

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 745 386**

51 Int. Cl.:

**G21C 17/022** (2006.01)

**G01N 23/00** (2006.01)

**G21C 17/108** (2006.01)

**G21C 17/112** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.08.2014 PCT/US2014/051423**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.04.2015 WO15060928**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.08.2014 E 14856279 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.07.2019 EP 3061100**

54 Título: **Procedimiento de control de la dilución de boro durante una parada de un reactor**

30 Prioridad:

**21.10.2013 US 201314058324**

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

**02.03.2020**

73 Titular/es:

**WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC  
(100.0%)**

**1000 Westinghouse Drive, Suite 141  
Cranberry Township, PA 16066, US**

72 Inventor/es:

**PRIBLE, MICHAEL, C.;**  
**BUNKER, ANDREW, M. y**  
**HEIBEL, MICHAEL, D.**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 745 386 T3

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

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de control de la dilución de boro durante una parada de un reactor

**Antecedentes****1. Campo**

- 5 La presente invención se refiere, en general, al control de la reactividad de un núcleo de un reactor nuclear dentro del intervalo de fuente y, más particularmente, al control de la dilución del boro durante una parada del reactor.

**2. Técnica relacionada**

10 En un sistema de generación de energía de un reactor de agua presurizada, se genera calor dentro del núcleo de un recipiente a presión por una reacción en cadena de fisión que ocurre en una pluralidad de barras de combustible soportadas dentro del núcleo. Las barras de combustible se mantienen en una relación espaciada dentro de los conjuntos de combustible, el espacio entre las barras de combustible forma canales refrigerantes a través de los cuales fluye el agua boratada. El hidrógeno dentro del agua refrigerante modera los neutrones emitidos por el uranio enriquecido dentro de las barras de combustible para aumentar el número de reacciones nucleares y así aumentar la eficiencia del proceso. Los tubos guía de la barra de control se intercalan dentro de los conjuntos de combustible en lugar de las ubicaciones de la barra de combustible y sirven para guiar las barras de control que pueden operar para ser insertadas o retiradas del núcleo. Cuando se insertan, las barras de control absorben neutrones y, por lo tanto, reducen el número de reacciones nucleares y la cantidad de calor generado dentro del núcleo. El refrigerante fluye a través de los conjuntos fuera del reactor hacia el lado del tubo de los generadores de vapor, en el que el calor se transfiere al agua en el lado de la carcasa de los generadores de vapor a una presión más baja, lo que produce la generación de vapor que generalmente se usa para dirigir un generador de turbina ajustado para la producción de electricidad. El refrigerante que sale del lado del tubo del generador de vapor es conducido por una bomba refrigerante principal nuevamente al reactor en un ciclo de bucle cerrado para renovar el proceso.

15 El nivel de potencia de un reactor nuclear generalmente se divide en tres intervalos: el intervalo de fuente o arranque, el intervalo intermedio y el intervalo de potencia. Estos tres intervalos se pueden dividir en seis modos: el modo uno, donde la potencia es mayor que cinco por ciento; modo dos donde la potencia es menor que cinco por ciento; modo tres, conocido como espera en caliente, en el que la temperatura del refrigerante es mayor que 350 °; modo cuatro, también conocido como parada caliente, en el que la temperatura del refrigerante es menor que 350 °; modo cinco, parada fría, en el que la temperatura del refrigerante es menor que 200 °; y modo seis, recarga, en el que la temperatura es menor que 140 °. El nivel de potencia del reactor se controla continuamente para asegurar un funcionamiento seguro. Dicho control se realiza típicamente por medio de detectores de neutrones colocados fuera y dentro del núcleo del reactor para medir el flujo de neutrones del reactor. Dado que el flujo de neutrones en el reactor en cualquier punto es proporcional a la tasa de fisión, el flujo de neutrones también es proporcional al nivel de potencia.

20 Se han utilizado cámaras de fisión e ionización para medir el flujo en el intervalo de fuente, intermedio y potencia de un reactor. Las cámaras típicas de fisión e ionización son capaces de operar a todos los niveles de potencia normales, sin embargo, generalmente no son suficientemente sensibles para detectar con precisión el flujo de neutrones de bajo nivel emitido en el intervalo de fuente. Por lo tanto, los detectores del intervalo de fuente de bajo nivel separados se usan típicamente para controlar el flujo de neutrones cuando el nivel de potencia del reactor está en el intervalo de fuente.

25 Las reacciones de fisión dentro del núcleo ocurren cuando los neutrones libres en el nivel de energía apropiado golpean los átomos del material fisionable contenido dentro de las barras de combustible. Las reacciones producen la liberación de una gran cantidad de energía térmica que se extrae del núcleo en el refrigerante del reactor y en la liberación de neutrones libres adicionales que están disponibles para producir más reacciones de fisión. Algunos de estos neutrones liberados escapan del núcleo o son absorbidos por absorbentes de neutrones, por ejemplo, barras de control, y por lo tanto no causan reacciones de fisión tradicionales. Mediante el control de la cantidad de material absorbente de neutrones presente en el núcleo, se puede controlar la velocidad del proceso de fisión. Siempre se producen reacciones de fisión aleatorias en el material fisionable, pero cuando se para el núcleo, los neutrones liberados se absorben a una velocidad tan alta que no se produce una serie sostenida de reacciones. Al reducir el material absorbente de neutrones hasta que el número de neutrones en una generación dada sea igual al número de neutrones en la generación anterior, el proceso se convierte en una reacción en cadena autosostenida y se dice que el reactor es "crítico". Cuando el reactor es crítico, el flujo de neutrones es aproximadamente seis u órdenes de magnitud mayor que cuando se apaga el reactor. En algunos reactores, para acelerar el aumento del flujo de neutrones en el núcleo de parada para lograr intervalos de transición prácticos, se implanta una fuente artificial de neutrones en el núcleo del reactor entre las barras de combustible que contienen el material fisionable. Esta fuente de neutrones artificial crea un aumento localizado en el flujo de neutrones para ayudar a que el reactor alcance la potencia.

30 En ausencia de una fuente artificial de neutrones, la relación entre el número de neutrones libres en una generación con los de la generación anterior se denomina "factor de multiplicación de neutrones" ( $K_{eff}$ ) y se utiliza como una medida de la reactividad de reactor. En otras palabras, la medida de la criticidad para un núcleo nuclear es  $K_{eff}$ , es

decir, la relación entre la producción de neutrones y la pérdida total de neutrones atribuible tanto a la destrucción como a la pérdida. Cuando  $K_{\text{eff}}$  es mayor que uno, se producen más neutrones de los que se destruyen. Del mismo modo, cuando  $K_{\text{eff}}$  es menor que uno, se destruyen más neutrones de los que se producen. Cuando  $K_{\text{eff}}$  es menor que uno, el reactor se denomina como "subcrítico".

5 Durante una parada para reabastecimiento de combustible, la cabeza del reactor se retira junto con la estructura interna superior para obtener acceso a los conjuntos de combustible dentro del núcleo. Para proporcionar dicho acceso, las barras de control se retiran con la estructura interna superior, sin embargo, para mantener los conjuntos de combustible dentro del núcleo subcrítico con las barras de control retiradas, aumenta la concentración de boro dentro del refrigerante dentro del núcleo. El control de las concentraciones de boro del sistema refrigerante de un reactor durante las interrupciones de planta es un aspecto clave para verificar el margen de parada y evitar una criticidad accidental. Durante la transición del modo seis al modo dos, tras una parada para reabastecimiento de combustible, la planta cambiará la concentración de ácido bórico de aproximadamente 2.300 ppm a 1.800 ppm. Durante este período de transición en la parada, existe una gran cantidad de actividades que se realizan que exigen la atención de los operadores de la planta. Típicamente, el margen de parada se controla principalmente mediante el muestreo periódico de la concentración de boro del sistema refrigerante de un reactor y el bloqueo administrativo de las fuentes de dilución para evitar diluciones inadvertidas de boro en el sistema refrigerante de un reactor. La mayoría de las plantas también tienen controladores de dilución de boro en el lugar que muestrean las señales de salida de los detectores de intervalo de fuente para un aumento estadísticamente significativo en las tasas de cuentas y proporcionan una alarma basada en un aumento preestablecido ajustado manualmente en la tasa de cuentas; por ejemplo, una duplicación en la tasa de cuentas.

El documento CN 102 376 374 A desvela un monitor en línea para medir la concentración de boro en todos los niveles de potencia. El documento US 2010/0150295 A1 enseña un Factor de Atenuación de la Temperatura del Bajante utilizado para restar el ruido de fondo de las mediciones de reactividad en el intervalo de fuente.

25 Durante una parada de reabastecimiento de combustible en una planta nuclear comercial en mayo de 2011, la concentración de boro del sistema refrigerante de un reactor disminuyó inesperadamente de 2.443 ppm a 1.483 ppm en 24 horas debido a una válvula con fugas. La concentración de boro de parada requerida fue de 1.410 ppm. Las señales de salida de los detectores del intervalo de fuente aumentaron en un factor de tres, pero las operaciones atribuyeron este aumento principalmente al aumento simultáneo de la temperatura del sistema refrigerante de un reactor. Esta planta había eliminado previamente sus fuentes de neutrones artificiales secundarias, lo que reduce la tasa de cuentas del detector de intervalo de fuente y dificulta la observación de los cambios de reactividad en un estado muy subcrítico. Si bien en la planta se seguía la vigilancia de control de productos químicos de la parada estándar que implica tomar muestras cada 24 horas, y las válvulas que crean una trayectoria de flujo de dilución se cerraron y bloquearon, una presentó filtraciones. Un aumento simultáneo de la temperatura del sistema refrigerante de un reactor de aproximadamente 162,8 °C a 246,1 °C, mientras se estaba produciendo la dilución, enmascaró el efecto en los detectores de intervalo de fuente y redujo la efectividad del alto flujo ajustado manualmente en la alarma de parada.

Por lo tanto, se desea un sistema de detección más sensible para identificar los cambios de concentración de boro en el sistema refrigerante del reactor.

40 En consecuencia, es un objeto de la presente invención proporcionar tal sistema dinámico de este tipo que controle continuamente los cambios de concentración de boro en busca de cambios que pueden no ser fácilmente detectables usando la metodología actual.

Es un objeto adicional de la presente invención controlar con exactitud pequeños cambios en las concentraciones de boro durante los modos de funcionamiento seis a dos para proteger una planta contra una criticidad inadvertida.

45 Además, el objeto de la presente invención es proporcionar un sistema tal que sea lo suficientemente confiable como para permitir la eliminación de las restricciones operativas y de diseño del núcleo impuestas por los requerimientos actuales de análisis de accidentes con dilución de boro.

## Sumario

Estos y otros objetivos se obtienen mediante el empleo de un procedimiento, definido en la reivindicación 1, para controlar las concentraciones de boro en un sistema refrigerante de un reactor durante una parada de la planta nuclear que emplea salidas eléctricas de instrumentación existente dentro de la planta. El procedimiento controla una señal de salida representativa de una tasa de cuentas de un detector de neutrones de intervalo de fuente ubicada fuera del recipiente del reactor dentro de la proximidad del núcleo del reactor, en función de tiempo, durante la parada de la planta. El procedimiento también controla una temperatura del refrigerante dentro del sistema refrigerante de un reactor en función del tiempo. El procedimiento además genera una señal de compensación que es una función de la temperatura controlada, que cuando se combina con la señal de salida de la tasa de cuentas compensa la señal de salida de la tasa de cuentas por sustancialmente ningún cambio en la señal de salida de la tasa de cuentas resultante de un cambio en la temperatura del refrigerante. El procedimiento posteriormente aplica la señal de compensación a la señal de salida de la tasa de cuentas para obtener una señal de salida de la tasa de cuentas compensada e identifica

un aumento preseleccionado en la señal de salida de la tasa de cuentas compensada.

De acuerdo con la invención, la señal de compensación se define como un factor de atenuación de temperatura del bajante (DTAF) dado por la expresión:

$$DTAF(T_1) = e^{-\rho(T_1 - T_R)R},$$

5 en la que el valor de R es una función de la distancia entre el detector del intervalo de fuente y el recipiente del reactor y la sección transversal de eliminación neutrónica macroscópica efectiva entre el detector del intervalo de fuente y los conjuntos de combustible en la periferia del núcleo y  $\rho$  es el cambio de la densidad del agua dentro del recipiente del reactor. Una desviación en la señal de salida de la tasa de cuentas compensada ( $\Delta C_C(t)$ ) de una referencia seleccionada  $\Delta C(\Delta C_R)$  es una indicación de que un cambio de reactividad está ocurriendo o ha ocurrido y el valor de ( $\Delta C_C(t)$ ) está dado por la expresión:

$$\Delta C_C(t) DTAF(t) - C_R. \quad (2)$$

Preferentemente, la aplicación de técnicas de propagación de error para determinar la fluctuación aleatoria esperadas en  $\Delta C_C$  de una señal de salida de la tasa de cuentas controlada ajustada a la próxima permite el intervalo esperado de la fluctuación aleatoria en  $\Delta C_C(\Delta CE)$  a expresar simultáneamente como:

$$\Delta C_E(t) \in 0 \pm 2\sigma_{CR} [1 + 1 / DTAF(t)];$$

$$\text{--- (3)}$$

15 en la que el valor de  $\sigma_{CR}$  es la desviación media medida de la población significativa de las mediciones de la tasa de cuentas del intervalo de fuente obtenidas en un intervalo alrededor del tiempo t; el valor de  $C(t)$  es el valor de la media de los datos usados para determinar la  $\sigma_{CR}$ ; y el número de mediciones de la tasa de cuentas usado para determinar  $\sigma_{CR}$  es una constante direccionable por el operador que es una función del valor máximo deseado de la  $\sigma_{CR}$  necesaria para obtener una sensibilidad de detección del cambio de reactividad. En la realización anterior, si  $\Delta C(t)$  está fuera de un intervalo esperado de  $\Delta C$  proporcionado por la ecuación anterior (3), el procedimiento identifica que un cambio de reactividad está ocurriendo o ha ocurrido. Preferiblemente, se determina un número seleccionado de muestras consecutivas de  $\Delta C(t)$  con una fracción dada de las muestras que está fuera del intervalo de  $\Delta C$  esperado antes de identificar que está ocurriendo un cambio de reactividad. En una realización, el número seleccionado de muestras consecutivas es aproximadamente diez.

**Breve descripción de las figuras**

Se puede obtener una mejor comprensión de la presente invención a partir de la siguiente descripción de las realizaciones preferidas cuando se considera en conjunto con las figuras adjuntas en las que:

30 La Figura 1 es una representación esquemática de un lado principal de un sistema de generación de energía nuclear; y

La Figura 2 es un gráfico de la relación de la tasa de cuentas versus la temperatura del tramo frío del sistema de refrigeración del reactor para la tasa de cuentas esperada y la tasa de cuentas medida.

**Descripción de la realización preferida**

35 La Figura 1 ilustra el lado principal de una planta generadora de energía eléctrica nuclear 10 en la que un sistema de suministro de vapor nuclear 12 suministra vapor para dirigir un generador de turbina (no mostrado) para producir energía eléctrica. El sistema de suministro de vapor nuclear 12 tiene un reactor de agua presurizado 14 que incluye un núcleo del reactor 16 alojado dentro de un recipiente a presión 18. Las reacciones de fisión dentro del núcleo del reactor 16 generan calor, que es absorbido por un refrigerante del reactor, como el agua, que pasa a través del núcleo. El refrigerante calentado circula a través de la tubería de tramo caliente 20 a un generador de vapor 22. Una refrigerante del reactor 24 retorna al reactor 14 desde el generador de vapor 22 mediante una bomba del refrigerante de reactor a través de la tubería de tramo frío 26. Típicamente, un reactor de agua presurizado tiene al menos dos y, a menudo, tres o cuatro generadores de vapor 22, cada uno suministrado con refrigerante caliente a través de un tramo caliente 20, forma con el tramo frío 26 y la bomba de refrigerante del reactor 24, un circuito principal. Cada circuito principal suministra vapor al generador de turbina. Dos de estos bucles se muestran en la Figura 1.

45 El refrigerante que retornó al reactor 14 fluye hacia abajo a través de un bajante anular y posteriormente hacia arriba

a través del núcleo 16. La reactividad del núcleo y, por lo tanto, la salida de potencia del reactor 14 se controlan a corto plazo mediante barras de control, que se pueden insertar selectivamente en el núcleo. La reactividad a largo plazo se regula mediante el control de la concentración de un moderador de neutrones tal como boro disuelto en el refrigerante. La regulación de la concentración de boro produce reactividad de manera uniforme en el núcleo entero a medida que el refrigerante circula a través del núcleo entero. Por otro lado, las barras de control producen reactividad local y, por lo tanto, dan como resultado una asimetría de la distribución de potencia axial y radial dentro del núcleo 16. Las condiciones dentro del núcleo 16 son controladas por varios sistemas de sensores diferentes. Estos incluyen un sistema detector excore 28 que mide el flujo de neutrones que escapa del reactor 14. Los detectores excore 28 incluyen detectores de intervalo fuente utilizados cuando el reactor se apaga, los detectores de intervalo intermedio utilizados durante el arranque y parada y detectores de intervalo de potencia utilizados cuando el reactor está por encima de aproximadamente el cinco por ciento de potencia. Los detectores en el núcleo también se emplean típicamente durante la operación de potencia.

Los expertos en la materia saben que se pueden identificar cambios en la tasa de cuentas del detector del rango de fuente ( $\Delta C$ ) mediante los cambios correspondientes en el núcleo  $K_{eff}$ . En un caso ideal, el cambio en la reactividad entre una  $K_{eff}$  de referencia ( $K_R$ ) y otro valor de condición de  $K_{eff}$  ( $K_1$ ) y el tiempo  $t$  generalmente se expresa como:

$$C_1(t) - C_R = \Delta C(t) = C_0 \left[ \frac{K_1(t) - K_R}{1 - K_1(t)} \right] \quad (4)$$

También se ha mostrado que los cambios en la temperatura del sistema de refrigeración del reactor producen cambios en la respuesta del detector del rango de fuente medida debido al cambio en la densidad ( $\rho$ ) del agua dentro del recipiente del reactor. La tasa de cuentas del rango de fuente medida en cualquier momento y la temperatura del sistema de refrigeración del reactor correspondiente ( $T_1$ ) se corrige para tener en cuenta los cambios desde una temperatura de referencia ( $T_R$ ) mediante la aplicación de un factor de corrección definido como el factor de atenuación de temperatura (DTAF) del bajante dado por la expresión:

$$DTAF(T_1) = e^{-\rho(T_1) - \rho(T_R)R} \quad (1)$$

La temperatura controlada del sistema refrigerante de un reactor se puede tomar del tramo frío, el tramo caliente o un promedio de los dos. El valor de  $R$  es una función de la distancia entre el detector del intervalo de fuente y el recipiente del reactor y la sección transversal de eliminación neutrónica macroscópica efectiva entre el detector del intervalo de fuente y los conjuntos de combustible en la periferia del núcleo.  $R$  se determina empíricamente a partir de las mediciones de la tasa de cuentas tomada a diferentes temperaturas mientras se mantiene la constante de reactividad del núcleo, o analíticamente usando procedimientos de transporte de neutrones estándares. Si se cambia la temperatura dentro del recipiente del reactor sin un cambio significativo correspondiente en la reactividad del núcleo, la aplicación del DTAF a la tasa de cuentas medida durante el cambio de temperatura servirá para mantener el  $\Delta C(t)$  corregido esencialmente constante. La corrección asegura que los operadores del reactor no confundan un cambio en la tasa de cuentas del rango de fuente causada por el cambio de temperatura del sistema refrigerante del reactor con un cambio en la tasa de cuentas causado por cambios de reactividad tales como lo que se pueden observar si la concentración de boro del sistema refrigerante del reactor estuviera cambiando.

La desviación del valor medido corregido de  $\Delta C(t)$  ( $\Delta C_C(t)$ ) de un  $\Delta C(\Delta C_R)$  de referencia seleccionado es ahora una indicación de que un cambio de reactividad está ocurriendo o ha ocurrido. Este cambio inesperado en la tasa de cuentas se muestra gráficamente en función de la temperatura del sistema de refrigeración del reactor en la Figura 2. El valor de ( $\Delta C_C(t)$ ) está dado por la expresión:

$$\Delta C(t)DTAF(t) - C_R \quad (2)$$

La medición del proceso y la naturaleza aleatoria inherente de las señales del detector de rango de fuente medido inducirán fluctuaciones en el valor medido de  $\Delta C$  en cada etapa de tiempo, es decir, muestreo. Estas fluctuaciones harán que el uso de  $\Delta C(t)$  para detectar pequeños cambios de reactividad sea problemático. La aplicación de técnicas de propagación de errores para determinar las fluctuaciones aleatorias esperadas en  $\Delta C_C$  a partir de un conjunto de mediciones de la tasa de cuentas al siguiente permite que el rango esperado de fluctuación aleatoria en  $\Delta C_C(\Delta C_E)$  se determine en un nivel de confianza del 95% por la expresión:

$$\Delta C_E(t) \in 0 \pm 2\sigma_{CR} [1 + 1 / DTAF(t)].$$

— (3)

- El valor de  $\sigma_{CR}$  es la desviación media medida de una población significativa de mediciones de la tasa de cuentas del intervalo de fuente en un intervalo alrededor del tiempo t. El valor de  $C(t)$  es el valor medido de los datos usados para determinar la  $\sigma_{CR}$ . El número de mediciones de la tasa de cuentas usado para determinar la  $\sigma_{CR}$  es una constante direccionable por el operador que es una función del valor máximo deseado de la  $\sigma_{CR}$  necesario para obtener una sensibilidad de detección del cambio de reactividad. Si el  $\Delta C_C(t)$  está fuera de un intervalo esperado de  $\Delta C$  proporcionado por la ecuación tres, el operador puede concluir que está ocurriendo un cambio de reactividad. Para evitar indicaciones falsas positivas o negativas, se requiere el uso de un requerimiento para varios ciclos consecutivos fuera o dentro del intervalo esperado antes de establecer el estado para que se muestre al operador.
- 10 Las etapas de la realización preferida de la metodología de la invención reivindicada de aquí en adelante es la siguiente:
- (a) obtener un conjunto de mediciones de la tasa de cuentas del detector del intervalo de fuente;
  - (b) calcular el valor de la media del conjunto;
  - (c) calcular la desviación media del conjunto de datos;
  - 15 (d) repetir las etapas (a), (b) y (c) hasta obtener un valor de desviación media diana;
  - (e) ingresar el valor de desviación media de la etapa (d) como un valor de referencia ( $C_R$ ), en un sistema de alarma para identificar los cambios inaceptables en las concentraciones de boro;
  - (f) obtener un nuevo conjunto de datos de mediciones del detector del intervalo de fuente hasta que la desviación media del nuevo conjunto de datos sea no mayor que el valor de la media obtenido en la etapa (d);
  - 20 (g) calcular el valor de la media del conjunto de datos usado para completar la etapa (f);
  - (h) calcular el valor de DTAF para aplicar al valor de la media de la etapa (g) usando las temperaturas medias correspondientes a las tasas de cuentas de referencia y las tasas de cuentas usadas para calcular el valor de la media de la etapa (g);
  - (i) multiplicar el DTAF de la etapa (h) por la tasa de cuentas media de la etapa (g);
  - 25 (j) restar el  $C_R$  del valor obtenido en la etapa (i);
  - (k) determinar si la diferencia calculada en la etapa (j) está fuera de un intervalo de desviación esperado proporcionado en la ecuación tres;
  - (l) si la diferencia de la etapa (j) está dentro del intervalo esperado, repetir las etapas (f) a (k) aproximadamente diez o más veces (si la diferencia está fuera del intervalo esperado se debe proceder a la etapa 13);
  - 30 (m) si al menos nueve de los valores de diferencia medidos están dentro del intervalo esperado, se debe ajustar la salida del estado de cambio de reactividad a un estado de no alarma;
  - (n) repetir las etapas (f) a (l) aproximadamente diez o más veces;
  - (o) si al menos nueve de los valores obtenidos de la etapa (13) están afuera del intervalo esperado, se debe ajustar la salida del estado del cambio de reactividad a "sí", y
  - 35 (p) repetir las etapas (f) a (o) hasta que los detectores del intervalo de fuente estén desenergizados. Se obtendrá un nuevo valor de  $C_R$  y se ingresará en el sistema tras completar todos los cambios de reactividad de parada de la planta. Se debe apreciar que el número de datos adicionales recolectados y analizados que se especifica en las etapas (l) y (n) es una entrada ajustable por el usuario. Del mismo modo, el número de valores de diferencia medidos que deben estar dentro o fuera del rango esperado para establecer el estado de reactividad del sistema expuesto en las etapas (m) y (o) dependerá de la precisión deseada del resultado y la entrada ajustable por el usuario
  - 40

Si bien se han descrito en detalle realizaciones específicas de la presente invención, los expertos en la materia apreciarán que se pueden desarrollar diversas modificaciones y alternativas a esos detalles a la luz de las enseñanzas generales de la divulgación. Por consiguiente, las realizaciones particulares desveladas se consideran solo ilustrativas y no limitativas en cuanto al alcance de la invención, que debe proporcionar la amplitud total de las reivindicaciones adjuntas.

45

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de control de un cambio en las concentraciones de boro en un sistema refrigerante de un reactor (10) como resultado de un cambio de la reactividad durante una parada de una planta nuclear que comprende las etapas de:

5 controlar una señal de salida representativa de una tasa de cuentas de un detector de neutrones de intervalo de fuente (28) ubicado fuera de un recipiente del reactor (18) dentro de la proximidad de un núcleo (16) de un reactor, como una función del tiempo, durante la parada de la planta nuclear;

controlar una temperatura de un refrigerante dentro del sistema refrigerante de un reactor (10) en función del tiempo;

10 generar una señal de compensación que es una función de la temperatura controlada, que cuando se combina con la señal de salida de la tasa de cuentas compensa la señal de salida de la tasa de cuentas para sustancialmente cualquier cambio en la señal de salida de la tasa de cuentas resultante de un cambio en la temperatura del refrigerante;

15 aplicar la señal de compensación a la señal de salida de la tasa de cuentas para obtener una señal de salida de la tasa de cuentas compensada; e

identificar un aumento preseleccionado en la señal de salida de la tasa de cuentas compensada como un signo de un cambio en la concentración de boro en el refrigerante; **caracterizado porque**

la señal de compensación se define como un Factor de Atenuación de la Temperatura del Bajante, DTAF, dado por la expresión:

20 
$$DTAF(T_1) = e^{-(p(T_1)-p(T_R))R};$$

en la que  $T_1$  es la temperatura del sistema refrigerante de un reactor,  $T_R$  es una temperatura de referencia, el valor de  $R$  es una función de la distancia entre el detector del intervalo de fuente y el recipiente del reactor y la sección transversal de eliminación neutrónica macroscópica efectiva entre el detector del intervalo de fuente y los conjuntos de combustible en la periferia del núcleo, ya sea empíricamente a partir de las mediciones de la tasa de cuentas tomadas a diferentes temperaturas mientras que se mantiene la constante de reactividad, o analíticamente usando procedimientos de transporte de neutrones estándares, y  $p$  es una densidad del agua dentro del recipiente del reactor en función de la temperatura del sistema refrigerante de un reactor.

30 2. El procedimiento de la reivindicación 1, que además comprende emplear una desviación en la señal de salida de la tasa de cuentas compensada ( $\Delta C_c(t)$ ) a partir de una referencia seleccionada ( $\Delta C(\Delta C_R)$ ) como una indicación de que está ocurriendo o ha ocurrido un cambio de reactividad y el valor de ( $\Delta C_c(t)$ ) se proporciona mediante la expresión:  $\Delta C(t)DTAF(t) - CR$ , con  $\Delta C(t)$  que es el valor medido de la desviación de la tasa de cuentas del detector de intervalo de fuente  $C(t)$ .

35 3. El procedimiento de la reivindicación 2, que además comprende aplicar técnicas de propagación de errores para determinar una fluctuación aleatoria esperada en  $\Delta C_c$  a partir de una señal de salida de la tasa de cuentas controlada ajustada a la próxima que permite el intervalo esperado de fluctuación aleatoria en

$$\Delta C_c(\Delta CE) \text{ para expresarse sustancialmente como: } \Delta C_E(t) \in 0 \pm 2\sigma_{CR}[1 + 1 / DTAF(t)].$$

40 en la que el valor de  $\sigma_{CR}$  es la desviación media medida de la población significativa de mediciones de la tasa de cuentas del intervalo de fuente obtenidas en un intervalo alrededor del tiempo  $t$ ; el valor de  $C(t)$  es el valor de la media de los datos usados para determinar  $\sigma_{CR}$ ; y el número de mediciones de la tasa de cuentas usada para determinar  $\sigma_{CR}$  es una constante direccionable por el operador que es una función del valor máximo deseado de  $\sigma_{CR}$  necesario para obtener una sensibilidad de detección del cambio de reactividad deseada.

4. El procedimiento de la reivindicación 3 que incluye la etapa de determinar si  $\Delta C_c(t)$  está fuera de un intervalo esperado de  $\Delta C$  proporcionado por la ecuación  $\Delta C_F(t) \in 0 \pm$

45 
$$2\sigma_{CR}[1 + 1 / DTAF(t)];$$

e identificar que está ocurriendo o ha ocurrido un cambio de reactividad.

5. El procedimiento de la reivindicación 4 en el que un número seleccionado de muestras consecutivas de  $\Delta C_c(t)$  se determina con una fracción dada de las muestras que están afuera del intervalo esperado de  $\Delta C$  antes de identificar que está ocurriendo un cambio de reactividad.

6. El procedimiento de la reivindicación 5 en el que el número de muestras consecutivas seleccionadas es de aproximadamente diez.
7. El procedimiento de la reivindicación 1 en el que:
- (1) La etapa de controlar una señal de salida comprende:
- 5 (a) obtener un conjunto de mediciones de la tasa de cuentas del detector del intervalo de fuente;
- (2) La etapa de generar una señal de compensación comprende:
- (b) calcular el valor de la media del conjunto de mediciones de la tasa de cuentas del detector del intervalo de fuente;
- 10 (c) calcular una desviación media del conjunto de mediciones de la tasa de cuentas del detector del intervalo de fuente;
- (d) repetir las etapas (a), (b) y (c) hasta que se obtiene un valor de desviación media diana;
- (e) ingresar el valor de desviación media de la etapa (d) como un valor de referencia ( $C_R$ ), en un sistema de alarma para identificar cambios inaceptables en las concentraciones de boro;
- 15 (f) obtener un nuevo conjunto de datos de las mediciones del detector del intervalo de fuente hasta que la desviación media del nuevo conjunto de datos no es mayor que el valor de la media obtenido en la etapa (d);
- (g) calcular el valor de la media del conjunto de datos usado para completar la etapa (f);
- (h) generar una señal de compensación que es una función de una temperatura controlada, que comprende calcular el valor del DTAF para aplicar al valor de la media de la etapa (g) usando las temperaturas medias correspondientes a las tasas de cuentas de referencia y las tasas de cuentas usadas para calcular el valor de la media de la etapa (g)
- 20 (3) La etapa de aplicar la señal de compensación comprende:
- (i) multiplicar el DTAF de la etapa (h) por la tasa de cuentas media de la etapa (g);
- (j) restar  $C_R$  del valor obtenido en la etapa (i) para obtener un valor de diferencia;
- 25 (k) determinar si el valor de diferencia calculado en la etapa (j) está fuera de un intervalo de desviación esperado;
- (l) repetir las etapas (f) - (k) una pluralidad de veces dada, si el valor de diferencia de la etapa (j) está dentro del intervalo de desviación esperado; si el valor de diferencia está fuera del intervalo esperado proceder a la etapa (m); y en el que
- 30 (4) La etapa de identificar un aumento preseleccionado en la señal de salida de la tasa de cuentas compensada comprende:
- (m) ajustar una salida del estado de cambio de reactividad a un estado de no alarma si al menos la pluralidad dada menos X de los valores de diferencia medidos está dentro del intervalo esperado;
- 35 (n) repetir las etapas (f) a (l) Y en más oportunidades; y
- (o) ajustar la salida del estado de cambio de reactividad a un estado de alarma si al menos Y menos X de los valores de diferencia medidos obtenidos de la etapa (n) está fuera del intervalo esperado.
8. El procedimiento de la reivindicación 7 que incluye la etapa de repetir las etapas (f) a (o) hasta que los detectores del intervalo de fuente se desenergizan.
- 40 9. El procedimiento de la reivindicación 7 en el que la pluralidad dada de oportunidades equivale a Y.
10. El procedimiento de la reivindicación 9 en el que Y equivale aproximadamente a diez.
11. El procedimiento de la reivindicación 7 en el que X equivale aproximadamente a uno.
12. El procedimiento de la reivindicación 7 en el que se obtiene un nuevo valor de  $C_R$  y se ingresa tras alcanzar la criticidad o hasta que los detectores del intervalo de fuente se desenergizan.
- 45

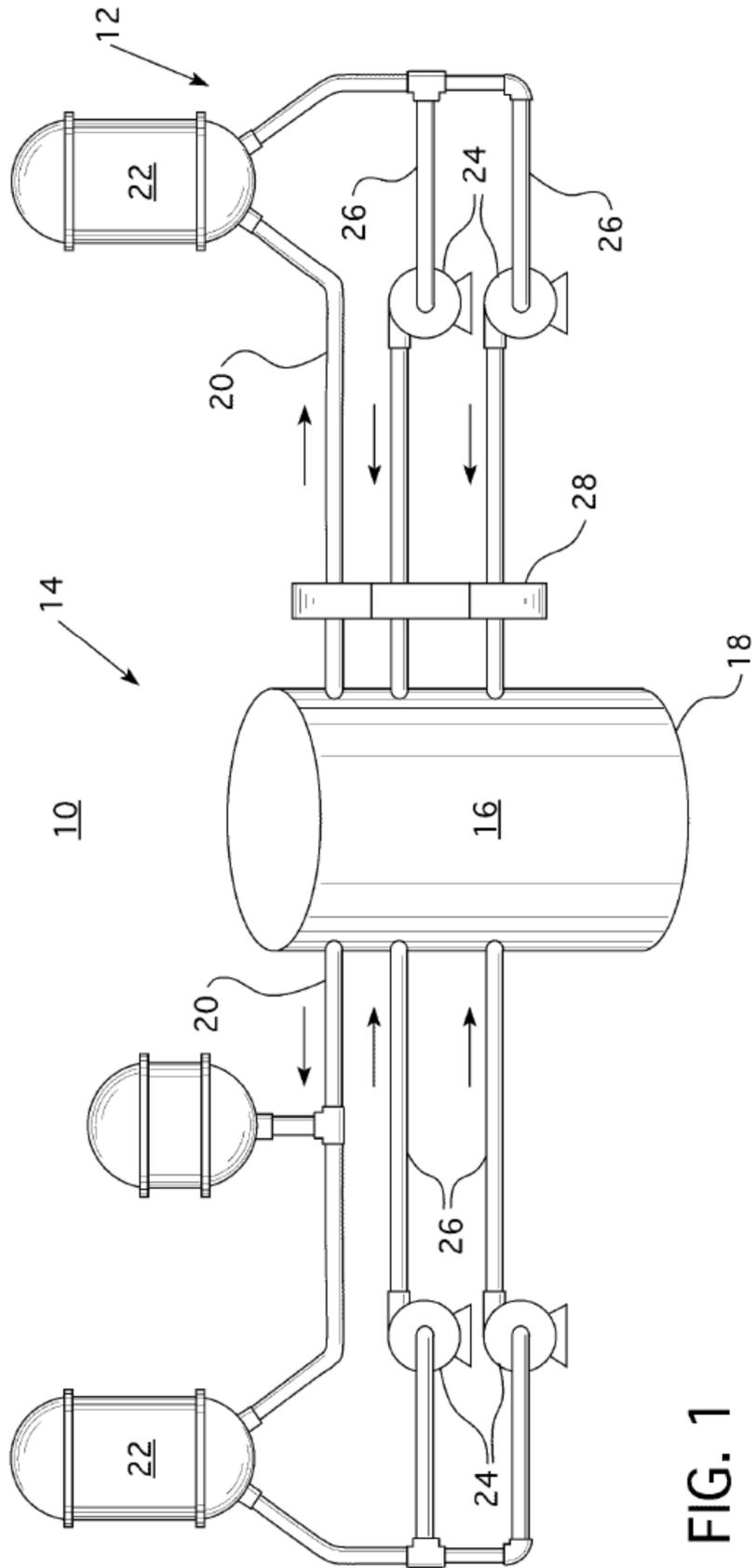


FIG. 1

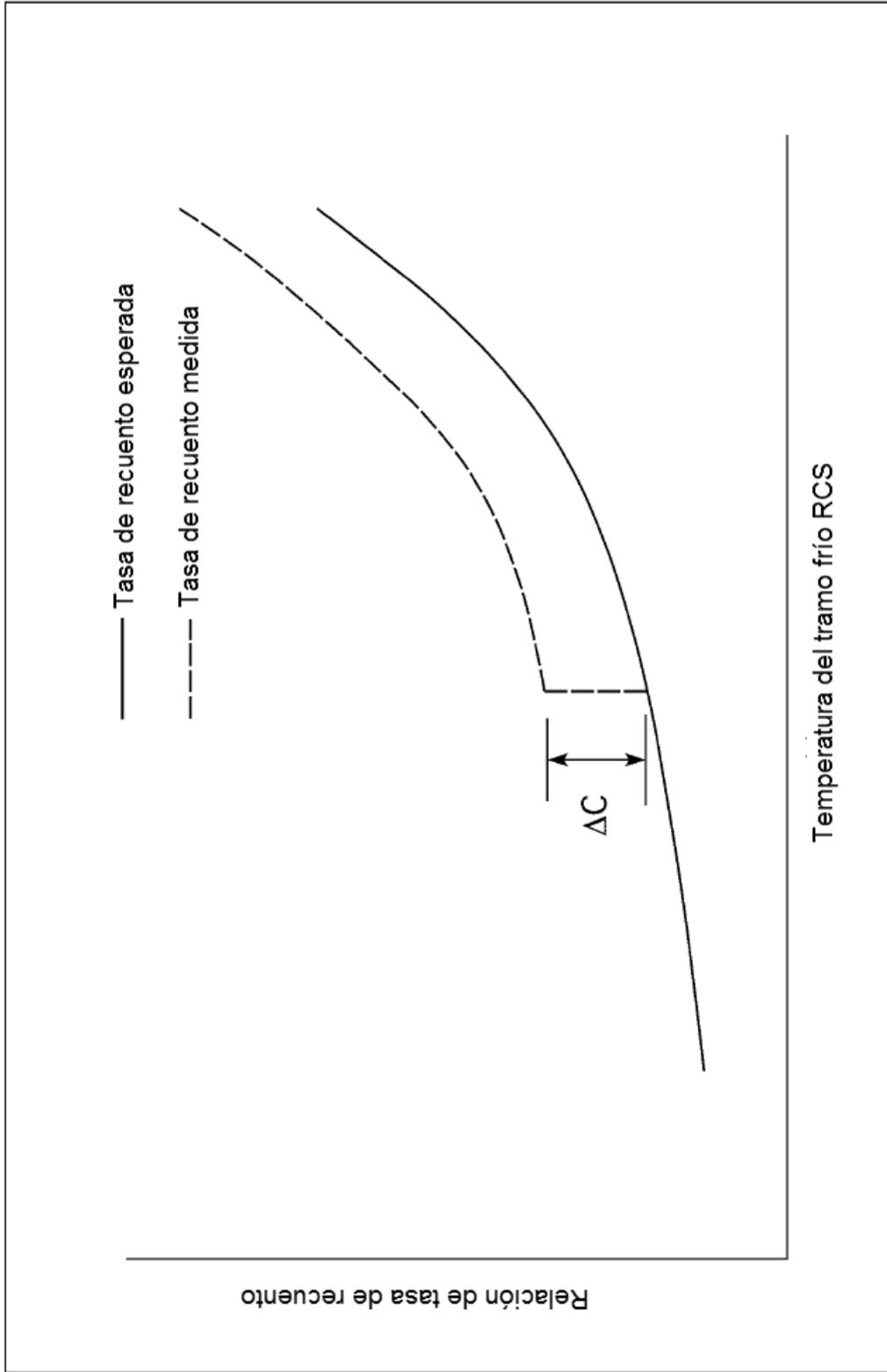


FIG. 2