquema funcional que muestra las diferentes tareas que se realizan durante la aplicación del procedimiento de acuerdo con la invención, en varias fases de funcionamiento del reactor nuclear.

En la figura 1, se ha representado de manera esquemática el núcleo 1 del reactor nuclear, en forma de una sección transversal del núcleo que consta de unos conjuntos de combustible 2 de forma paralelepípedica con base cuadrada.

5 En algunos de los conjuntos de combustible 2' distribuidos en la sección del núcleo 1 que se han marcado con una cruz en la figura 1, el tubo de instrumentación dispuesto en la parte central del conjunto de combustible se utiliza como canal de medición para el desplazamiento de una sonda móvil siguiendo la altura del núcleo. Cada uno de los tubos de instrumentación de los conjuntos de combustible 2' denominados conjuntos instrumentados está conectado a un conducto de instrumentación 3 del sistema de instrumentación interna de sondas móviles designado de manera general por la referencia 4 (sistema RIC).

10 Los conductos de instrumentación 3 del sistema RIC cuya parte del extremo terminal vertical en el interior del núcleo está formada por el tubo de instrumentación de un conjunto de combustible atraviesan el recinto de contención 5 del reactor nuclear y constan de un primer extremo que penetra dentro del tanque del reactor nuclear encerrando el núcleo 1 (por lo general por el fondo inferior del tanque) y un segundo extremo opuesto que penetra dentro de una sala de medición 6 dispuesta cerca del edificio del reactor.

15 Por ejemplo, en el caso de un núcleo 1 de un reactor nuclear con una potencia de 1.300 MWe que consta de ciento noventa y tres conjuntos de combustible, tal y como se representa en la figura 1, el sistema de instrumentación interna RIC puede constar de cincuenta y ocho conductos de instrumentación 3 que comunican cada uno con un tubo de instrumentación de uno de los cincuenta y ocho conjuntos instrumentados 2' distribuidos dentro del núcleo del reactor 1. Cada conducto de instrumentación 3 que forma un canal de medición consta de un extremo opuesto al extremo que penetra por el fondo del tanque introducido en la sala de instrumentación 6' (la sala de instrumentación 20 6' está situada en el interior del edificio del reactor) de tal modo que pueda recibir un dedo frío que se puede maniobrar desde la sala de instrumentación 6' para desplazarse en el interior del conducto de instrumentación, de tal modo que el dedo frío cuyo extremo introducido dentro del conducto está cerrado se pueda colocar dentro del tubo de instrumentación de un conjunto de combustible instrumentado, en toda la altura del núcleo o, por el contrario, se pueda extraer del núcleo (para realizar, por ejemplo, la recarga del núcleo del reactor nuclear).

25 En la sala de instrumentación 6', se dispone de sondas móviles formadas cada una por una cámara de fisión de pequeñas dimensiones fijada en el extremo de un cable de desplazamiento que se puede introducir y desplazar en el interior de un dedo frío, en particular para realizar unas mediciones de flujo neutrónico siguiendo toda la altura del núcleo del reactor nuclear en funcionamiento mediante el desplazamiento en el interior de la parte del dedo frío introducida dentro del tubo de instrumentación vertical de un conjunto de combustible instrumentado.

30 El cable al que está fijada la sonda móvil está conectado, en el interior de la sala de los ordenadores 6, a un calculador particular 7 que recibe de este modo las señales representativas de las mediciones de flujo. El calculador 7, que se denomina calculador RIC, garantiza un tratamiento de las señales de medición de flujo neutrónico que se utilizarán para establecer unos mapas de flujo representativos de la distribución del flujo neutrónico dentro del núcleo del reactor nuclear.

35 En el interior de la sala de instrumentación 6', también está dispuesto un conjunto 7' de medios de desplazamiento de las sondas de medición por los canales de instrumentación y de medios de selección de los canales, estos medios 7' controlándolos el calculador RIC 7.

40 En el caso de un reactor nuclear con una potencia de 1.300 MWe se utilizan, por lo general, seis sondas de medición que se pueden introducir y desplazar en el interior de los conductos de instrumentación (por ejemplo 58 conductos).

En el caso de un reactor nuclear con una potencia de 900 MWe, se utilizan, por lo general, cinco sondas de medición móviles que se pueden introducir dentro de uno de los cuarenta y ocho conjuntos instrumentados que constan cada uno de un tubo de instrumentación que forma un canal de medición en el interior del núcleo.

45 El calculador RIC 7 está conectado a dos ordenadores de tratamiento 8 y 9 que funcionan de manera redundante, uno de los ordenadores estando en modo activo de funcionamiento y el segundo ordenador en espera para estar listo para continuar con las tareas realizadas por el ordenador en modo activo, en el caso de un fallo de este primer ordenador. Los ordenadores 8 y 9 están conectados entre sí en todo momento.

50 Los ordenadores 8 y 9 reciben de manera simultánea, en tiempo real, los datos que provienen de una unidad 10 de adquisición de datos físicos relativos al núcleo del reactor nuclear y del calculador 7 garantizando la transmisión de las mediciones de flujo, la selección de los canales de medición y el control de los desplazamientos de las sondas de medición dentro del núcleo del reactor nuclear.

55 La unidad de adquisición de los datos físicos 10 está conectada a unos sensores que permiten en particular medir de manera continua las magnitudes físicas representativas del estado del núcleo. En particular, estas magnitudes físicas pueden ser las siguientes:

- flujo medido por las cámaras ex-core  $\Phi_{ex}$ ;

- temperatura del fluido de refrigeración a la salida del núcleo;
  - temperatura del fluido de refrigeración a la entrada en el núcleo;
  - posición de los haces de control de reactividad dentro del núcleo;
  - potencia térmica del núcleo P<sub>th</sub>;
- 5 – caudal de fluido de refrigeración primario,

esta lista no siendo exhaustiva.

10 Cada uno de los ordenadores redundantes 8 y 9 también está conectado a una estación de trabajo respectiva 8' y 9' que recibe los datos relativos a la medición de flujo neutrónico, transmitidos y pretratados por los ordenadores 8 y 9. Cada una de las estaciones de trabajo 8', 9' consta de un ordenador en el que se instala un programa de análisis de los mapas de flujo neutrónico representativos de las mediciones realizadas dentro del núcleo y de los medios de cálculo de los parámetros críticos de funcionamiento del núcleo del reactor nuclear a partir de los valores del flujo, así como de los medios de visualización de los resultados. Los programas de los medios de cálculo se aplican de manera simultánea en las dos estaciones de trabajo 8' y 9'.

15 El conjunto formado por el calculador RIC 7 y el armario de control y de mando de los medios 7' de desplazamiento y de selección que contiene la sala de instrumentación 6' se realiza de tal modo que se pueda realizar la adquisición de medición en tiempo real a gran velocidad durante el desplazamiento de la sonda por los canales de medición del núcleo 1 del reactor nuclear, por ejemplo a una velocidad del orden de 18 m/min.

20 Se va a describir a continuación, haciendo referencia a la figura 2, la aplicación del procedimiento de la invención para realizar la vigilancia del funcionamiento del núcleo de un reactor nuclear y en diferentes fases del funcionamiento.

Se va a indicar, en primer lugar, a continuación la clase de los elementos expuestos en el esquema funcional de la figura 2 que representan, con las referencias numéricas dadas, unos medios o unas etapas que se utilizan durante la aplicación del procedimiento de acuerdo con la invención:

- 25 11: código de cálculo de un modelo numérico del núcleo del reactor nuclear utilizado durante unas fases de evolución lenta del reactor en un estado prácticamente estacionario.
- 11': código de cálculo de un modelo numérico del núcleo del reactor nuclear durante unas fases de evolución rápida de la situación rápida de la situación del núcleo del reactor nuclear.
- 11'': herramienta de análisis de los mapas de flujo neutrónico.
- 12: unidad de adquisición de datos relativos a unos parámetros físicos del núcleo.
- 30 13: determinación de las diferencias entre los valores medidos y calculados de los parámetros físicos del núcleo y en particular del flujo neutrónico ex core.
- 14: determinación de las diferencias entre los valores medidos y calculados del desequilibrio axial de potencia del núcleo.
- 15: instrumentación interna móvil (RIC).
- 35 16: cálculo de parámetros críticos y comparación con los valores umbral.
- 16': cálculo aproximado de los parámetros críticos a partir de los datos de tramos (parámetros físicos del núcleo).
- 17: corrección del modelo numérico lento en tiempo real en función de las diferencias de flujo ex core.
- 40 18: corrección del modelo numérico lento en función de las mediciones in-core por medio de sondas móviles.
- 18': corrección del modelo numérico rápido en función de las mediciones in-core por medio de sondas móviles.
- 19: determinación de las diferencias entre los valores del flujo in-core calculados y medidos mediante la instrumentación interna de sondas móviles.
- 45 20: control manual de la instrumentación interna móvil.
- 21: comparación de los parámetros críticos con sus valores umbral.

Los cinco parámetros característicos de la distribución de potencia dentro del núcleo que hay que vigilar de manera permanente y de la forma más precisa posible son los siguientes (sin orden de importancia):

- 50 1. El desequilibrio axial de potencia (AO - Axial Offset).

$$AO = \frac{P_H - P_B}{P_H + P_B}$$

P<sub>H</sub> y P<sub>B</sub> siendo las potencias respectivamente producidas por las partes altas y bajas del núcleo.

- 55 2. El factor de punto caliente F<sub>Q</sub>

Para el conjunto del núcleo, es la tasa de potencia lineal máxima producida en la potencia lineal media.

3. El factor de elevación de entalpía  $F_{\Delta H}$

Para el conjunto del núcleo, es la relación del aumento máximo de entalpía del refrigerante dentro de un canal (espacio situado entre las barras de combustible) y el aumento medio de entalpía por canal.

4. La tasa de crisis de ebullición (DNBR - Departure from Nucleate Boiling Ratio).

$$DNBR = \frac{\text{Flujo Térmico Crítico}}{\text{Flujo Térmico Local}}$$

5

5. La potencia lineal máxima.

A continuación se va a describir el procedimiento de vigilancia de acuerdo con la invención haciendo referencia a las figuras 1 y 2.

10 La vigilancia del núcleo se basa en la utilización en un ordenador como el 8 y 9 del primer o del segundo modelo numérico 11 o 11' (según las fases de funcionamiento del reactor nuclear) y en una estación de trabajo como 8' y 9' de la herramienta de análisis de los mapas de flujo asociados 11''.

Los dos modelos numéricos 11 y 11' son representativos de la evolución dinámica del núcleo, en lo que se refiere al flujo neutrónico, el efecto de potencia y el efecto Xenon y del agotamiento del combustible del reactor nuclear.

15 La ejecución rápida y precisa de los algoritmos de cálculo de los modelos numéricos requiere la determinación rápida y precisa de las densidades de flujo neutrónicos en el interior del núcleo. Para suministrar, de manera rápida y precisa, los valores de las densidades de flujo neutrónico, por medio de las sondas de medición internas móviles, estas sondas deben calibrarse.

20 Tal y como se ha indicado con anterioridad, el número de sondas  $N_s$  que equipan los sistemas de instrumentación internos móviles 4 del reactor nuclear es por lo general  $N_s = 6$  para los reactores nucleares con una potencia de 1.300 MWe y  $N_s = 5$  para los reactores nucleares con una potencia de 900 MWe.

El calibrado de las  $N_s$  sondas de medición internas del flujo neutrónico se realiza al comienzo de ciclo (después de la carga del combustible), en los escalones 8 % y 80 % de la potencia nominal del reactor, durante el re arranque del reactor después de la recarga.

El calibrado de las sondas consiste en estimar, para cada una de las sondas, los factores  $k_s$  y  $\Phi_{in}(0)$  en la relación

$$25 \quad \Phi_{in} = \Phi_{in}(0) + k_s I_s$$

en la que  $I_s$  es la intensidad de la corriente eléctrica de ionización que circula por la sonda por efecto del flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  y  $\Phi_{in}(0)$  es el umbral de detección de la sonda.

30 En cada uno de los escalones 8 % y 80 %, la operación de calibrado consiste, en una primera fase, en realizar cuatro pasadas de adquisición de medición de flujo neutrónico para cada una de las sondas. Las dos primeras pasadas de las sondas son unas pasadas de intercalibrado para las que las mediciones se realizan en unos canales de medición de conjuntos de combustible nuevos, de los cuales se conoce con precisión el enriquecimiento. Estos conjuntos de combustible nuevos de calibrado no contienen ningún haz de regulación de potencia.

35 Las dos primeras pasadas de intercalibrado permiten determinar las sensibilidades relativas de las sondas. Se selecciona una de las  $N_s$  sondas como sonda de referencia y se calculan para las  $N_s - 1$  sondas restantes los coeficientes de sensibilidad relativa, a partir de las corrientes medidas.

Se realiza entonces una estimación de la potencia térmica  $P_{th}$  del núcleo del reactor nuclear producida por cada uno de los conjuntos de calibrado, a partir de los datos reales relativos a los parámetros físicos del núcleo del reactor nuclear que incluyen las temperaturas del fluido de refrigeración a la salida de los conjuntos de combustible y los datos relativos al mapa de flujos completado por las informaciones que vienen de la gestión del combustible.

40 A partir de las características neutrónicas del combustible nuevo (sección de fisión eficaz y masa de materia fisible en particular) y de la potencia térmica  $P_{th}$  producida por un conjunto de calibrado y, por otra parte, de las propiedades neutrónicas del moderador (sección de absorción eficaz, concentración de boro y temperatura), se calcula el flujo neutrónico medio  $\Phi_{in}$  en el interior del combustible del conjunto de calibrado. Se asocia a este flujo estimado la media de la corriente de sonda  $I_s$  corregida por el coeficiente de sensibilidad relativa de la sonda.

45 Se obtienen de este modo  $N_s \times 4$  pares de valores medios " $\Phi_{in}, I_s$ " para los  $N_s$  conjuntos de calibrado. Se determinan  $N_s$  pares de coeficientes [ $k_s, \Phi_{in}(0)$ ]. Para las  $N_s - 1$  sondas diferentes de la sonda de referencia, se corrigen los coeficientes  $k_s$  y  $\Phi_{in}(0)$  de acuerdo con los coeficientes de sensibilidad relativa de las sondas.



Habiéndose realizado el calibrado de las sondas móviles de instrumentación interna, se puede realizar la vigilancia del reactor nuclear.

5 Cuando el reactor nuclear está en un estado estacionario, se dispone del suficiente tiempo de cálculo para tratar un gran número de ecuaciones. Se utiliza entonces el primer modelo numérico 11, denominado modelo numérico lento, que se caracteriza por un gran número de nodos representativos de posiciones en los canales de medición del núcleo del reactor. Se pueden utilizar, por ejemplo, en el caso de un reactor con una potencia de 1.300 MWe, ocho nodos de medición en cada uno de los cincuenta y ocho canales de medición de los cincuenta y ocho conductos de instrumentación internos. El número de ocho nodos de cálculo por canal se selecciona por analogía con un sistema de instrumentación interna fija en el que se utilizan ocho sondas colectores en cada uno de los canales de medición  
10 formado por un tubo de instrumentación.

El paso de integración asociado al modelo numérico lento 11 está fijado en un valor máximo compatible con la estabilidad de los algoritmos de integración numérica.

Los parámetros del modelo numérico lento 11 característico del agotamiento del combustible se deben corregir de manera permanente durante el ciclo del combustible.

15 Estas correcciones se realizan de diferentes maneras a partir de la observación de la evolución de los datos reales de tramos (magnitudes físicas como las que se han enumerado con anterioridad, de las que la unidad 12 realiza la adquisición), así como de las diferencias constatadas (etapa 13) entre los datos reales y los valores calculados de estos datos.

20 El modelo dinámico lento 11 se puede corregir (etapa 17) en tiempo real en función de la evolución de las diferencias constatadas (etapa 13) entre las mediciones  $\Phi_{ex}$  de flujo neutrónico ex-core y los valores calculados  $\Phi'_{ex}$  del flujo ex-core y por correlación con la evolución de la concentración en boro del fluido de refrigeración del reactor, la evolución de la posición de los haces de regulación de la reactividad del núcleo y la evolución de la potencia térmica del reactor Pth.

25 El modelo dinámico lento 11 también se puede corregir en función de las diferencias constatadas (etapa 19) entre las mediciones de flujo neutrónico in-core  $\Phi_{in}$  en los nodos de la red y los valores calculados  $\Phi'_{in}$  de este mismo flujo in-core y por correlación con la evolución de la concentración en boro, la evolución de la posición de los haces de potencia y la evolución de la potencia térmica del reactor.

30 Las correcciones aportadas a los parámetros característicos del agotamiento del combustible se acumulan durante un ciclo. Esta acumulación de datos se utiliza para mejorar, durante el ciclo del combustible, la modelización del fenómeno de agotamiento en el modelo numérico lento 11.

Se realiza un cálculo de la distribución de la temperatura del moderador dentro del núcleo, en tres dimensiones, por una parte, en función de los datos reales relativos a los parámetros físicos del núcleo, por medio de la unidad de adquisición 12, y, por otra parte, en función de la distribución de potencia dentro del núcleo determinada a partir de las densidades de flujo neutrónico locales calculadas ( $\Phi'_{in}$ ).

35 Durante el funcionamiento del reactor en un estado estacionario, el arranque de las campañas de adquisición de las mediciones de flujo neutrónico in-core  $\Phi_{in}$ , por medio de la instrumentación interna móvil 15 se puede iniciar de tres maneras diferentes:

40 1- de manera automática, en función de la diferencia constatada en la etapa 14, entre la medición del desequilibrio axial de potencia determinado a partir de los datos reales de las magnitudes físicas del núcleo y el valor del desequilibrio axial de potencia calculado mediante el modelo numérico.

2- de manera automática, cuando al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo tiene un valor próximo a un valor umbral, el parámetro crítico pudiendo ser, por ejemplo, la tasa de crisis de ebullición DNBR, la potencia lineal  $P_{lin}$  o el factor de elevación de entalpía  $F_{\Delta H}$ .

45 La frecuencia de las campañas de mediciones de flujo neutrónico mediante la instrumentación in-core móvil y el número de pasadas de las sondas por los canales de medición por campaña de mediciones son en función de la diferencia de los parámetros críticos con respecto a los valores umbral. Cuanto más se reduce la diferencia, más aumenta la frecuencia y mayor es el número de pasadas.

3- de manera manual (etapa 20) por parte del operario que ha estimado la necesidad de que intervenga la instrumentación in-core móvil.

50 Se realiza la corrección de los parámetros del modelo numérico lento 11 en la etapa 18, en función de las diferencias constatadas en la etapa 19 entre las mediciones de flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  que se obtienen mediante la instrumentación móvil y los valores del flujo neutrónico  $\Phi'_{in}$  calculados mediante el modelo numérico. La corrección se realiza inmediatamente después de cada una de las pasadas de adquisición de las mediciones de flujo neutrónico in core, sin esperar a que termine la campaña de mediciones. Se dispone del suficiente tiempo de cálculo entre dos pasadas de sonda, para poder realizar unas correcciones durante este periodo.

Se puede interrumpir y terminar la campaña de mediciones in-core, ya sea de manera automática si la diferencia

constatada entre el desequilibrio axial de potencia medido y el desequilibrio axial calculado está por debajo de un determinado umbral, ya sea de manera manual si el operario considera que el modelo numérico se ha corregido de forma suficiente (por ejemplo en función de criterios predefinidos).

5 El segundo modelo numérico 11' o modelo numérico rápido se utiliza cuando se anticipa un funcionamiento transitorio del núcleo del reactor nuclear, por ejemplo tras una variación de posición de un haz de control, una variación de la temperatura en la rama fría, una variación del caudal primario o incluso una variación de la potencia dentro del circuito secundario.

10 El modelo numérico rápido utiliza una red nodal que consta de un número de nodos claramente inferior al de la red nodal del modelo lento. Se pueden utilizar, por ejemplo, en el caso de un reactor nuclear con una potencia de 1.300 MWe, dieciocho x dieciocho nodos, cada una de las vías o canales de medición constando de ocho nodos y cada una de las seis sondas móviles del sistema de medición in-core móvil introduciéndose de forma sucesiva en tres conductos de instrumentación.

En el caso de un reactor nuclear con una potencia de 900 MWe, el número de nodos puede ser igual a 15 x 8 (3 x 5 canales) con 8 nodos por canal.

15 Los canales de instrumentación que hay que incluir en esta red nodal reducida son imperativamente todos los canales que se encuentran en los conjuntos de combustible que contienen cada uno un haz de control de reactividad (o haz de potencia G1 o G2 o N1 o N2). Los canales de instrumentación que quedan por seleccionar serán en la medida de lo posible adyacentes a los haces de potencia restantes.

20 El modelo numérico rápido es representativo de un comportamiento dinámico del reactor causado por el efecto de potencia y el efecto Xenon.

El paso de integración asociado al modelo rápido 11' está fijado en un valor mínimo que depende de las constantes de tiempo características de los transitorios considerados y compatibles con la capacidad de tratamiento numérico del calculador.

25 Por ejemplo, se puede estimar que un límite superior del paso de integración numérica del modelo rápido puede estar fijado en 30 segundos.

Cuando se prevé un transitorio que puede ser generado, por ejemplo, por una variación de posición de haz o una variación de la temperatura en la rama fría del circuito primario del reactor o una variación de caudal primario o también una variación de potencia en el circuito secundario o una variación de la presión del circuito primario, se utiliza el modelo numérico rápido (11').

30 Las condiciones iniciales de las variables de estado del modelo numérico rápido son los valores que presentaban estas variables en el modelo numérico lento 11, en el momento del cambio de modelo determinado por el cambio de funcionamiento del núcleo del reactor nuclear.

35 Se calcula en tiempo real la distribución de la temperatura del moderador dentro del núcleo del reactor nuclear, en tres dimensiones, en función de los datos reales medidos dentro del núcleo del reactor nuclear (temperatura y potencia térmica) y en función de la distribución de potencia dentro del núcleo determinada a partir de las densidades locales de flujo neutrónico calculadas  $\Phi'_{in}$ .

40 De acuerdo con la invención, con el fin de seguir de manera más precisa la evolución del flujo neutrónico durante un transitorio y de poder corregir eventualmente los parámetros característicos del efecto Xenon del modelo numérico rápido 11', se activa el sistema de instrumentación interna móvil 15 para realizar tres pasadas de adquisición de las mediciones internas del flujo neutrónico  $\Phi_{in}$ .

El arranque de una campaña de mediciones de flujo neutrónico por medio de la instrumentación interna móvil se puede iniciar de tres maneras diferentes:

- 45
- 1- de manera automática, en función de la diferencia constatada en la etapa 14, entre la medición del desequilibrio axial de potencia y el valor calculado del desequilibrio axial de potencia.
  - 2- de manera automática, en función de la aproximación a un umbral crítico por parte de uno al menos de los parámetros de funcionamiento del núcleo, esta proximidad detectándose en la etapa 16 y el parámetro crítico pudiendo ser, por ejemplo, DNBR,  $P_{in}$ ,  $F_{\Delta H}$ .
  - 3- de manera manual en la etapa 20 por parte del operario.

50 Una campaña de adquisición de mediciones de flujo neutrónico mediante la instrumentación interna móvil consta de tres pasadas de adquisición de las mediciones en 3 x  $N_s$  canales de medición de núcleo.

La corrección de los parámetros del modelo numérico rápido 11', realizada en la etapa 18', en función de las diferencias constatadas en la etapa 19 entre las mediciones de flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  y los valores calculados de este flujo neutrónico  $\Phi'_{in}$  mediante el modelo rápido 11' se realiza inmediatamente después de cada una de las pasadas de adquisición de las mediciones de flujo neutrónico, sin esperar a que termine la campaña de mediciones. Se

dispone de suficiente tiempo de cálculo entre dos pasadas de sondas móviles para poder realizar algunas correcciones durante este período.

Al término de una pasada, si la curva axial de flujo neutrónico medido defiere significativamente de la curva de flujo calculada (en función de márgenes y criterios que hay que definir), al operario se le informa de ello, en la etapa 21. Si la alarma se activa después de cada una de las tres pasadas de las sondas, esto significa que el modelo numérico se desvía con respecto a la situación real. En estas condiciones, el operario debe ignorar los datos de salida del modelo numérico rápido 11' y vigilar el núcleo por medio de las mediciones de flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  y de los datos de tramos suministrados por la unidad de adquisición 12, tal y como se explicará más adelante.

Cuando el núcleo del reactor nuclear ha vuelto a un estado estacionario de funcionamiento, el operario puede decidir volver a un modo de vigilancia basado en el modelo numérico lento 11. Las condiciones iniciales de las variables de estado del modelo numérico lento 11 se determinan a partir de los valores de las variables de estado del modelo numérico rápido tomados en el momento del cambio de modelo.

En el caso del funcionamiento del tramo seguido de carga, la potencia del reactor puede variar en una tasa del 5 %/min y debido al movimiento de los haces de potencia el punto caliente del núcleo se desplaza radialmente a una velocidad relacionada con la velocidad de desplazamiento de los haces.

En estas condiciones de funcionamiento del núcleo, el proceso de corrección de los parámetros del modelo numérico «rápido» por medio de la instrumentación interna móvil debe ser lo más eficaz posible. El progreso de la campaña de adquisición de las mediciones internas del flujo neutrónico se hará de forma sincronizada con el movimiento de los haces de potencia. La secuencia de inserción de las sondas dentro del núcleo se hará en función de la secuencia de los movimientos de los haces.

Por ejemplo, en un descenso de carga, los haces de potencia se insertan dentro del núcleo siguiendo la secuencia G1  $\Rightarrow$  G2  $\Rightarrow$  N1  $\Rightarrow$  N2 con unas zonas de recubrimiento.

La adquisición de las mediciones internas del flujo neutrónico se hará tanto en la subida de las sondas dentro del núcleo como en la bajada y el desplazamiento dentro del núcleo de las sondas móviles se hará a baja velocidad (3 m/min).

De forma previa, las sondas móviles se llevarán a los pozos del tanque del reactor justo por debajo del tanque con el fin de ganar el tiempo de inserción de las sondas dentro de los canales de instrumentación hasta el fondo del tanque.

Únicamente las sondas que deben examinar los canales de instrumentación asociados a los haces G1 se insertan, en primer lugar, dentro del núcleo de forma sincronizada con el movimiento de los haces G1.

A continuación, cuando los haces G2 se ponen en movimiento, se insertan las sondas dentro de los canales de instrumentación asociados a los haces G2.

Cuando las sondas que se han utilizado para examinar los canales de instrumentación asociados a los haces G1 ya no son necesarias para seguir el efecto de los haces G1, estas sondas se asignan a unos canales de instrumentación asociados a los haces G2.

Cuando los haces N1 se ponen en movimiento se insertan las sondas dentro de los canales de instrumentación asociados a los haces N1.

Cuando las sondas que se han utilizado para examinar los canales de instrumentación asociados a los haces G2 ya no son necesarias para seguir el efecto de los haces G2, estas sondas se asignan a unos canales de instrumentación asociados a los haces N1; y así sucesivamente para los haces N2.

De este modo, se garantiza que la respuesta del modelo numérico «rápido» está bien sincronizada con el movimiento de los haces de potencia y se valida esta respuesta de manera «casi continua» durante todo el tiempo de la variación de potencia.

El procedimiento de la invención también permite vigilar el núcleo del reactor nuclear sin utilizar cálculos basados en un modelo numérico del núcleo como los modelos 11 y 11'. En efecto, se puede utilizar el sistema de instrumentación interna móvil 15 y la unidad de análisis de los mapas de flujo 11'' para vigilar de manera casi continua los márgenes de explotación y de seguridad del reactor nuclear con precisión.

Los parámetros críticos de funcionamiento del reactor se calculan de manera aproximada en tiempo real, en la etapa 16', en función de los datos reales de los parámetros físicos del núcleo suministrados por la unidad de adquisición 12 y estos parámetros críticos se reevalúan de manera más exacta a partir de las mediciones internas de flujo neutrónico (etapa 16).

Cuando el operario constata, en la etapa 21, que al menos uno de los parámetros críticos de funcionamiento del núcleo calculados de manera aproximada en la etapa 16' sale de su intervalo normal de explotación, este pone en

marcha en 20 una campaña de tres pasadas de adquisición de mediciones de flujo neutrónico mediante la instrumentación interna móvil. Esta campaña de mediciones, en tres pasadas de adquisición, permite determinar el canal más caliente dentro del núcleo del reactor nuclear.

5 La búsqueda se inicia con la ejecución de una primera pasada de adquisición a gran velocidad de las mediciones de flujo neutrónico por medio de la instrumentación interna móvil 15. Los  $N_s$  canales de instrumentación que las  $N_s$  sondas de medición móviles tienen que examinar en esta pasada se seleccionan de tal modo que se obtengan unas mediciones representativas de la distribución radial de potencia. La selección se hace en función de la distribución radial de las mediciones de temperatura in-core y de la distribución radial del agotamiento del combustible.

10 Una vez obtenidas las  $N_s$  curvas de mediciones axiales, en la primera pasada de adquisición, se extraen los valores máximos. Estos valores máximos se utilizan como coeficientes de ponderación para la determinación en el plano XY del núcleo (plano transversal) de un primer baricentro de las mediciones máximas. Se busca el canal de instrumentación más próximo a este primer baricentro. Se asocian a este primer canal  $N_s - 1$  otros canales representativos de la distribución radial de potencia. La selección se hace en función de la distribución radial de las mediciones de temperatura in-core y de la distribución radial del agotamiento del combustible. Se realiza una  
15 segunda pasada de adquisición a gran velocidad en los  $N_s$  canales seleccionados.

Una vez obtenidas las  $N_s$  curvas de mediciones axiales en esta segunda pasada de adquisición, se extraen los valores máximos del flujo. Los valores máximos determinados a la salida de la primera pasada se corrigen en función de la variación de potencia sobrevenida entre las dos pasadas de sonda. Los  $2 \times N_s$  valores máximos que se obtienen de este modo se utilizan como coeficientes de ponderación para la determinación, en el plano transversal  
20 XY del núcleo de un segundo baricentro de las mediciones máximas.

Si el canal de instrumentación más próximo a este segundo baricentro es el mismo que el que se ha determinado anteriormente, se selecciona otro canal también próximo. Si el canal de instrumentación más próximo de este segundo baricentro difiere del que se ha determinado con anterioridad, se selecciona este canal de instrumentación. Se asocian a este canal  $N_s - 1$  otros canales representativos de la distribución radial de potencia. La selección se  
25 hace en función de la distribución radial de las mediciones de temperatura in-core y de la distribución radial del agotamiento del combustible. Se realiza una tercera pasada de adquisición a gran velocidad en los  $N_s$  canales seleccionados de este modo.

Una vez obtenidas las  $N_s$  curvas de mediciones axiales en esta tercera pasada de adquisición, se extraen los valores máximos. Los valores máximos determinados a la salida de la primera pasada se corrigen en función de la  
30 variación de potencia sobrevenida entre la primera y la tercera pasadas. Los valores máximo determinados a la salida de la segunda pasada se corrigen en función de la variación de potencia sobrevenida entre la segunda y la tercera pasadas. Los  $3 \times N_s$  valores máximos que se obtienen de este modo, en las tres pasadas, se utilizan como coeficientes de ponderación para la determinación, en el plano transversal XY del núcleo, de un tercer baricentro de las mediciones máximas. Las coordenadas de este tercer baricentro se consideran como las coordenadas del canal  
35 más caliente dentro del núcleo.

La curva axial de flujo neutrónico del canal más caliente definido de este modo se determina por extrapolación a partir de la curva axial de flujo neutrónico medido en el canal de instrumentación más próximo.

Las  $3 \times N_s$  curvas axiales de las mediciones internas de flujo neutrónico están asociadas a los datos físicos de tramos para calcular de manera más precisa los parámetros críticos de funcionamiento del núcleo en la etapa 16'.

40 Una vez constatadas las diferencias entre los valores afinados de los parámetros críticos de funcionamiento y los valores aproximados calculados a partir de los datos reales de los parámetros físicos del núcleo, se determinan unos factores de corrección que se aplicarán a los valores aproximados determinados durante todo el periodo que separa dos campañas sucesivas de actualización de los valores afinados.

45 En el caso de una oscilación Xenon que dura alrededor de cuarenta y ocho horas, el periodo de actualización es del orden de ocho horas.

De este modo se puede realizar una vigilancia de los márgenes de los parámetros críticos con respecto a los valores umbral sin utilizar un modelo numérico del núcleo.

50 Se puede realizar la vigilancia, en caso de necesidad, después de las tres pasadas de sonda que se han descrito, realizando unas mediciones mediante el paso de una sonda móvil por el interior del canal de medición más próximo al canal más caliente, con el fin de vigilar de manera casi continua el máximo de potencia lineal  $P_{lin}$ , la elevación de entalpía local  $F\Delta H$ , el desequilibrio axial de potencia AO y la aproximación al límite LOCA ( *Loss of Coolant Accident* o pérdida de agua de refrigeración).

55 El procedimiento de acuerdo con la invención permite, por lo tanto, en todas las fases de utilización de un reactor nuclear, vigilar el funcionamiento del núcleo mediante la comparación de parámetros críticos con unos valores umbral, los parámetros críticos determinándose, cuando es necesario, haciendo que intervenga el sistema de instrumentación interna móvil del reactor nuclear.

Este procedimiento permite en particular realizar unas ganancias sustanciales en los márgenes con respecto a los umbrales críticos y, por lo tanto, mejorar las condiciones de explotación del reactor nuclear. El procedimiento de la invención se puede aplicar, ya sea de manera complementaria a un procedimiento que aplica una instrumentación interna fija, ya sea de manera independiente a cualquier instrumentación interna fija.

- 5 En el caso en el que se utilicen de manera complementaria los dos tipos de instrumentación móvil y fija, estas instrumentaciones son redundantes y no es necesario prever una redundancia propia para la instrumentación fija, como en el caso de los sistemas anteriormente habituales que utilizan una instrumentación fija.

10 El procedimiento y el dispositivo de acuerdo con la invención se pueden aplicar en determinados casos y en determinadas fases de explotación del reactor nuclear, de forma independiente a la utilización de un modelo numérico que simula la dinámica del núcleo como los modelos numéricos 11 y 11' que se han descrito con anterioridad. El operador dispone entonces de la instrumentación interna móvil 15 y de la herramienta de análisis de los mapas de flujo 11'' para seguir con precisión y de manera prácticamente continua la evolución de los parámetros críticos de funcionamiento del reactor.

15 Tal y como se ha explicado con anterioridad, en determinados casos, basta con medir el flujo neutrónico en un único canal de instrumentación que es el más próximo al canal más caliente, para poder vigilar la aproximación a un umbral crítico por parte de uno de los parámetros de funcionamiento del núcleo.

20 El procedimiento de acuerdo con la invención se puede aplicar de tal manera que ya no solicite las sondas móviles de la instrumentación interna móvil más que en el caso de su utilización periódica para establecer unos mapas de flujo precisos de acuerdo con la técnica anterior, en la medida en que es posible, en función de la calidad y de la fiabilidad de los modelos numéricos del núcleo utilizados, limitar el número de nodos y, por lo tanto, el número de mediciones que hay que realizar, es decir el tiempo de permanencia de las sondas y de los cables en el interior del núcleo del reactor nuclear.

25 La utilización de instrumentación interna móvil de acuerdo con el procedimiento de la invención es más económica que la utilización de una instrumentación fija, debido en particular a unos menores costes de explotación y de mantenimiento de la instrumentación interna móvil.

30 La instrumentación interna móvil puede tratar hasta seiscientos puntos de medición distribuidos en la dirección axial en cada uno de los canales de medición. Cuando se utiliza el conjunto de los canales de medición (por ejemplo cincuenta y ocho canales de medición para un reactor nuclear con una potencia de 1.300 MWe), se pueden tratar hasta 600 x 58 puntos, lo que suministra una representación mucho más precisa que un sistema basado en una instrumentación fija que debe limitarse a un número muy inferior de puntos de medición (por ejemplo 16 x 8 puntos de medición en el caso de un reactor de 1.300 MWe).

35 Además, el procedimiento de acuerdo con la invención permite realizar una vigilancia del núcleo hasta un nivel muy bajo de la potencia dentro del núcleo (por ejemplo un 8 % de la potencia nominal) y seguir unos transitorios como: oscilación Xenon, seguida de carga o arranque tras la parada en caliente del reactor. El tiempo de cálculo de las correcciones es siempre ampliamente inferior a las constantes de tiempo que caracterizan los transitorios normales que se encuentran en un núcleo de reactor nuclear.

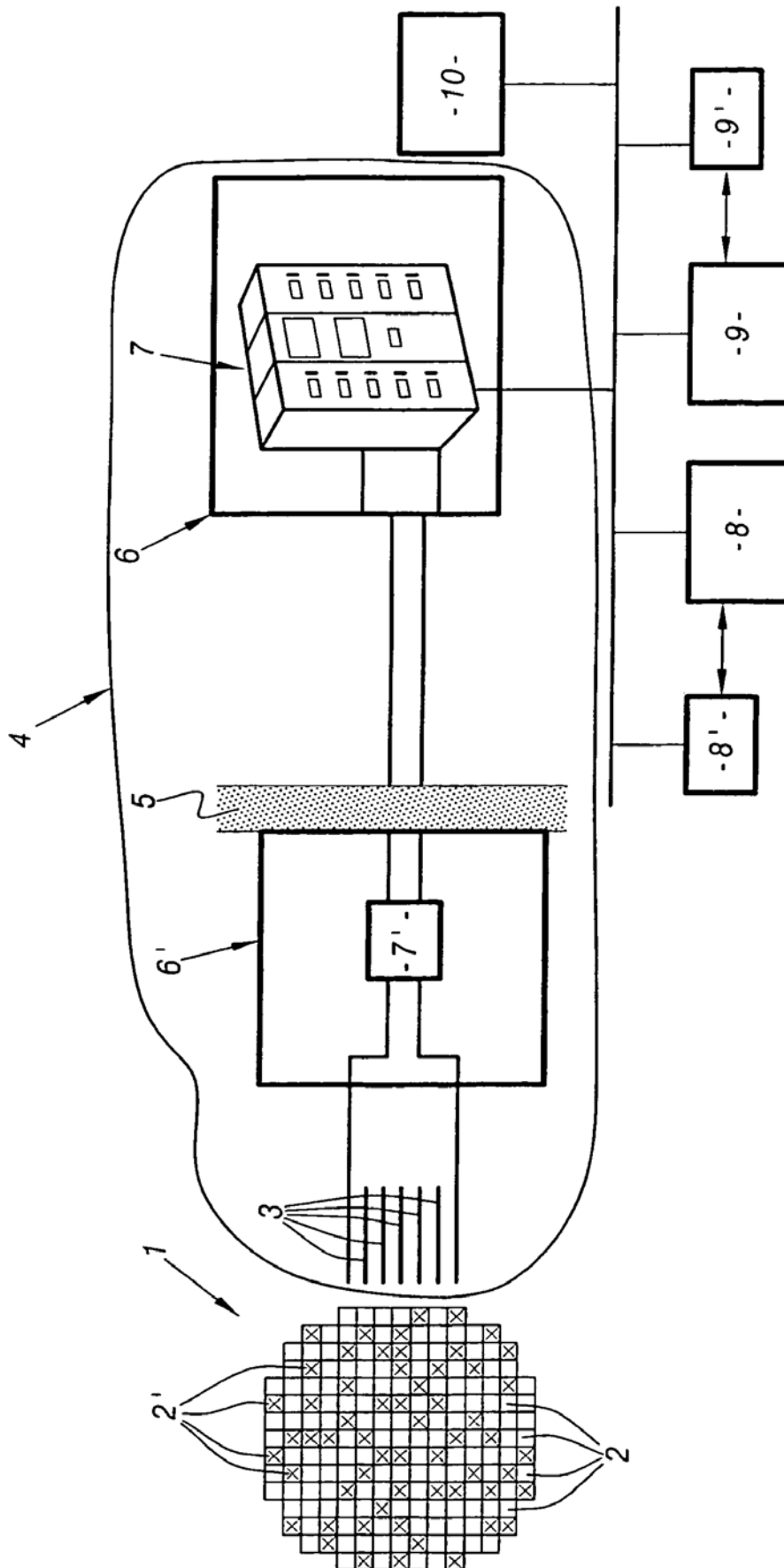
40 Debido al calibrado previo de las sondas, los algoritmos de corrección (18 y 18') de los modelos numéricos 11 y 11' las sondas los pueden utilizar de forma inmediata tras la adquisición de los valores de flujo, sin tiempo de retardo. Las mediciones internas del flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  se tratan directamente, en la etapa 19, al término de una pasada de adquisición de las mediciones (cuya duración es del orden de 15 segundos) y los datos se utilizan de forma instantánea para corregir los parámetros de los modelos numéricos 11 y 11'.

45 La invención se aplica en el caso de cualquier reactor nuclear que conste de un núcleo en el que se pueden introducir unas sondas de medición de flujo móviles en el interior de los canales de medición que se extienden siguiendo la altura del núcleo.

## REIVINDICACIONES

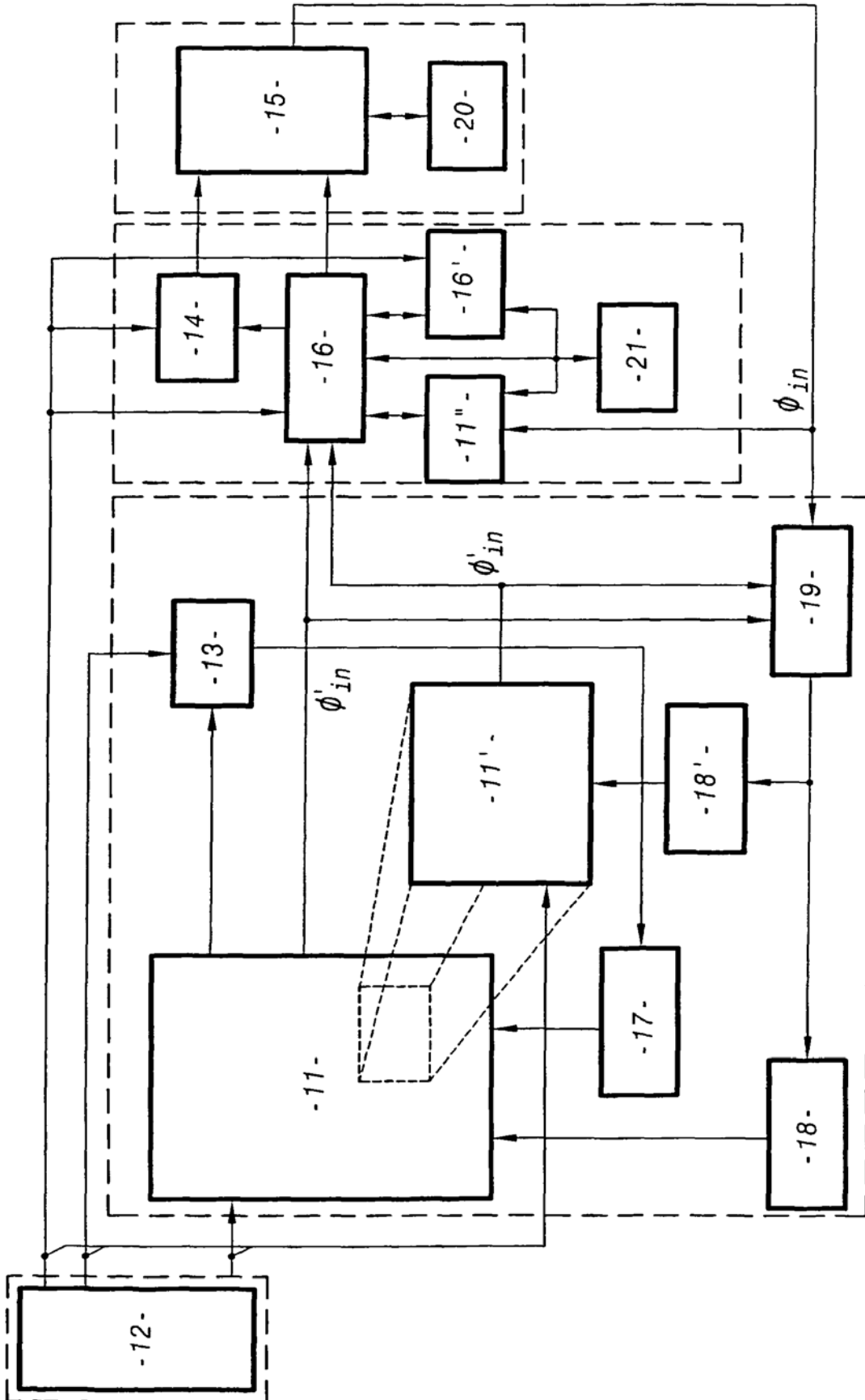
1. Procedimiento de vigilancia del núcleo (1) de un reactor nuclear formado por una pluralidad de conjuntos de combustible (2) dispuestos de manera yuxtapuesta siguiendo una dirección vertical del núcleo (1) del reactor nuclear que consiste en un sistema de instrumentación interna de sondas móviles (4, 15), que consta de una primera pluralidad de sondas de medición de flujo neutrónico fijadas cada una en un extremo de un cable de desplazamiento y de transmisión de mediciones y de unos medios de introducción y de desplazamiento (7') de las sondas por medio de los cables a los que están fijadas, en una segunda pluralidad de canales de medición (3) que se extienden siguiendo toda la altura del núcleo (1), cada uno en el interior de un conjunto de combustible (2') en la dirección vertical, la vigilancia del núcleo (1) del reactor realizándose mediante comparación con al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo que se obtiene mediante uno al menos de los métodos siguientes: determinación a partir de magnitudes físicas medidas dentro del núcleo (1), cálculo mediante un modelo numérico del núcleo (11, 11'), con al menos un valor umbral predeterminado, que comprende, durante el funcionamiento del reactor, en el caso en el que se compruebe que el parámetro crítico se aproxima a un valor umbral o que su valor determinado a partir de magnitudes físicas medidas se aleja de su valor calculado a partir del modelo (11, 11') según los pasos siguientes:
- se introduce, en al menos un canal de medición (3), al menos una sonda móvil de la primera pluralidad de sondas de medición de flujo;
  - se desplaza la sonda móvil siguiendo la altura del canal de medición (3);
  - se realizan una pluralidad de mediciones de flujo neutrónico en unos puntos separados siguiendo la altura del canal de medición;
  - se calcula el parámetro crítico teniendo en cuenta las mediciones de flujo neutrónico; y
  - se compara el parámetro con el valor umbral.
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **que se caracteriza por el hecho de que** antes de realizar una pluralidad de mediciones de flujo neutrónico por medio de al menos una sonda de medición móvil, se realiza un calibrado de al menos una sonda de la primera pluralidad de sondas móviles, estimando los factores  $k_s$  y  $\Phi_{in}(0)$  en la relación  $\Phi_{in} = \Phi_{in}(0) + k_s I_s$ , en la que  $I_s$  es la intensidad de la corriente eléctrica de ionización que circula por la sonda por efecto del flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  y  $\Phi_{in}(0)$  es el umbral de detección de la sonda, mediante el paso de la sonda por una canal de medición de un conjunto de calibrado, el cálculo del flujo neutrónico  $\Phi_{in}$  en un conjunto de calibrado y la medición de una corriente de la sonda introducida en el conjunto de calibrado.
3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, **que se caracteriza por el hecho de que** se realiza el intercalibrado de las sondas móviles de la primera pluralidad de sondas de medición de flujo neutrónico mediante el paso de las sondas en unos conjuntos de combustible nuevos de los que se conoce la tasa de enriquecimiento del combustible, para determinar unos coeficientes de sensibilidad relativa de las sondas móviles de la primera pluralidad de sondas.
4. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el caso en el que se realiza el cálculo de al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo (11, 11'), **que se caracteriza por el hecho de que** se utilizan, para los cálculos, un primer modelo numérico del núcleo (11) denominado modelo lento durante las fases de funcionamiento del reactor en el estado estacionario y un segundo modelo numérico denominado modelo rápido (11'), en el caso en el que se prevé un funcionamiento transitorio del núcleo del reactor nuclear con una variación rápida de la distribución del flujo neutrónico dentro del núcleo (1) del reactor, y se realiza una corrección de parámetros del modelo numérico (11, 11') usados, a partir de las mediciones de flujo neutrónico dentro del núcleo (1) del reactor nuclear que se obtienen mediante las sondas móviles de medición de flujo neutrónico.
5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, **que se caracteriza por el hecho de que** se realiza la adquisición de las mediciones de flujo neutrónico dentro del núcleo por medio de las sondas móviles en campañas de mediciones que se inician mediante uno de los procedimientos siguientes:
- de manera automática, en función de la distancia constatada entre la medición de un desequilibrio axial de potencia dentro del núcleo determinado a partir de las magnitudes físicas medidas dentro del núcleo y el valor del desequilibrio axial de potencia calculado mediante el modelo numérico (91, 11');
  - de manera automática, cuando al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo tiene un valor próximo al valor umbral;
  - de manera manual por parte de un operario que ha estimado la necesidad de que intervenga el sistema de instrumentación interno de sondas móviles (4, 15).
6. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 4 y 5, **que se caracteriza por el hecho de que** el modelo numérico lento (11) del núcleo (1) del reactor nuclear consta de un número de nodos al nivel de los cuales se calcula el flujo neutrónico en el interior del núcleo en los canales de medición (3) del núcleo (1) del reactor nuclear superior al número de nodos del modelo numérico rápido (11') al nivel de los cuales se calcula el flujo neutrónico dentro del núcleo del reactor nuclear en el interior de los canales de medición (3).

7. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que se realiza la vigilancia del núcleo sin utilizar cálculos basados en un modelo numérico del núcleo (11, 11'), **que se caracteriza por el hecho de que** se calcula al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo del reactor a partir de las magnitudes físicas medidas dentro del núcleo (1) del reactor nuclear y porque se corrigen los valores de al menos un parámetro crítico de funcionamiento calculado a partir de mediciones de flujo neutrónico realizadas dentro del núcleo mediante el sistema de instrumentación interno de sondas móviles (4, 15).
8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 7, **que se caracteriza por el hecho de que** se realiza la corrección de los valores del parámetro crítico de funcionamiento del núcleo (1) del reactor nuclear mediante las pasadas sucesivas de sondas móviles por los canales de medición (3) del núcleo del reactor nuclear.
9. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 8 **que se caracteriza por el hecho de que** se determina, en cada una de las pasadas sucesivas de las sondas de la primera pluralidad de sondas móviles por los canales de medición (3), los valores máximos del flujo neutrónico en los canales de medición (3) distribuidos por la sección transversal del núcleo y la posición en la sección transversal del núcleo, del baricentro de los valores máximos del flujo utilizados como coeficientes de ponderación, porque se determina la posición exacta del baricentro de los valores máximos de flujo mediante aproximaciones sucesivas a partir de las posiciones de baricentros determinadas a la salida de las pasadas de sondas sucesivas y de mediciones de flujo neutrónico en el interior de los de medición (3) distribuidos por el plano transversal del núcleo, alrededor de un canal de medición próximo a un baricentro determinado de forma previa, y porque se asimila la posición de un canal caliente de circulación del fluido de refrigeración en la posición exacta del baricentro.
10. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 9 **que se caracteriza por el hecho de que** se realiza la vigilancia del núcleo mediante unas mediciones de flujo neutrónico por medio del sistema de instrumentación interna de sondas móviles (4, 15) en el interior de un canal de medición (3), el más próximo al canal caliente determinado por las pasadas sucesivas previas de las sondas móviles por los canales de medición (3) del núcleo (1) del reactor nuclear.
11. Dispositivo de vigilancia del núcleo de un reactor nuclear formado por una pluralidad de conjuntos de combustible (2) dispuestos de manera yuxtapuesta siguiendo una dirección vertical del núcleo (1) del reactor nuclear que incluye de un sistema de instrumentación interna de sondas móviles (4, 15), que consta de una primera pluralidad de sondas de medición de flujo neutrónico fijadas cada una en un extremo de un cable de desplazamiento y de transmisión de mediciones y de unos medios de introducción y de desplazamiento (7') de las sondas por medio de los cables a los que estas están fijadas, en una segunda pluralidad de canales de medición (3) que se extienden siguiendo toda la altura del núcleo (1), cada uno en el interior de un conjunto de combustible (2') en la dirección vertical, la vigilancia del núcleo (1) del reactor realizándose por comparación de al menos un parámetro crítico de funcionamiento del núcleo que se obtiene mediante uno al menos de los métodos siguientes: determinación a partir de magnitudes físicas medidas dentro del núcleo (1), cálculo mediante un modelo numérico del núcleo (11, 11'), con al menos un valor umbral predeterminado, el dispositivo comprendiendo:
- un sistema de instrumentación interna de sondas móviles (4, 15) del reactor nuclear;
  - una herramienta (11'') de análisis de mapas de flujo neutrónico del núcleo (1) del reactor nuclear;
  - una unidad (10, 12) de adquisición de datos físicos del núcleo;
  - unos medios (8, 9, 16) de cálculo de al menos un parámetro crítico del núcleo (1) del reactor nuclear a partir de valores del flujo neutrónico medidos dentro del núcleo del reactor nuclear mediante la instrumentación interna de sondas móviles (4, 15) y tratadas mediante la herramienta (8', 9'; 11'') de análisis de mapas de flujo neutrónico y de datos físicos del núcleo suministrados por la unidad de adquisición (10, 12), y **que se caracteriza por el hecho de que** consta de unos medios preparados para arrancar de manera automática una campaña de adquisición de mediciones del flujo neutrónico por medio de la instrumentación interna de sondas móviles (4, 15), durante el funcionamiento del reactor, en el caso en el que el parámetro crítico se aproxime a un valor umbral o que su valor determinado como parte de magnitudes físicas medidas se aleje de su valor calculado como parte del modelo numérico del núcleo (11, 11').
12. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 11, **que se caracteriza por el hecho de que** los medios de cálculos utilizan al menos un modelo numérico (11, 11') de cálculo de flujo neutrónico dentro del núcleo y al menos un algoritmo (18, 18') de corrección del modelo numérico (11, 11') conectado a una unidad (19) de comparación de valores de flujo neutrónicos dentro del núcleo del reactor nuclear calculados mediante el modelo numérico (11, 11') y de valores de flujo neutrónico medidos mediante el sistema de instrumentación interno de sondas móviles (4, 15).



**FIG.1**





**FIG.2**