

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 401 349**

51 Int. Cl.:

G21C 17/00 (2006.01)

G21D 3/00 (2006.01)

G21C 7/36 (2006.01)

G21C 17/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.11.2007 E 07121547 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.01.2013 EP 1927994**

54 Título: **Sistemas y procedimientos de predicción de una k efectiva crítica para un reactor nuclear**

30 Prioridad:

29.11.2006 US 606320

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

18.04.2013

73 Titular/es:

**GLOBAL NUCLEAR FUEL-AMERICAS, LLC
(100.0%)
3901 CASTLE HAYNE ROAD
WILMINGTON, NORTH CAROLINA 28401, US**

72 Inventor/es:

**MERTYUREK, UGUR;
KROPACZEK, DAVID JOSEPH;
KARVE, ATUL A. y
CHOPELAS, ANGELO PETER**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 401 349 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

Sistemas y procedimientos de predicción de una k efectiva crítica para un reactor nuclear

La presente divulgación se refiere, en general, a reactores nucleares y, más específicamente, a sistemas y procedimientos para diseñar y controlar las operaciones de los reactores nucleares.

5 En las plantas de energía nuclear, los sistemas de supervisión de núcleo proporcionan un entorno controlado para procesar datos de planta sin procesar para dar unos datos de limitación de funcionamiento tales como una tasa de generación de calor máxima. Tales sistemas supervisan una información de estado de reactor clave, tal como los márgenes para los límites operativos, la potencia radial y axial, las distribuciones de exposición y la potencia de núcleo total, para proporcionar una información para evaluar el rendimiento de combustible pasado, actual y futuro.

10 Adicionalmente, tales sistemas se usan a menudo para preparar planes para las operaciones futuras, tales como maniobras de potencia, arranques e intercambios de secuencia de barras de control, del reactor, en base a los datos supervisados. El sistema puede recibir una entrada de usuario en relación con operaciones planificadas y puede generar modelos y planes y características de funcionamiento en apoyo del funcionamiento planificado. Esto puede incluir simulaciones del funcionamiento planificado en base a características y parámetros de funcionamiento predefinidos y/o calculados. Un simulador de núcleo puede calcular un rendimiento térmico, unas distribuciones de potencia o un flujo de neutrones actual, esperado y planificado como una función de la posición de las barras de control, del patrón de carga de núcleo, del flujo de refrigerante, de la presión de reactor y de otras variables de funcionamiento y de diseño.

20 Uno de los parámetros de reactor notificados más importante es la relación de la ganancia de neutrones con respecto a la pérdida de neutrones, a la que se hace referencia a veces como el factor de multiplicación de neutrones efectivo, la k efectiva crítica, o valor propio k crítico, usándose cada una de las expresiones de forma intercambiable en el presente documento. Esta es la relación de la tasa promedio de producción de neutrones por fisión en el núcleo de reactor con respecto a la tasa promedio de pérdida por absorción y filtración. La k efectiva es una constante que da la información acerca del estado actual de la reacción en cadena o fisión en el núcleo. Un valor de la k efectiva menor que uno indica un número decreciente de reacciones en cadena, mientras que un valor de la k efectiva mayor que uno indica un número creciente de reacciones en cadena en el estado actual del reactor. Un estado de reactor autosostenido en estado estacionario se denomina el estado crítico del reactor y teóricamente tiene, en un estado estacionario, una k efectiva igual a uno. Desafortunadamente, debido a unas incertidumbres asociadas con los datos de reactor y a la metodología para calcular las cantidades, la k efectiva no es siempre igual a uno. Este valor especial de la k efectiva se denomina la k efectiva crítica.

30 Durante la fase de planificación de un funcionamiento de reactor, los reactores experimentan unas condiciones que se encuentran por debajo de las condiciones de reactor de plena potencia, a las que se hace referencia en el presente documento como condiciones u operaciones no nominales, que incluyen maniobras de potencia, arranques o intercambios de secuencia de barras de control a partir de las cuales los ingenieros del reactor preparan un plan de funcionamiento para los operarios del reactor. Cada condición no nominal coloca el reactor en una pluralidad de estados de núcleo no nominales en los que el reactor está generando más o menos neutrones que a plena potencia, por ejemplo, una k efectiva que no es igual a uno. Los planes de reactor para condiciones no nominales típicamente incluyen el cálculo de una estimada del caudal de refrigerante en cada fase del funcionamiento para el nivel de potencia objetivo y el patrón de barras de control. El procedimiento es casi el inverso del cálculo de la k efectiva. Los sistemas de núcleo soportan el presente procedimiento mediante la provisión de predicciones en base a unas reglas predefinidas y a unos datos operativos anteriores. La precisión del caudal calculado de refrigerante es importante para alcanzar el nivel de potencia objetivo tan rápido como lo permitan los límites térmicos regulados. Una mala estimada del caudal da como resultado unos pequeños incrementos conservativos en el caudal necesario para alcanzar la potencia objetivo, lo que puede dar como resultado un gasto y tiempo aumentados para alcanzar la plena potencia. Una buena estimada de la k efectiva crítica esperada para cada punto de estado en la condición no nominal preverá unas predicciones más precisas de caudal de refrigerante y funcionamiento optimizado del reactor.

45 No obstante, típicamente se usa para los cálculos de flujo o bien la k efectiva base de diseño o bien la k efectiva conocida última nominal, debido a la incapacidad actual de predecir con precisión una k efectiva crítica esperada. Debido a que la k efectiva crítica no es un valor constante, ha sido muy difícil de predecir debido a que esta es una función de la compleja interacción de todos los parámetros que afectan al funcionamiento del núcleo de reactor. La k efectiva crítica puede disminuir a medida que avanza el ciclo y puede cambiar en aproximadamente 600 pcm (reactividad en partes por cien mil) durante cada tiempo de vida de ciclo de carga de combustible en condiciones nominales de plena potencia. Este cambio es aproximadamente lineal por tramos y puede predecirse mediante una k efectiva base de diseño. A medida que la k efectiva crítica cambia como una función del grado de quemado nuclear, esta puede cambiar también tanto como 700 pcm durante estas condiciones no nominales. La k efectiva de diseño se calcula durante el procedimiento de diseño del núcleo reaprovisionado nuevo y se espera que tenga una precisión de 200 pcm. No obstante, la k efectiva de diseño no aborda las condiciones no nominales en las que la potencia se encuentra por debajo del 100 %.

60 Un procedimiento para calcular la k efectiva crítica que comprende simulaciones de núcleo detalladas se conoce por el documento JP 2000 162365 A. La incorporación del valor de reactividad de gadolinio a las simulaciones de núcleo

nuclear se conoce por el documento JP 07 209460 A.

La determinación del caudal es sensible a la k efectiva crítica seleccionada y una diferencia de 50 pcm en la k efectiva crítica con respecto a la predicha puede dar como resultado una diferencia de un 2 % en el caudal. En consecuencia, el empleo de la k efectiva base de diseño o el último valor conocido de la k efectiva crítica en condiciones nominales puede producir una diferencia tan grande como un 25 % entre el caudal calculado y el real durante estos estados de potencia no nominales.

Por lo tanto, se desea una metodología de predicción para mejorar el cálculo de una k efectiva crítica precisa durante las condiciones y los estados no nominales con el fin de optimizar el funcionamiento del reactor a la vez que se mantienen unos márgenes de seguridad deseados.

10 Sumario de la invención

El inventor presente ha tenido éxito en el diseño de sistemas y procedimientos mejorados para predecir una k efectiva (valor propio k) crítica para uno o más estados de núcleo no nominales y los caudales de refrigerante asociados a través del núcleo durante las operaciones no nominales de un reactor nuclear. En algunas realizaciones, mediante la provisión de mejoras en la predicción precisa de la k efectiva crítica en estados de núcleo no nominales, los reactores nucleares pueden diseñarse y accionarse de forma más eficaz y rentable durante unas condiciones de reactor no nominales.

La invención se define en la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes se definen realizaciones preferentes.

De acuerdo con un aspecto, se proporciona un procedimiento para determinar una k efectiva crítica en un estado de núcleo no nominal de una planta de energía nuclear que incluye la determinación, para el estado de núcleo no nominal, de una densidad de las barras de control, una potencia de núcleo en porcentaje, un valor de reactividad de gadolinio, un valor de reactividad de Doppler y un valor de reactividad de xenón sensible a un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que incluye el estado de núcleo no nominal, y una k efectiva de referencia. El procedimiento incluye el cálculo de un cambio en una k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal sensible a dos o más parámetros en el estado de núcleo no nominal seleccionado del grupo que consiste en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de xenón. La k efectiva crítica se genera para el estado de núcleo no nominal sensible al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal.

De acuerdo con otro aspecto, se proporciona un procedimiento para determinar un caudal de refrigerante en un reactor nuclear en un estado de núcleo no nominal asociado con un funcionamiento de reactor no lineal incluye la determinación, para el estado de núcleo no nominal, de una densidad de las barras de control, una potencia de núcleo en porcentaje, un cambio en el valor de reactividad de gadolinio, un cambio en el valor de reactividad de Doppler y un cambio en el valor de reactividad de xenón sensible a un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que define un funcionamiento no nominal que incluye el estado de núcleo no nominal, y una k efectiva de referencia. Se calcula un cambio en una k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia para el estado de núcleo no nominal, sensible a dos o más parámetros seleccionados del grupo que consiste en el cambio en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el cambio en el valor de reactividad de gadolinio, el cambio en el valor de reactividad de Doppler, el cambio en el valor de reactividad de xenón, un tipo de planta y un tipo del funcionamiento no nominal. Se genera una k efectiva crítica en el estado de núcleo no nominal, sensible al cambio calculado en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia correspondiente. Se determina un caudal de refrigerante para el núcleo de reactor para el estado de núcleo no nominal, sensible a la k efectiva crítica generada.

De acuerdo con otro aspecto más, se proporciona un procedimiento para modelar las k efectivas críticas en una pluralidad de estados de núcleo no nominales en un funcionamiento no nominal de un reactor en una planta de energía nuclear que incluye la estimación, para una pluralidad de estados de núcleo no nominales, de una densidad de las barras de control, un valor de reactividad de gadolinio, un valor de reactividad de Doppler y un valor de reactividad de xenón sensible a un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que define los estados de núcleo no nominales y una o más k efectivas de referencia. Se calcula cada uno de un cambio en la densidad de las barras de control, un cambio en el valor de reactividad de gadolinio, un cambio en el valor de reactividad de Doppler y un cambio en el valor de reactividad de xenón, siendo el cambio en relación con el valor de referencia recibido correspondiente y asociado con cada estado de núcleo no nominal. Se determina una pluralidad de correlaciones que afectan a un balance de neutrones en el interior del reactor en cada estado de núcleo no nominal, sensibles a la potencia de núcleo en porcentaje, el cambio en el valor de reactividad de gadolinio, el cambio en el valor de reactividad de Doppler, el cambio en el valor de reactividad de xenón y el cambio en la densidad de las barras de control. Un cambio en la k efectiva se determina en respuesta a las correlaciones determinadas para cada estado de núcleo no nominal. Una k efectiva crítica real para uno o más de los estados de núcleo no nominales se compara con la k efectiva crítica estimada para los estados de núcleo no nominales correspondientes y un tipo de planta está seleccionado del grupo que consiste en una planta accionada por xenón y una planta accionada por

5 gadolinio, sensible a la comparación. Se identifica una pluralidad de coeficientes, identificándose por lo menos un coeficiente para cada una de las correlaciones determinadas, como una función de una exposición en el estado de núcleo no nominal, el tipo de planta seleccionado y un tipo para el funcionamiento de planta no nominal. Un subconjunto de las correlaciones y los coeficientes se selecciona en respuesta al tipo de planta seleccionado y el tipo de funcionamiento de planta no nominal.

10 De acuerdo con otro aspecto más, se proporciona un sistema para determinar una k efectiva crítica en un estado de núcleo no nominal en un núcleo de reactor nuclear que incluye un ordenador que tiene un procesador, una memoria, una entrada configurada para recibir un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor, una k efectiva de referencia, y unas instrucciones ejecutables por ordenador adaptadas para ejecutar un procedimiento. El procedimiento ejecutable mediante las instrucciones ejecutables por ordenador incluye la determinación, para el estado de núcleo no nominal, de una densidad de las barras de control, una potencia de núcleo en porcentaje, un valor de reactividad de gadolinio, un valor de reactividad de Doppler y un valor de reactividad de xenón sensible a un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que incluye el estado de núcleo no nominal, y una k efectiva de referencia, y calcular un cambio en una k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal sensible a dos o más parámetros en el estado de núcleo no nominal seleccionado del grupo que consiste en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de xenón. El procedimiento incluye también la generación de la k efectiva crítica en el estado de núcleo no nominal sensible al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal.

20 En otro aspecto más, se proporciona un sistema para determinar una k efectiva crítica en un estado de núcleo no nominal en un núcleo de reactor nuclear que incluye unos medios para determinar, para el estado de núcleo no nominal, una densidad de las barras de control, una potencia de núcleo en porcentaje, un valor de reactividad de gadolinio, un valor de reactividad de Doppler y un valor de reactividad de xenón sensible a un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que incluye el estado de núcleo no nominal, y una k efectiva de referencia y unos medios para calcular un cambio en una k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal sensible a dos o más parámetros en el estado de núcleo no nominal seleccionado del grupo que consiste en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de xenón. El Sistema incluye también unos medios para generar la k efectiva crítica en el estado de núcleo no nominal sensible al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal.

35 Aspectos adicionales de la presente invención serán en parte evidentes y en parte se señalarán a continuación. Debe entenderse que diversos aspectos de la divulgación pueden implementarse de forma individual o unos en combinación con otros. Debe entenderse también que la descripción detallada y los dibujos, a pesar de que indican determinadas realizaciones ejemplares, están previstos solo para fines de ilustración y no deberán interpretarse como limitantes del alcance de la divulgación.

A continuación, se describirán diversos aspectos y realizaciones de la presente invención en conexión con los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 es una vista en sección, con partes recortadas, de un reactor de agua en ebullición para algunas realizaciones ejemplares de la invención.

40 La figura 2 es una gráfica de una k efectiva predicha para un comienzo no nominal de funcionamiento de ciclo en relación con la potencia en porcentaje como una función de la exposición de acuerdo con una realización ejemplar.

La figura 3 es un diagrama de flujo de un procedimiento de predicción de una k efectiva crítica en estados no nominales de acuerdo con una realización ejemplar.

45 La figura 4 es un diagrama de flujo de otro procedimiento de predicción de una k efectiva crítica en estados no nominales de acuerdo con otra realización ejemplar.

La figura 5 es un diagrama de bloques de un sistema informático ejemplar que puede usarse para implementar algunas realizaciones o componentes del sistema y/o procedimiento para predecir y/o modelar la k efectiva crítica en estados de núcleo no nominales.

50 La figura 6 es una gráfica de un comienzo de funcionamiento no nominal de ciclo que ilustra los valores de k efectiva reales como una comparación de los valores de k efectiva no nominal predicha tal como se ilustra en la figura 2 de acuerdo con una realización de la invención.

Debe entenderse que a través de la totalidad de los dibujos, números de referencia correspondientes indican partes y características correspondientes o similares.

55 La siguiente descripción es de naturaleza meramente ejemplar y no se pretende que limite la presente divulgación o las aplicaciones o usos de la divulgación.

Una realización ejemplar de un reactor nuclear que presenta algunos procedimientos y sistemas para modelar y predecir una k efectiva crítica para unas condiciones de núcleo no nominales se ilustra en la figura 1. La figura 1 es una vista en sección, con partes recortadas, de una vasija a presión de reactor nuclear de agua hirviendo (RPV) 10. En general, los componentes y partes que se ilustran son conocidos por los expertos en la técnica e incluyen diversos componentes asociados con el control y la supervisión de reactores, incluyendo un núcleo de reactor 12. Se genera calor en el interior del núcleo 12, el cual incluye unos haces de elementos combustibles 14 de material fisionable. Un refrigerante, tal como agua, se hace circular en sentido ascendente a través del núcleo 12, en algunas realizaciones a través de unas bombas de inyección 16 que proporcionan un flujo de refrigerante de control a través del núcleo de reactor 12. La cantidad de calor que se genera en el núcleo 12 se regula mediante la inserción y la retirada de una pluralidad de barras 18 de control de un material de absorción de neutrones, por ejemplo, hafnio. En la medida en la que una barra 18 de control se inserta en el haz de elementos combustibles 14, esta absorbe los neutrones que de otro modo se encontrarían disponibles para promover la reacción en cadena que genera calor en el núcleo 12. Las barras 18 de control se controlan mediante un mecanismo de accionamiento de barras de control (CRD) 20 que mueve la barra 18 de control en relación con los haces de elementos combustibles 14, controlando de ese modo la reacción nuclear en el interior del núcleo 12.

Un sistema de control y supervisión de reactor 22 recibe una pluralidad de señales de sensor de operaciones de núcleo CC_s a partir de los sensores (que no se muestran) en el núcleo 12 y asociadas con el reactor 10 para supervisar las operaciones del núcleo 12. Esto puede incluir, pero sin limitación, datos de presión de vasija de reactor de núcleo, temperatura de refrigerante, caudal de refrigerante, potencia de reactor y posición de barras de control. El sistema de control y supervisión de reactor 22 utiliza estos datos de entrada para determinar, entre otras características, las características térmicas del núcleo, el escape de neutrones, la pérdida de neutrones, las generaciones de neutrones y la k efectiva real (por ejemplo, valor propio k) durante cada estado de funcionamiento del núcleo 12. El sistema de control y supervisión de reactor 22 puede generar también unas señales de control CS para controlar una o más operaciones o características del reactor 10. Esto incluye unas señales de control CS_{CR} para controlar el mecanismo de accionamiento de barras de control 20 (y, por lo tanto, las barras 18 de control) y unas señales de control CS_{FR} para controlar el caudal de fluido a través del núcleo 12. La generación de la energía nuclear se controla mediante el sistema de control y supervisión de reactor 22, el cual controla las barras 18 de control y el flujo de refrigerante para controlar el núcleo 12, en especial durante los periodos de funcionamiento de reactor en un estado menor que el crítico, tal como el encendido y el apagado del reactor. El sistema de control y supervisión de reactor 22 puede controlar también estas operaciones de reactor en base a unos planes predeterminados, que pueden introducirse en el sistema o prepararse por el sistema como una función de algoritmos o modelos predeterminados para un funcionamiento planificado tal como un intercambio de barras de control o una condición de encendido o de apagado. En tales planes, el nivel de potencia de reactor programado para cada estado en el tiempo y/o cada exposición en el plan puede presentarse en un plan de potencia de reactor y un plan de control de barras de control relacionado para el funcionamiento de reactor. Otros parámetros, factores y correlaciones, incluyendo la k efectiva o el cambio en la k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia, pueden proporcionarse a, o desarrollarse por, el sistema 22 en base a uno o más procedimientos predefinidos implementados, por lo menos en parte, en el sistema 22.

En una realización, un procedimiento para determinar una k efectiva crítica en un estado de núcleo no nominal de una planta de energía nuclear incluye la determinación, para el estado de núcleo no nominal, de una densidad de las barras de control, una potencia de núcleo en porcentaje, un valor de reactividad de gadolinio, un valor de reactividad de Doppler y un valor de reactividad de xenón. Tal como conocen los expertos en la técnica, un valor de reactividad es el efecto que un parámetro, característica o componente tiene sobre la reactividad o la fisión de un reactor. La reactividad es una medida de la desviación de un reactor con respecto a la criticidad y, tal como se indica anteriormente, se define como $r = (k_{efec} - 1) / k_{efec}$, en la que k_{efec} es la k efectiva o el factor de multiplicación efectivo. La reactividad se expresa habitualmente en unidades de centavos, dólares, y en horas. El valor de gadolinio es, por lo tanto, el efecto que el gadolinio tiene sobre la reactividad en el interior de la planta de reactor particular, y de forma similar para el xenón y Doppler, por ejemplo, refiriéndose Doppler en el presente documento a la temperatura en el interior del reactor. Cada uno de los anteriores se determina como una función de, o se hace referencia a los mismos en el presente documento como que son "sensibles a" un plan o patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que incluye la identificación y especificación de uno o más estados de núcleo no nominales y una k efectiva de referencia. Tal como se hace referencia a "no nominal" en el presente documento, se refiere a una condición de potencia que es menor que el 100 por ciento y en la que el reactor no se encuentra en un estado crítico. Una k efectiva de referencia puede ser cualquier k efectiva predeterminada, tal como, a modo de ejemplo, una k efectiva base de diseño o una k efectiva nominal registrada última.

El procedimiento incluye el cálculo de un cambio en una k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia predefinida en uno o más estados de núcleo no nominales sensibles a dos o más parámetros en el estado o estados de núcleo no nominal correspondientes. Estos dos o más parámetros incluyen la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de xenón. La k efectiva crítica se genera para cada estado de núcleo no nominal deseado sensible al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal. Por ejemplo, esto puede ser un simple ajuste para la k efectiva de referencia mediante el cambio en algunas realizaciones o, en otras, puede definirse mediante una relación más compleja o a escala, tal como se determina mediante el modelado

de la planta de reactor particular o los tipos de plantas.

Adicionalmente, esto puede incluir el modelado del reactor con dos o más de estos parámetros, estableciendo correlaciones con uno o más de los parámetros que pueden efectuar el cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal. Esto puede incluir también una determinación de cambios entre un parámetro o correlación de parámetros a partir de un valor de referencia de los mismos, en lugar de simplemente una determinación del valor absoluto de uno o más parámetros. Por ejemplo, esto puede incluir un cambio en el valor de reactividad del gadolinio, Doppler y/o xenón, o un cambio en la densidad de las barras de control, a partir de un valor de referencia correspondiente de los mismos, para cada estado de núcleo no nominal asociado. En tales realizaciones, un cambio en la k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia predeterminada puede desarrollarse a partir de estas correlaciones y valores de cambio individuales.

El modelado de la k efectiva crítica o los cambios de delta de k efectiva pueden incluir también la identificación y/o determinaciones de coeficientes correspondientes como son típicas en el modelado. Esto podría aplicarse, en particular, en realizaciones que prevén predecir los valores de k efectiva para estados de núcleo no nominales mediante el uso, por lo menos en parte, de un polinomio de correlación empírico.

Una realización puede incluir la identificación de un resumen o conjunto global de correlaciones y coeficientes que intentan tener efecto sobre todos los impactos y cambios en la k efectiva para unas predicciones precisas. En tales casos, se determina una relación compleja y se aplica y se tiene en cuenta la totalidad de los parámetros y las correlaciones. Esto puede proporcionar una predicción muy precisa de la k efectiva o delta de k efectiva, por ejemplo, el cambio o la diferencia entre la k efectiva predicha y una k efectiva de referencia.

En algunos casos, una realización que lo abarque todo puede ser difícil, compleja y costosa de implementar. No obstante, tal como se analizará, unos procedimientos simplificados que utilicen subconjuntos del conjunto global pueden ser muy efectivos en la predicción de la k efectiva en unas condiciones de núcleo no nominales en base a uno o más factores, tal como el tipo de funcionamiento de núcleo no nominal (por ejemplo, comienzo de ciclo, arranque en ciclo, descenso de potencia de maniobra de potencia, aumento de potencia de maniobra de potencia, descenso de potencia de secuencia de intercambio de barras y aumento de potencia de secuencia de intercambio de barras, etc.), una determinación de tipos o clasificación de plantas predeterminadas tal como se analiza en el presente documento y/o una exposición en el estado de núcleo no nominal. Cada uno de los subconjuntos de correlaciones y coeficientes puede desarrollarse para cada planta de reactor en un análisis y configuración de sistema inicial o puede ajustarse en base a la experiencia, mediciones, o sintonización precisa durante las operaciones de planta.

Después de que la k efectiva se prediga para uno o más estados no nominales, puede determinarse o calcularse una tasa de refrigerante de núcleo para cada estado de núcleo no nominal como una función de la k efectiva predicha, el patrón de barras de control o cambios en la densidad de las barras de control y el plan de potencia de reactor (tal como el porcentaje de potencia). Tal como se conoce en la técnica, la densidad de las barras de control tiende a ser un nombre inapropiado. En general, tal como se conoce en la técnica, la densidad de las barras de control se refiere a la concentración de barras de control presentes en ese punto de estado y es igual a la longitud de la porción insertada de las barras de control frente a la máxima longitud que las barras de control pueden insertarse en el núcleo de reactor.

En algunas realizaciones, la k efectiva crítica puede modelarse matemáticamente o programarse en unas instrucciones ejecutables por ordenador para cada estado de núcleo no nominal en una condición de reactor no nominal mediante las correlaciones de uno o más parámetros que incluyen la potencia en porcentaje, la densidad de las barras de control, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de xenón y el valor de reactividad de Doppler. Tal como se indica anteriormente, los parámetros de valor de reactividad pueden determinarse para cada planta de reactor nuclear tal como durante una caracterización o análisis de planta inicial, pero pueden ajustarse durante las operaciones de planta para una sintonización precisa. Cada planta de reactor nuclear tiene unas características que son únicas para esa planta y no pueden predecirse con facilidad en base al diseño o a factores predeterminados.

La k efectiva crítica puede modelarse a través de la correlación de uno o más de estos parámetros entre sí y a través la determinación de coeficientes o pesos para una o más de las correlaciones. La k efectiva crítica, por ejemplo, puede modelarse como un coeficiente de normalización y un coeficiente diferente multiplicado por cada correlación. Ejemplos de correlaciones que tienen más de un parámetro incluyen la potencia en porcentaje multiplicada por la densidad de las barras de control; la potencia en porcentaje multiplicada por el valor de reactividad de xenón; el valor de reactividad de xenón multiplicado por la densidad de las barras de control; la potencia en porcentaje multiplicada por el valor de reactividad de gadolinio; la densidad de las barras de control multiplicada por el valor de reactividad de Doppler; la densidad de las barras de control multiplicada por el valor de reactividad de gadolinio; la potencia en porcentaje multiplicada por el valor de reactividad de Doppler; la potencia en porcentaje a una potencia de j ; la densidad de las barras de control a la potencia de j ; y el valor de reactividad de xenón multiplicado por el valor de gadolinio.

Tal como se indica, los coeficientes para cada parámetro o correlación puede determinarse en el momento del modelado de planta inicial. Por ejemplo, después de la determinación de los diversos parámetros y correlaciones, cada conjunto de correlaciones puede compararse con las k efectivas no nominales reales según se mide durante el funcionamiento de planta. Cada parámetro, factor y correlación puede ponderarse a través de un modelado por ordenador para determinar cada coeficiente de tal modo que los coeficientes proporcionan una relación de mejor ajuste matemático entre las correlaciones y la k efectiva real para una pluralidad de estados no nominales.

Tal como se indica anteriormente, la predicción de la k efectiva crítica puede realizarse no sobre las estimadas absolutas tal como se describen anteriormente, sino sobre un cambio del cambio crítico predicho en la k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia. En tal modelado, el cambio en la k efectiva crítica con respecto a la k efectiva de referencia para cada estado de núcleo no nominal "i" puede modelarse con un coeficiente de normalización y un coeficiente multiplicado por una o más de las siguientes correlaciones que se determinan para cada estado de núcleo no nominal como un cambio con respecto al valor de referencia predeterminado asociado tal como se describe anteriormente.

A modo de ejemplo, en una realización un cambio en la k efectiva con respecto al valor de puntos de referencia de potencia nominal para cada punto de referencia en una condición no nominal puede describirse mediante una relación que se define mediante los coeficientes y las correlaciones de los parámetros. Por ejemplo, tal relación de este tipo puede describirse mediante una fórmula matemática tal como se ilustra, a modo de ejemplo, en la ecuación [1]:

$$\begin{aligned} \Delta k^i = & a_0 + a_1 \Delta Cr^i + a_2 P^i + a_3 \Delta Gd^i + a_4 \Delta Dp^i + a_5 \Delta Xe^i + a_6 P^i \Delta Cr^i + a_7 P^i \Delta Xe^i + \\ & a_8 \Delta Xe^i \Delta Cr^i + a_9 P^i \Delta Gd^i + a_{10} \Delta Cr^i \Delta Dp^i + a_{11} \Delta Cr^i \Delta Gd^i + a_{12} P^i \Delta Dp^i + \\ & a_{13} (P^i)^j + a_{14} (\Delta Cr^i)^j + a_{15} \Delta Xe^i \Delta Gd^i + a_{16} \Delta Xe^i \Delta Dp^i \end{aligned} \quad [1]$$

en la que cada parámetro significa:

Cr: Densidad de las barras de control en el núcleo

P: Potencia de núcleo en porcentaje

Gd: Valor de gadolinio

Xe: Valor de xenón

Dp: Valor de Doppler

I punto de estado i-ésimo en la condición no nominal

Se proporciona ahora una definición detallada adicional de estos parámetros y, por lo tanto, de correlaciones:

potencia i-ésima = un estado de núcleo no nominal que se define mediante el funcionamiento no nominal y que tiene una potencia en porcentaje menor que 100 y una k efectiva no igual a uno

delta - un cambio en el parámetro en el estado no nominal con respecto al valor de referencia para ese parámetro en el mismo estado no nominal y que puede definirse adicionalmente como la relación de : $\Delta Y^i = Y^i - Y_{reference}$ en la que Y = k, Cr, Gd, Xe y Dp.

a_n = un coeficiente determinado como un coeficiente de normalización o coeficiente de peso para una correlación asociada. Cada coeficiente puede ser, en general, un número positivo o negativo tal como se determina mediante el modelado y el peso asociado para una planta nuclear particular

k = k efectiva crítica, siendo delta de k a la potencia i-ésima el cambio de la k efectiva en el estado de núcleo no nominal con respecto a la k efectiva de referencia en el mismo estado de núcleo no nominal i-ésimo

Cr = densidad de las barras de control, siendo delta de Cr a la potencia i-ésima el cambio de la densidad de las barras de control en el estado de núcleo nominal i-ésimo con respecto a la densidad de las barras de control de referencia en el mismo estado de núcleo no nominal i-ésimo y la delta de Cr a la potencia i-ésima tomada de nuevo a la potencia j-ésima

P = porcentaje de potencia total, siendo P a la potencia i-ésima el porcentaje de potencia en el estado de núcleo no nominal i-ésimo y P a la potencia i-ésima tomado de nuevo a la potencia j-ésima

Xe = el valor de reactividad de xenón, siendo delta de Xe a la potencia i-ésima el cambio en el valor de reactividad de xenón en el estado de núcleo no nominal i-ésimo con respecto al valor de reactividad de xenón de referencia en el mismo estado de núcleo no nominal i-ésimo

Gd = el valor de reactividad de gadolinio, siendo delta de Gd a la potencia i-ésima el cambio en el valor de reactividad de gadolinio en el estado de núcleo no nominal i-ésimo con respecto al valor de reactividad de gadolinio de referencia en el mismo estado de núcleo no nominal i-ésimo

D_p = el valor de reactividad de Doppler (temperatura), siendo ΔD_p a la potencia i -ésima el cambio en el valor de reactividad de Doppler en el estado de núcleo no nominal i -ésimo con respecto al valor de reactividad de Doppler de referencia en el mismo estado de núcleo no nominal i -ésimo.

- 5 Tal como se indica anteriormente, a pesar de que el modelado de la k efectiva crítica puede proveerse con los coeficientes y las correlaciones completos tal como se analiza anteriormente y tal como se ilustra en la relación de la ecuación [1], en algunas realizaciones, el modelado de la k efectiva en estados no nominales puede simplificarse y optimizarse. En algunas realizaciones, tal simplificación y optimización puede estar basada en un tipo de funcionamiento no nominal y en algunos casos puede estar basada en una identificación predeterminada de los factores o parámetros principales que afectan a una planta nuclear, clasificación o categorización de tipos de planta.
- 10 Con respecto al modelado y a la predicción simplificados para las operaciones no nominales, cuando el reactor se encuentra en el modo de arranque, tal como después de un reaprovisionamiento de combustible, un subconjunto de estos parámetros y correlaciones puede utilizarse para proporcionar una predicción muy fiable de los cambios de la k efectiva y, por lo tanto, predecir la k efectiva. Se ha mostrado un subconjunto diferente para otras operaciones críticas, incluyendo maniobras de barras de control o secuencias de intercambio barras.
- 15 Tal como se indica, el modelado y la predicción simplificados también pueden estar basados en una clasificación de tipos de planta predeterminados. Este esquema de simplificación puede incluir la identificación de una planta nuclear mediante un tipo o categoría que puede usarse más tarde en el modelado y la predicción de las k efectivas críticas en estados no nominales. Por ejemplo, algunas plantas nucleares pueden identificarse como una planta accionada por xenón en la que el parámetro principal y predominante y los coeficientes y las correlaciones asociados que afectan a la predicción de una k efectiva crítica son los cambios en la densidad de las barras de control con respecto al punto de referencia de potencia nominal, la potencia en porcentaje y el valor de reactividad de xenón, o por lo menos el cambio en el valor de reactividad de xenón con respecto al punto de referencia de potencia nominal. En tales plantas accionadas por xenón, las correlaciones en base al valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de gadolinio proporcionan un impacto no significativo sobre la predicción con precisión de la k efectiva crítica y, en ese sentido, pueden ignorarse en el procedimiento de modelado y de predicción. En su lugar, el valor de reactividad de xenón, la potencia en porcentaje y la densidad de las barras de control pueden usarse únicamente en las correlaciones y los coeficientes determinados y/o ajustarse para predecir de forma correcta y con precisión la k efectiva crítica, o cambios de la misma en relación con la k efectiva de referencia, en cada uno de los estados de núcleo no nominales.
- 20
- 25
- 30 La identificación o selección de un tipo de planta puede realizarse a partir de un modelado o comparación que utiliza una variedad de factores y procedimientos. Por ejemplo, puede usarse una comparación de un cambio o valor absoluto predicho en la k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia para uno o más estados de núcleo no nominales para una k efectiva medida para el estado de núcleo no nominal durante el funcionamiento real subsiguiente de la planta de reactor. Mediante la comparación y el modelado de la variedad de correlaciones, y la
- 35 identificación de coeficientes para las mismas, puede identificarse un tipo de planta que se corresponde de la mejor forma con el funcionamiento particular de la planta. Por ejemplo, los inventores de la presente invención han identificado que muchas plantas pueden clasificarse o bien como una planta accionada por xenón o bien como una planta accionada por gadolinio en base a una comparación y/o un modelado. En tales casos, puede simplificarse y optimizarse un funcionamiento de planta tal como un arranque de comienzo de ciclo mediante la utilización de un subconjunto de parámetros y correlaciones en base a la predeterminación de que una planta es o bien una planta accionada por gadolinio o bien una planta accionada por xenón.
- 40
- Por supuesto, las clasificaciones de tipo de planta también son posibles durante el modelado inicial y el análisis de los parámetros, correlaciones, determinaciones de coeficientes y comparaciones con parámetros y características reales o medidos. Esto puede incluir, pero no se limita a, plantas accionadas por reactividad de Doppler, plantas
- 45 accionadas por densidad de las barras de control.
- Tales modelado y predicción simplificados pueden afectar también a otros procedimientos. Por ejemplo, en una realización ejemplar, una identificación y clasificación de un tipo de planta como accionada por reactividad de xenón o accionada por reactividad de gadolinio puede ser aplicable solo en una o más operaciones de núcleo no nominales tal como durante un arranque de reactor inicial, por ejemplo, tal como un comienzo de un ciclo (BOC), por ejemplo,
- 50 puede no ser aplicable para las maniobras en ciclo de encendido o de apagado que incluyen secuencias de intercambio de barras de control o arranques en ciclo. En ese sentido, el modelado y la predicción simplificados de la k efectiva crítica provista mediante la identificación de una planta nuclear mediante un tipo de planta predeterminado particular, puede no ser aplicable en las operaciones no nominales de no BOC.
- No obstante, en esas operaciones no nominales de no BOC, puede ser aplicable otro modelado y predicción simplificados de la k efectiva crítica en base a otras clasificaciones de planta y/o en base al tipo de funcionamiento no nominal. Cada una de las maniobras de encendido y de apagado y/o los arranques en ciclo puede modelarse usando un subconjunto de los parámetros y las correlaciones anteriores en algunos escenarios. Por ejemplo, en algunas realizaciones, puede desarrollarse un procedimiento de modelo y de predicción simplificado para las maniobras de encendido y otro para las maniobras de apagado. Las predicciones y el modelado simplificados
- 60 pueden desarrollarse también para otras operaciones no nominales.

5 En una realización simplificada de este tipo de modelado y de predicción de la k efectiva crítica, una planta puede identificarse como una planta accionada por xenón. En tales realizaciones ejemplares, la determinación de la k efectiva crítica o cambios en la k efectiva crítica en relación con la k efectiva de referencia para el estado de núcleo no nominal particular en un arranque de comienzo de ciclo puede condensarse tal como se ilustra, a modo de ejemplo, en la relación que se ejemplifica mediante la ecuación [2].

$$\Delta k' = a_0 + a_1 \Delta Cr' + a_2 P' + a_3 \Delta Xe' + a_4 P' \Delta Cr' + a_5 P' \Delta Xe' + a_6 \Delta Xe' \Delta Cr' \quad [2]$$

En una realización ejemplar de un procedimiento de modelado y de predicción de este tipo, una selección de coeficientes puede aplicarse a una relación tal como se ilustra mediante la ecuación [2] y se ilustra a modo de ejemplo en la ecuación [2B].

$$\Delta k' = -1,77E-3 + 3,54E-2 \Delta Cr' + 1,75E-5 P' + 2,46E-1 \Delta Xe' - 3,42E-3 P' \Delta Xe' - 4,22 \Delta Xe' \Delta Cr' + 5,94E-5 P' \Delta Cr' \quad [2B]$$

10 La figura 2 ilustra los valores de delta de k efectiva predichos para los estados de núcleo no nominales en un arranque de comienzo de ciclo de una planta previamente identificada como una planta accionada por gadolinio. Tal como se muestra en la figura 2, los valores de delta de k efectiva predichos se ilustran con referencia a cero para una pluralidad de exposiciones asociadas con unos estados para unas potencias en porcentaje desde un 40 por ciento hasta un 100 por ciento. El delta o cambio en los valores de k efectiva predicho comienzan en aproximadamente un 40 por ciento de potencia a menos de 0 o negativo y aumentan a aproximadamente 0,005 a partir de unos porcentajes de potencia desde un 42 por ciento hasta un 65 por ciento. Cuando la potencia aumenta aproximadamente un 65 por ciento, la k efectiva predicha disminuye desde 0,005 hasta cero a aproximadamente un 80 por ciento de potencia y a continuación cae por debajo de cero hasta un 100 por ciento de potencia. Estos valores para cambios en la k efectiva pueden usarse en conjunción con una k efectiva de referencia para proporcionar una k efectiva predicha mejorada para planificar las operaciones del reactor, tal como, a modo de ejemplo, un caudal de refrigerante optimizado en cada uno de los estados no nominales para el funcionamiento de potencia no nominal. La precisión mejorada de esta predicción ejemplar se abordará a continuación y en referencia a la figura 6.

25 Como otra realización ejemplar, un análisis de planta de reactor nuclear de las operaciones de planta nuclear y de los factores/ parámetros de impacto de neutrones en el interior del núcleo puede identificar que una planta debería categorizarse con más precisión como un tipo de planta accionada por gadolinio. De forma similar a lo que se aborda anteriormente con respecto a la planta de tipo xenón, una planta puede clasificarse o identificarse como un tipo de planta de gadolinio en el que se determina que el valor de reactividad de gadolinio es un factor predominante además de la densidad de las barras de control y la potencia en porcentaje. En algunas realizaciones, tal como se ilustra a modo de ejemplo en la relación de la ecuación [3], una planta de tipo gadolinio puede modelarse para el arranque de núcleo de una forma simplificada en comparación con la relación que se ilustra en la ecuación [1] como un subconjunto de los coeficientes, parámetros y correlaciones.

$$\Delta k' = a_0 + a_1 \Delta Cr' + a_2 P' + a_3 \Delta Gd' + a_4 \Delta Dp + a_5 P' \Delta Cr' + a_6 P' \Delta Gd' + a_{10} \Delta Cr' \Delta Dp' + a_{11} \Delta Cr' \Delta Gd' + a_{13} (P')^j \quad [3]$$

35 Tal como se muestra, la relación tal como se resume a modo de ejemplo en la ecuación [1] puede simplificarse para incluir solo el coeficiente de normalización, el cambio en la densidad de las barras de control, la potencia en porcentaje, el cambio del valor de reactividad de gadolinio; el cambio en el valor de reactividad de Doppler en porcentaje, la potencia en porcentaje multiplicada por el cambio en la densidad de las barras de control, la potencia en porcentaje multiplicada por el cambio en el valor de reactividad de gadolinio, el cambio en la densidad de las barras de control multiplicado por el cambio en el valor de reactividad de Doppler, el cambio en la densidad de las barras de control multiplicado por el cambio en el valor de reactividad de gadolinio y la potencia en porcentaje a una potencia de j.

45 El coeficiente de normalización, así como los coeficientes a_n para cada uno de los términos de correlación, pueden determinarse en el momento de un análisis y modelado de sistema inicial y usarse a continuación de lo anterior en una planificación de condiciones de núcleo no nominales. Adicionalmente, durante el funcionamiento de planta, uno o más de los coeficientes a_n puede cambiarse o ajustarse para sintonizar con precisión o ajustar la relación y/o el modelo en base a un análisis continuado y la comparación adicional de las k efectivas críticas predichas en estados de núcleo no nominales con las k efectivas críticas reales determinadas en respuesta a unas mediciones de

funcionamiento. Un ejemplo de los coeficientes de relación a_n de la ecuación [3] se ilustra en la ecuación [3B].

$$\Delta k^i = -5,427E-3 - 2,71E-1 \Delta C r^i + 2,52E-4 P^i + 3,12 \Delta G d^i - 9,86E-1 \Delta D p^i + 2,75E-3 P^i \Delta C r^i - \quad [3B]$$

$$4,45E-2 P^i \Delta G d^i + 56,4 \Delta C r^i \Delta D p^i - 17,3 \Delta C r^i \Delta G d^i - 2,03E-6 (P^i)^2$$

Tal como se indica anteriormente, el modelado y la predicción de la k efectiva crítica en estados no nominales puede simplificarse también en base a la clasificación o identificación del funcionamiento de planta no nominal. Tal como se indica anteriormente, la clasificación de un tipo de planta, por ejemplo accionada por xenón, accionada por gadolinio o accionada por Doppler, puede proporcionar una predicción mejorada simplificada para el comienzo de los arranques de reactor de ciclo. No obstante, en las maniobras no nominales no de arranque, en algunas realizaciones, estas clasificaciones de tipos de planta pueden no ser aplicables en la misma medida.

En algunas realizaciones para las maniobras de encendido y de apagado, no asociadas con un arranque de comienzo de ciclo, un modelado y predicción simplificados de la k efectiva crítica pueden modelarse como un subconjunto de coeficientes, parámetros y correlaciones que incluyen un coeficiente de normalización, el cambio en la densidad de las barras de control; la potencia en porcentaje, el cambio en el valor de reactividad de gadolinio; el cambio en el valor de reactividad de Doppler; el cambio en el valor de reactividad de xenón; la potencia en porcentaje multiplicada por el cambio en la densidad de las barras de control; la potencia en porcentaje multiplicada por el cambio en el valor de reactividad de xenón; el cambio en el valor de reactividad de xenón multiplicado por el cambio en la densidad de las barras de control; la potencia en porcentaje multiplicada por el cambio en el valor de reactividad de gadolinio; el cambio en la densidad de las barras de control multiplicado por el cambio en el valor de reactividad de Doppler; el cambio en la densidad de las barras de control multiplicado por el cambio en el valor de reactividad de gadolinio; la potencia en porcentaje multiplicada por el cambio en el valor de reactividad de Doppler; la potencia en porcentaje a una potencia de j ; el cambio en la densidad de las barras de control a la potencia de j ; y el cambio en el valor de reactividad de xenón multiplicado por el cambio en el valor de reactividad de gadolinio.

$$\Delta k^i = a_0 + a_1 \Delta C r^i + a_2 P^i + a_3 \Delta G d^i + a_4 \Delta D p^i + a_5 \Delta X e^i + a_6 P^i \Delta C r^i + \quad [4]$$

$$a_7 P^i \Delta X e^i + a_8 P^i \Delta G d^i + a_{16} \Delta X e^i \Delta D p^i$$

No obstante, durante una maniobra de aumento de potencia en ciclo, en algunas realizaciones la relación puede ajustarse mediante la sustitución de la correlación del cambio en el valor de reactividad de xenón multiplicado por el cambio en el valor de reactividad de Doppler, tal como se analiza anteriormente y tal como se muestra en una relación ejemplar de la ecuación [4], con una correlación diferente. Para las maniobras de aumento de potencia, ese término puede sustituirse, en su lugar, con una correlación diferente, el cambio en el valor de reactividad de xenón multiplicado por el cambio en el valor de gadolinio. Una relación de este tipo puede ilustrarse a modo de ejemplo en una relación tal como se ilustra en la ecuación [5] para un no comienzo de maniobras de aumento de potencia de ciclo.

$$\Delta k^i = a_0 + a_1 \Delta C r^i + a_2 P^i + a_3 \Delta G d^i + a_4 \Delta D p^i + a_5 \Delta X e^i + a_6 P^i \Delta C r^i + \quad [5]$$

$$a_7 P^i \Delta X e^i + a_8 P^i \Delta G d^i + a_{15} \Delta X e^i \Delta G d^i$$

Una realización de la relación que se ilustra en la ecuación [5] con coeficientes ejemplares se ilustra, a modo de ejemplo, en la ecuación [5B].

$$\Delta k^i = 0,019 - 0,12 \Delta C r^i - 1,19E-4 P^i + 8,61 \Delta G d^i - 2,81 \Delta D p^i - 1,14 \Delta X e^i + \quad [5B]$$

$$2,16E-3 P^i \Delta C r^i + 0,017 P^i \Delta X e^i - 0,13 P^i \Delta G d^i + 258,08 \Delta X e^i \Delta G d^i$$

Haciendo referencia a continuación a la figura 3, un diagrama de flujo 50 ilustra una realización de un modelado de planta en dos fases. La fase A que se ilustra por encima de la línea de puntos, se realiza típicamente durante el análisis y sistema inicial y la implementación del procedimiento. La fase A proporciona la selección y/o identificación de una o más categorizaciones o determinaciones del tipo de plantas. Adicionalmente, se determinan los parámetros que incluyen uno o más valores de reactividad y los coeficientes asociados con los parámetros y se definen o se determinan las correlaciones de predicción de k efectiva crítica tal como se describe anteriormente. La fase B se realiza típicamente durante un funcionamiento de núcleo no nominal segundo o subsiguiente para la predicción de

cambios en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia para cada estado no nominal definido en el funcionamiento de núcleo no nominal subsiguiente.

La fase A puede comenzar mediante la recepción de un plan de barras de control a partir del procedimiento 52, un plan de potencia de reactor a partir del procedimiento 54, y uno o más valores de referencia a partir del procedimiento 56. El procedimiento 58 proporciona la determinación del valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de xenón y el valor de reactividad de Doppler, así como los cambios en cada uno de esos valores determinados con respecto a los valores de referencia proporcionados. Esto se realiza típicamente para cada uno de la pluralidad de estados de núcleo no nominales en el plan de potencia de reactor del procedimiento 54. En el procedimiento 60 se determina un cambio en la k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia junto con una pluralidad de correlaciones, tal como las que se describen, o un subconjunto de las mismas, tal como se ilustra en la ecuación [1] anterior, a modo de ejemplo. Las k efectivas medidas o reales se reciben a partir del procedimiento 62 mediante el procedimiento 64. Estas k efectivas reales pueden determinarse a partir del funcionamiento real de la planta de reactor en base al plan de potencia de reactor y al plan de barras de control. El procedimiento 64 compara estas k efectivas reales con las correlaciones y las k efectivas predichas, y típicamente los coeficientes se ajustan y se refinan y uno o más tipos de planta se seleccionan o se identifican en base a la comparación.

La fase B recibe los resultados de la fase A a partir del procedimiento 64 en el procedimiento 66. Un plan de potencia no nominal subsiguiente se proporciona en el procedimiento 68 y un plan de configuración de barras de control asociado se proporciona en el procedimiento 70, cada uno de los cuales se reciben para los que se desea una predicción de la k efectiva crítica. El funcionamiento se identifica por tipo en el procedimiento 72, tal como se describe anteriormente, y uno o más valores de referencia que se proporcionan en el procedimiento 74 se identifican para el funcionamiento. Estos valores de referencia pueden incluir una k efectiva de referencia en base al tipo de funcionamiento o el tipo de planta, o pueden estar basados en los valores de k efectiva nominales últimos o en un valor de k efectiva base de diseño. En base al tipo de planta, el tipo de funcionamiento, los parámetros y las correlaciones provistos, un cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia se determina en el procedimiento 76. Un valor absoluto para la k efectiva crítica se determina en el procedimiento 78 tal como se describe en general anteriormente y mediante la utilización de la salida del procedimiento 76 y la k efectiva de referencia a partir del procedimiento 74. Un caudal de refrigerante para cada estado de núcleo no nominal en el plan de potencia no nominal subsiguiente 68 puede generarse entonces en el procedimiento 80. Por supuesto, tal como conocen los expertos en la técnica, también pueden ajustarse otros procesos no nominales en base al cambio predicho en la k efectiva a partir del procedimiento 76 o la k efectiva predicha del procedimiento 78.

Tal como se indica anteriormente, algunos procedimientos que se describen en el presente documento prevén un análisis inicial y selección de tipo de planta cuando se implementa en una planta nuclear particular tal como se muestra mediante ilustración en la figura 3 como la fase A. Adicionalmente, también pueden realizarse ajustes a estas determinaciones iniciales durante el funcionamiento de planta, en general para refinar el modelado inicial que incluye el conjunto inicial de valores de reactividad de gadolinio, xenón y Doppler y los coeficientes iniciales. Adicionalmente, también pueden hacerse unos tipos de planta nuevos o diferentes en base a un modelado adicional o cambios en la planta con el tiempo, por diseño o por funcionamiento. En ese sentido, cada uno de los procedimientos o métodos, incluso los identificados como la fase A, pueden verse como primeras etapas u operaciones, o posteriormente como una o más segundas operaciones. Tales segundas operaciones pueden incluir una o más operaciones de planta no nominales definidas por un segundo patrón de barras de control, un segundo plan de potencia de reactor que define una segunda pluralidad de estados de núcleo no nominales para un tipo particular de funcionamiento de reactor no lineal que define unos estados de núcleo no nominales a lo largo de las exposiciones planificadas, una segunda pluralidad de k efectivas de referencia, una segunda densidad de las barras de control de referencia y unos segundos valores de reactividad de referencia. Cada uno de estos se utilizaría para predecir las k efectivas críticas o cambios en las mismas para los estados de núcleo no nominales en el segundo plan de potencia de reactor.

Haciendo referencia a continuación a la figura 4, se describe una realización ejemplar adicional de segundas operaciones subsiguientes. En el procedimiento 82, se identifica una primera etapa en la que el tipo de funcionamiento 72 se identifica en primer lugar. En el presente ejemplo, en el procedimiento 84 se determina en primer lugar si el funcionamiento es, o no, un arranque de comienzo de ciclo. Si este es un arranque de comienzo de ciclo, se identifica una k efectiva base de diseño a partir del procedimiento 86 como la k efectiva de referencia para el procedimiento 74. No obstante, si este no es un comienzo de inicio de ciclo, se usa una k efectiva nominal última a partir del procedimiento 88 como la k efectiva de referencia en 74.

El procedimiento de análisis 66 recibe la k efectiva de referencia a partir del procedimiento 74, el perfil o plan de potencia planificado a partir del procedimiento 68 y la configuración de barras de control planificada a partir del procedimiento 70. Los valores de reactividad para gadolinio, xenón y Doppler se determinan en el procedimiento 92 y los cambios en estos valores de reactividad se determinan en el procedimiento 94. A continuación, si el funcionamiento no nominal es una operación de arranque, el tipo de planta anteriormente identificado se considera en el procedimiento 98. Si la planta se identificó como accionada por xenón, el procedimiento 100 proporciona la determinación de los valores de k efectiva crítica mediante una relación simplificada que se define, a modo de ejemplo, con la ecuación [2] anterior. Si la planta se identificó como accionada por gadolinio, el procedimiento 102 proporciona la determinación de los valores de k efectiva crítica mediante una relación simplificada diferente tal

como se define, a modo de ejemplo, con la ecuación [3]. No obstante, si el funcionamiento no es una operación de arranque sino que es una operación de descenso de potencia, el procedimiento 104 provee que los valores de k efectiva crítica se determinen mediante una relación simplificada que se define, a modo de ejemplo, con la ecuación [4]. Si el funcionamiento no es una operación de arranque sino que es una operación de aumento de potencia o de encendido, el procedimiento 104 provee que los valores de k efectiva crítica se determinen mediante una relación simplificada que se define, a modo de ejemplo, con la ecuación [5].

Por supuesto, tal como entienden los expertos en la técnica, también son posibles y aún se encuentran dentro del alcance de la presente divulgación otros flujos, modelos o ecuaciones de proceso, a pesar de que ilustran mediante los flujos de las figuras 3 y 4.

Un sistema para determinar una k efectiva crítica en un estado de núcleo no nominal en un núcleo de reactor nuclear incluye un ordenador que tiene un procesador, una memoria, una entrada configurada para recibir un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor y una k efectiva de referencia, y unas instrucciones ejecutables por ordenador adaptadas para ejecutar un procedimiento. El procedimiento ejecutable mediante las instrucciones ejecutables por ordenador incluye uno o más de los procedimientos tal como se describen anteriormente, y variaciones a tales procedimientos descritos tal como entienden los expertos en la técnica después de revisar la presente divulgación.

Un entorno operativo informático ejemplar para una o más realizaciones para determinar los valores y correlaciones, predecir los valores de k efectiva y delta de los valores de k efectiva de cambio, y determinar los valores de k efectiva ajustados y caudales de refrigerante, se ilustra, a modo de ejemplo, en la figura 5. El entorno operativo para una planificación y supervisión de núcleo de reactor o el sistema de predicción 22 puede incluir un ordenador 112 que comprende por lo menos una unidad 112 de procesamiento (CPU) de alta velocidad, en conjunción con un sistema 114 de memoria interconectado con por lo menos una estructura de bus 116, una entrada 118 y una salida 122.

La entrada 118 y la salida 122 son familiares y pueden implementarse en asociación con las interfaces de usuario locales y remotas, así como un controlador, sistema de funcionamiento remoto y sistema de operaciones, a modo de ejemplo. La entrada 118 puede incluir, a modo de ejemplo, un teclado, un ratón, un transductor físico (por ejemplo, un micrófono), o una interfaz o puerto de comunicaciones, y está interconectada con el ordenador 110 a través de una interfaz de entrada 120. La salida 122 puede incluir un visualizador, una impresora, un transductor (por ejemplo, un altavoz), una interfaz o puerto de comunicaciones de salida, etc., y estar interconectada con el ordenador 110 a través de una interfaz de salida 124. Algunos dispositivos, tal como un adaptador de red o un módem, pueden usarse como dispositivos de entrada y/o de salida.

La CPU 112 ilustrada es de diseño familiar e incluye una unidad lógica aritmética (ALU) 126 para realizar cálculos, una colección de registros 128 para el almacenamiento temporal de datos e instrucciones, y una unidad de control 130 para controlar el funcionamiento del sistema 110. Cualquiera de una variedad de procesadores, incluyendo por lo menos los de Digital Equipment, Sun, MIPS, Motorola/ Freescale, NEC, Intel, Cyrix, AMD, HP y Nexgen, se prefiere por igual para la CPU 112. La realización que se ilustra de la divulgación funciona en un sistema operativo diseñado para poder transportarse a cualquiera de estas plataformas de procesamiento.

El sistema 114 de memoria incluye, en general, una memoria principal de alta velocidad 132 en forma de un soporte tal como dispositivos semiconductores de memoria de acceso aleatorio (RAM) y de memoria de solo lectura (ROM), y un almacenamiento secundario 134 en forma de soportes de almacenamiento a largo plazo tal como discos flexibles, discos duros, cinta, CD-ROM, memoria flash, etc. y otros dispositivos que almacenen datos usando soportes de registro eléctricos, magnéticos, ópticos u otros. La memoria principal 132 puede incluir también una memoria de visualización de vídeo para visualizar imágenes a través de un dispositivo de visualizador. Los expertos en la técnica reconocerán que el sistema 114 de memoria puede comprender una variedad de componentes alternativos que tienen una variedad de capacidades de almacenamiento.

Como es familiar para los expertos en la técnica, el sistema 22 puede incluir además un sistema operativo y por lo menos un programa de aplicación (que no se muestra). El sistema operativo es el conjunto de software el cual controla el funcionamiento del sistema informático y la asignación de recursos. El programa de aplicación es el conjunto de software que realiza una tarea que desea el usuario, usando unos recursos informáticos que se encuentran disponibles a través del sistema operativo. Ambos residen en el sistema 114 de memoria que se ilustra. Tal como conocen los expertos en la técnica, alguno de los procedimientos, métodos y/o funciones que se describen en el presente documento pueden implementarse como software y almacenarse en diversos tipos de soporte legible por ordenador como unas instrucciones ejecutables por ordenador. En diversas realizaciones del sistema de medición de radiactividad estabilizada que se describe mediante un ejemplo en el presente documento, el sistema informático puede incluir un programa operativo y de aplicación robusto que tiene las instrucciones ejecutables por ordenador para realizar uno o más de los procedimientos anteriores. Adicionalmente, una o más de las interfaces de usuario locales y remotas, sistema de operaciones y sistema de operaciones remotas pueden incluir, entre otros programas de software de aplicación con instrucciones ejecutables por ordenador, una aplicación de cliente ligera para la comunicación y el funcionamiento interactivo con uno o más controladores, tal como se describe anteriormente a modo de ejemplo.

De acuerdo con las prácticas de los expertos en la técnica de la programación informática, la presente divulgación se describe a continuación con referencia a unas representaciones simbólicas de las operaciones que se realizan por el sistema 22. A veces, se hace referencia a tales operaciones como ejecutables por ordenador. Se apreciará que las operaciones que se representan de forma simbólica incluyen la manipulación por la CPU 112 de unas señales eléctricas que representan bits de datos y el mantenimiento de bits de datos en ubicaciones de memoria en el sistema 114 de memoria, así como otro procesamiento de señales. Las ubicaciones de memoria en las que se mantienen bits de datos son unas ubicaciones físicas que tienen unas propiedades eléctricas, magnéticas o ópticas que se corresponden con los bits de datos. La divulgación puede implementarse en un programa o programas, que comprenden una serie de instrucciones almacenadas en un soporte legible por ordenador. El soporte legible por ordenador puede ser cualquiera de los dispositivos, o una combinación de los dispositivos, que se describen anteriormente en conexión con el sistema 114 de memoria.

Los expertos en la técnica deben entender que algunas realizaciones de sistemas o componentes para predecir las k efectivas críticas y determinar caudales de refrigerante en unas condiciones de núcleo no nominales, tal como se describe en el presente documento, pueden tener más o menos componentes de sistema de procesamiento informático y encontrarse aún dentro del alcance de la presente divulgación.

Diversas realizaciones de los procedimientos y las correlaciones tal como se describen en el presente documento se han sometido a ensayo en diversas maniobras de potencia no nominales, secuencias de intercambio barras y arranques diferentes y se ha mostrado que proporcionan unas mejoras significativas en la predicción de la k efectiva crítica en estados no nominales. En general, las condiciones operativas en las que esta precisión aumentada en la predicción es importante se dan cuando el reactor se encuentra entre un 40 % de potencia nominal y un 100 % de potencia nominal para las operaciones de arranque de reactor. Para las maniobras de potencia después del arranque, esta precisión aumentada es de una importancia primaria para unos regímenes de potencia de entre un 60 % y un 100 %.

Se ha mostrado que una o más realizaciones, tal como se describen en el presente documento, proporcionan una predicción mejorada de la k efectiva crítica o valor propio k para su uso en la planificación de núcleo de reactor para condiciones no nominales que incluyen la determinación de los cálculos de caudal de refrigerante. Se ha mostrado que algunas realizaciones ejemplares, tal como se describen en el presente documento, reducen el error en la predicción del valor propio k crítico hasta de 70 a 80 pcm en la mayor parte de los casos. Esto es un aumento considerable en la precisión con respecto a los procedimientos y sistemas anteriores, que proporcionaban unos errores de predicción del orden de 700 pcm, por ejemplo, típicamente las estimadas de los valores de k efectiva crítica (por ejemplo, valores propios k) en condiciones no nominales fueron del orden de 700 pcm. Como resultado, la determinación de los caudales de refrigerante en estas condiciones y estados no nominales se ha mejorado de forma significativa.

La figura 6 ilustra un resultado de someter a ensayo una realización del procedimiento y los sistemas que se describen en el presente documento. La figura 6 incluye una comparación de la k efectiva crítica supervisada real con la k efectiva crítica predicha para un arranque de comienzo de ciclo de una planta de energía nuclear típica tal como se ilustra en la figura 2. También se muestra la diferencia entre el valor predicho y el valor real. Alguno de los procedimientos y sistemas tal como se describen en el presente documento puede proporcionar mejoras para la predicción de las k efectivas críticas no solo en la región de aplicación preferente de un 40 por ciento de potencia a un 100 por ciento de potencia, sino también en otro intervalo (que no se muestra en la figura 6). La aplicación de la presente divulgación puede proporcionar unas mejoras sustanciales con respecto a los procedimientos y sistemas previos y se ha mostrado que proporcionan unas mejoras en la optimización de las operaciones de reactor no nominales.

Cuando se describen elementos o características y/o realizaciones de los mismos, se pretende que los artículos "un", "una", "el/la", y "dicho/a" signifiquen que existen uno o más de los elementos o características. Se pretende que las expresiones "comprendiendo/ que comprende", "incluyendo/ que incluye" y "teniendo/ que tiene" sean inclusivas y signifiquen que puede haber elementos o características adicionales más allá de los que específicamente se describen.

Los expertos en la técnica reconocerán que pueden hacerse diversos cambios a las implementaciones y realizaciones ejemplares que se describen anteriormente, sin apartarse del ámbito de la divulgación. Por consiguiente, toda la materia contenida en la descripción anterior o que se muestra en los dibujos adjuntos deberá interpretarse como ilustrativa y no en un sentido limitante.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para controlar el funcionamiento de una planta de energía nuclear que incluye la determinación de un caudal de refrigerante de núcleo para el estado de núcleo no nominal del reactor nuclear, siendo el caudal de refrigerante sensible a una k efectiva crítica, el patrón de barras de control y el plan de potencia de reactor, comprendiendo el procedimiento un procedimiento implementado por ordenador para determinar la k efectiva crítica en un estado del núcleo (12) no nominal, que comprende:

determinar para el estado de núcleo no nominal una densidad de las barras (18) de control, una potencia de núcleo en porcentaje, un valor de reactividad de gadolinio, un valor de reactividad de Doppler y un valor de reactividad de xenón sensible a un patrón de barras de control, un plan de potencia de reactor que incluye el estado de núcleo no nominal, y una k efectiva de referencia;

calcular un cambio en una k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal sensible a dos o más parámetros en el estado de núcleo no nominal, comprendiendo dichos parámetros la densidad de las barras de control y el valor de reactividad de Doppler; y generar la k efectiva crítica en el estado de núcleo no nominal sensible al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal, que comprende además:

determinar en el estado del núcleo (12) no nominal un cambio en un valor de reactividad de gadolinio con respecto a un valor de reactividad de gadolinio de referencia asociado con la k efectiva de referencia; determinar en el estado de núcleo no nominal un cambio en la densidad de las barras de control con respecto a una densidad de las barras (18) de control de referencia asociada con la k efectiva de referencia.

2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende además determinar una pluralidad de correlaciones que afectan al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal, en el que la determinación de cada correlación para el estado del núcleo (12) no nominal incluye la determinación de uno o más parámetros para el estado de núcleo no nominal seleccionado del grupo que consiste en una potencia de núcleo en porcentaje, un cambio en el valor de reactividad de gadolinio, un cambio en el valor de reactividad de Doppler, un cambio en el valor de reactividad de xenón y un cambio en la densidad de las barras (18) de control, en el que el plan de potencia de reactor incluye una exposición que define, por lo menos en parte, el estado de núcleo no nominal.

3. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, que comprende además identificar un coeficiente para cada correlación como una función de una exposición en el estado del núcleo (12) no nominal, un tipo de planta y un tipo de funcionamiento de planta no nominal; e identificar un polinomio de correlación empírico que incluye un conjunto resumen de la pluralidad de correlaciones y coeficientes que afectan al cambio en la k efectiva con respecto a la k efectiva de referencia en el estado de núcleo no nominal, en el que el polinomio de correlación empírico proporciona un modelo para cambios en la k efectiva para diversos estados de núcleo no nominales de un núcleo (12) nuclear.

4. El procedimiento de la reivindicación 3, que comprende además seleccionar un subconjunto de las correlaciones en la correlación polinómica empírica como una función del estado del núcleo (12) no nominal, un tipo de planta predeterminado y un tipo de funcionamiento de planta no nominal asociado con el estado de núcleo no nominal, en el que el cálculo del cambio de k efectiva es sensible al subconjunto seleccionado de correlaciones, en el que la selección del subconjunto de correlaciones es sensible a un tipo de funcionamiento no nominal seleccionado del grupo que consiste en comienzo de ciclo, arranque en ciclo, descenso de potencia de maniobra de potencia, aumento de potencia de maniobra de potencia, descenso de potencia de secuencia de intercambio de barras y aumento de potencia de secuencia de intercambio de barras (18) y en el que la selección de un subconjunto de correlaciones incluye la creación de un modelo separado para calcular el cambio en la k efectiva con respecto a la k de referencia para cada estado de núcleo no nominal en base al tipo de funcionamiento de planta no nominal y para un funcionamiento de planta no nominal de arranque, también en base al tipo de planta predeterminado.

5. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, que comprende además: medir una k efectiva durante un estado del núcleo (12) no nominal; comparar la k efectiva crítica determinada con la k efectiva medida; y seleccionar un tipo de planta del grupo que consiste en accionada por xenón y accionada por gadolinio en respuesta a la comparación, en el que la selección del subconjunto de correlaciones es sensible al tipo de planta seleccionado.

6. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, en el que la planta de energía nuclear es una primera planta de energía nuclear y en el que la selección del tipo de planta de energía para la primera planta de energía nuclear se realiza durante el modelado de un núcleo (12) de la primera planta de energía nuclear, que comprende además una segunda planta de energía nuclear, en el que la selección de un tipo de planta de energía para la segunda planta de energía nuclear se realiza durante un modelado de núcleo de la segunda planta de energía nuclear.

7. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, en el que el funcionamiento de planta no nominal, el estado

del núcleo (12) no nominal, el tipo de planta predeterminado y el subconjunto seleccionado de correlaciones están seleccionados del grupo que consiste en:

- 5 a. el funcionamiento de planta no nominal asociado con el estado de núcleo no nominal es un comienzo de ciclo y el tipo de planta predeterminado es accionada por xenón, el subconjunto seleccionado de correlaciones es sensible al conjunto de parámetros que consiste en el cambio en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje y el cambio en el valor de reactividad de xenón;
- 10 b. el funcionamiento de planta no nominal asociado con el estado de núcleo no nominal es un comienzo de ciclo y el tipo de planta predeterminado es un tipo de planta accionada por xenón, el subconjunto seleccionado de correlaciones es sensible al conjunto de parámetros que consiste en el cambio en la densidad de las barras (18) de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el cambio en el valor de reactividad de gadolinio y el cambio en el valor de reactividad de Doppler;
- 15 c. el tipo de funcionamiento no nominal es una maniobra de descenso de potencia, el subconjunto seleccionado de correlaciones sensibles al conjunto de parámetros que consiste en el cambio en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el cambio en el valor de reactividad de xenón, un cambio en el valor de reactividad de Doppler, un cambio en el valor de reactividad de gadolinio; y
- d. el tipo de funcionamiento no nominal es una maniobra de aumento de potencia, el subconjunto seleccionado de correlaciones sensibles al conjunto de parámetros que consiste en el cambio en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el cambio en el valor de radiactividad de xenón, el cambio en el valor de reactividad de gadolinio y el cambio en el valor de reactividad de Doppler.

20 8. El procedimiento de cualquier reivindicación anterior, que comprende además:

- 25 determinar la densidad de las barras (18) de control, la potencia del núcleo (12) en porcentaje, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de xenón para cada uno de una pluralidad de estados de núcleo no nominales sensibles al plan de patrones de barras de control, el plan de potencia de reactor que incluye la pluralidad de estados de núcleo no nominales, y una o más k efectivas de referencia asociadas con la pluralidad de estados de núcleo no nominales;
- 30 calcular el cambio en la k efectiva con respecto a una k efectiva de referencia asociada en cada uno de la pluralidad estados de núcleo no nominales sensibles a dos o más parámetros en los estados de núcleo no nominales seleccionados del grupo que consiste en la densidad de las barras de control, la potencia de núcleo en porcentaje, el valor de reactividad de gadolinio, el valor de reactividad de Doppler y el valor de reactividad de xenón;
- generar la k efectiva crítica en cada uno de los estados de núcleo no nominales sensibles al cambio asociado en la k efectiva para cada estado de núcleo no nominal; y
- determinar un plan de tasa de refrigerante de núcleo sensible a las k efectivas críticas generadas para cada estado de núcleo no nominal, el patrón de las barras (18) de control y el plan de potencia de reactor.

35

FIG. 1

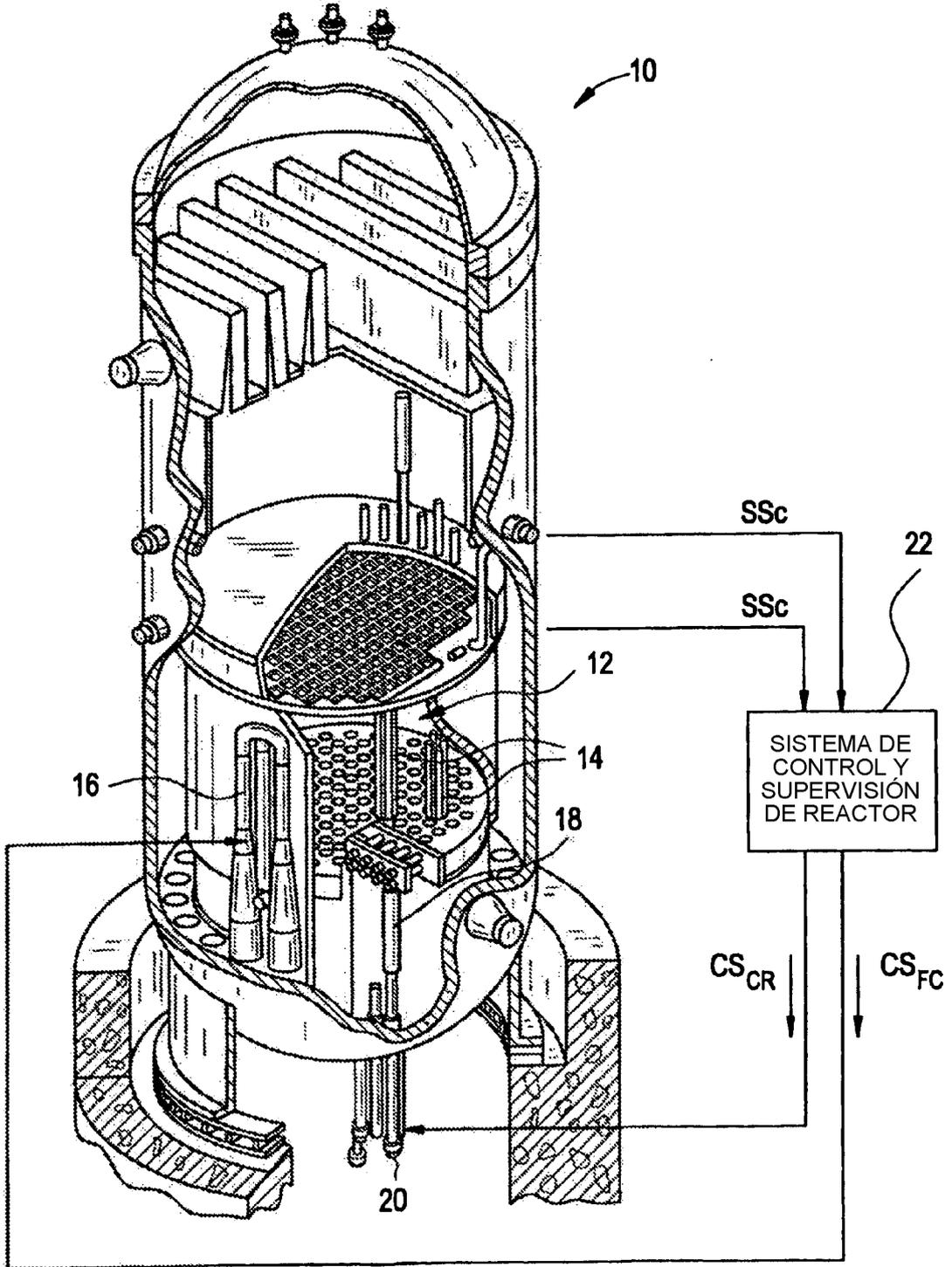


FIG. 2

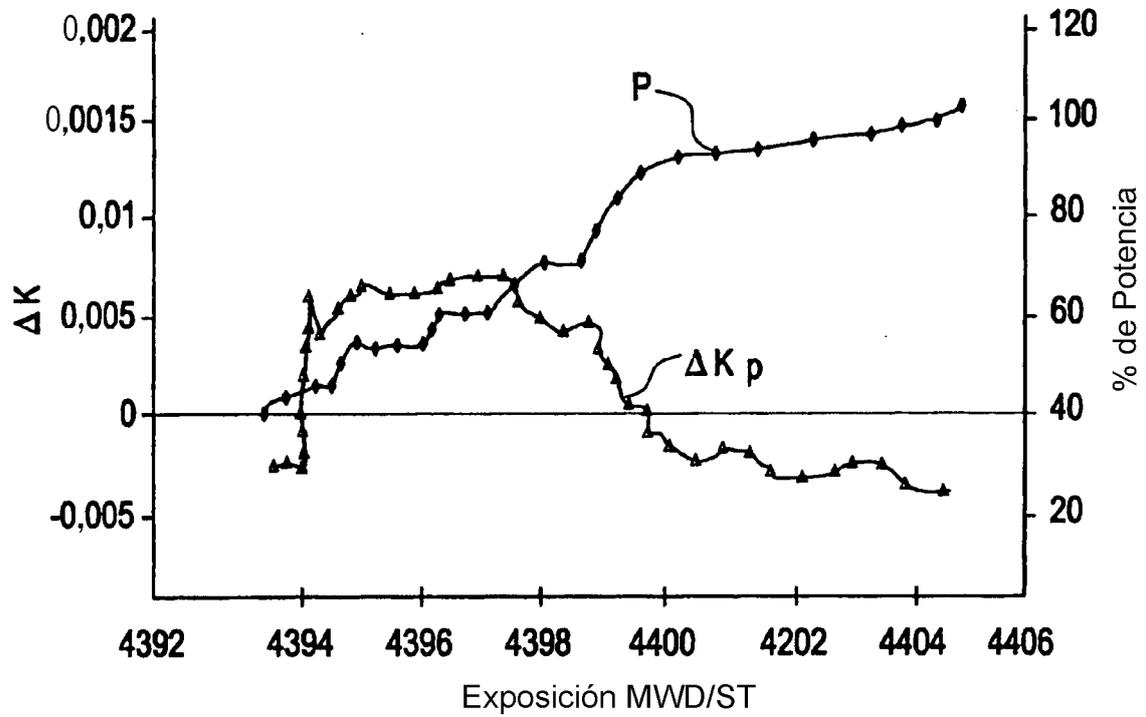


FIG. 6

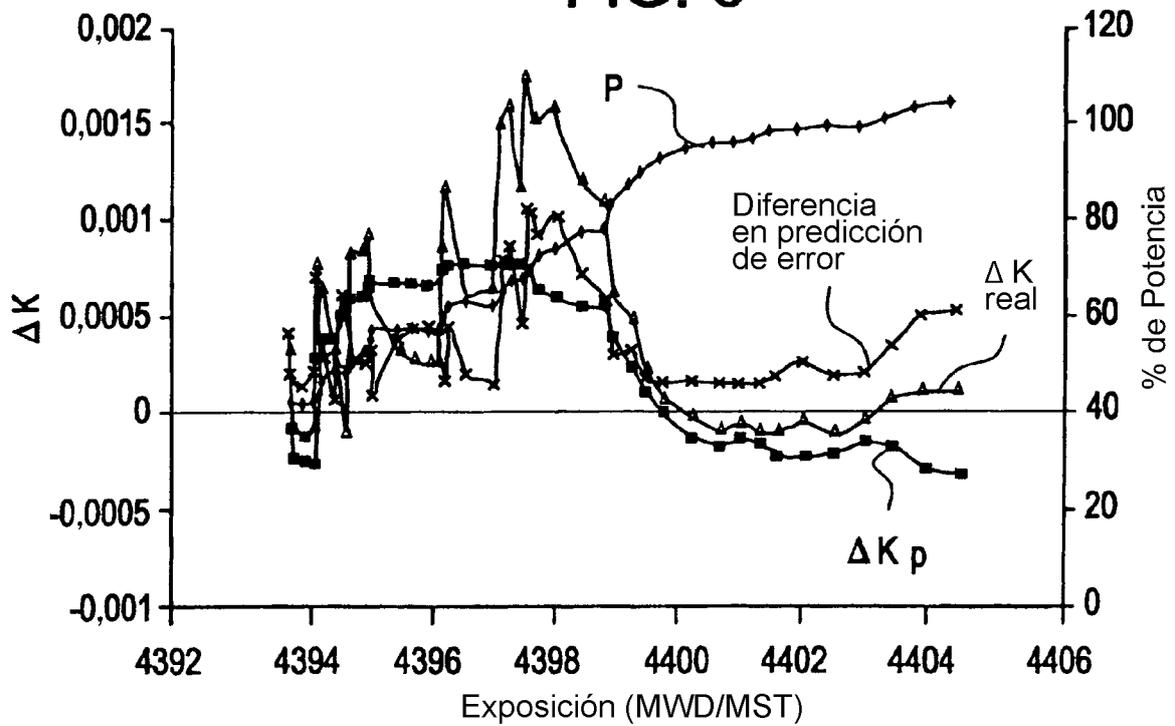
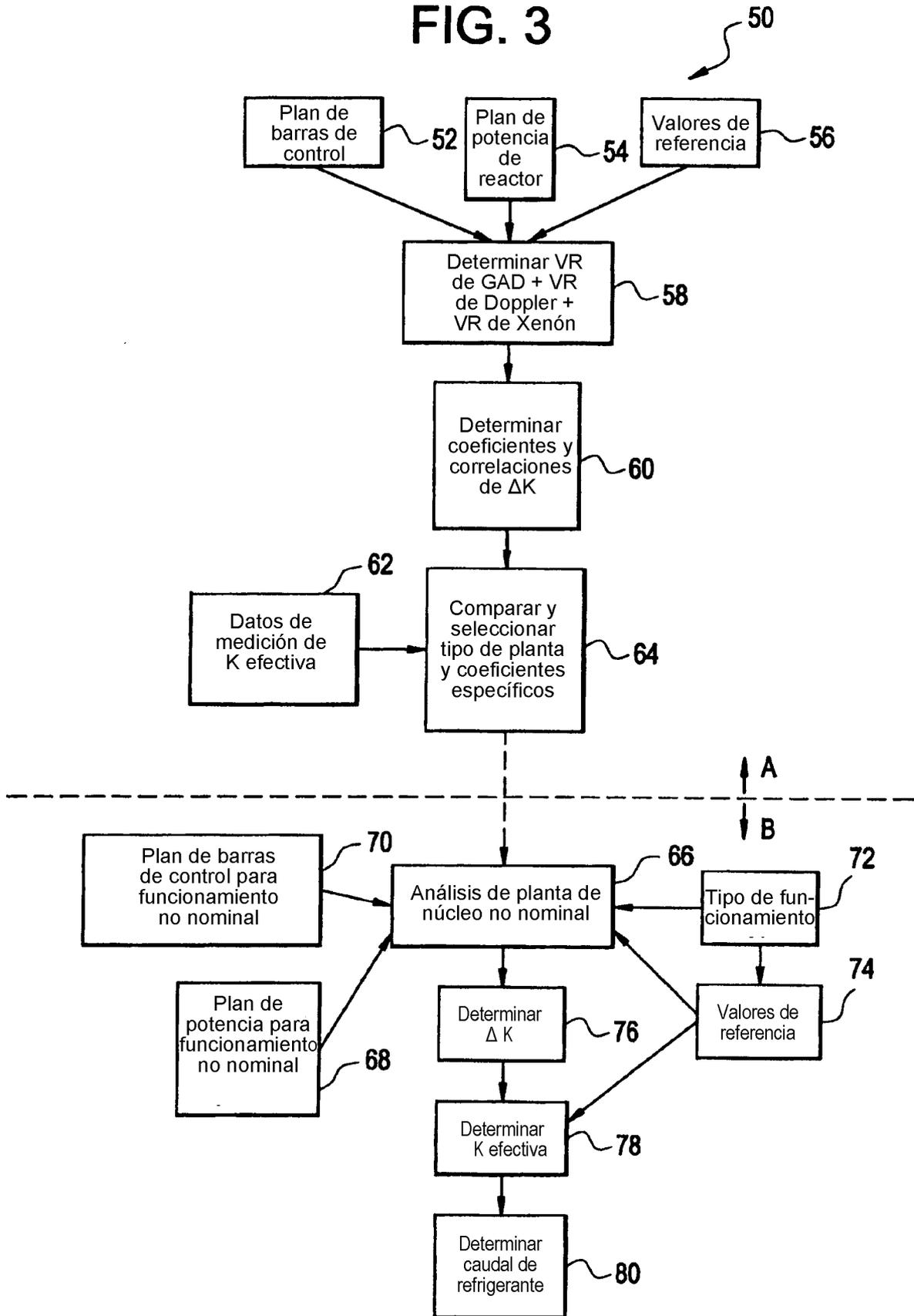


FIG. 3



82

FIG. 4

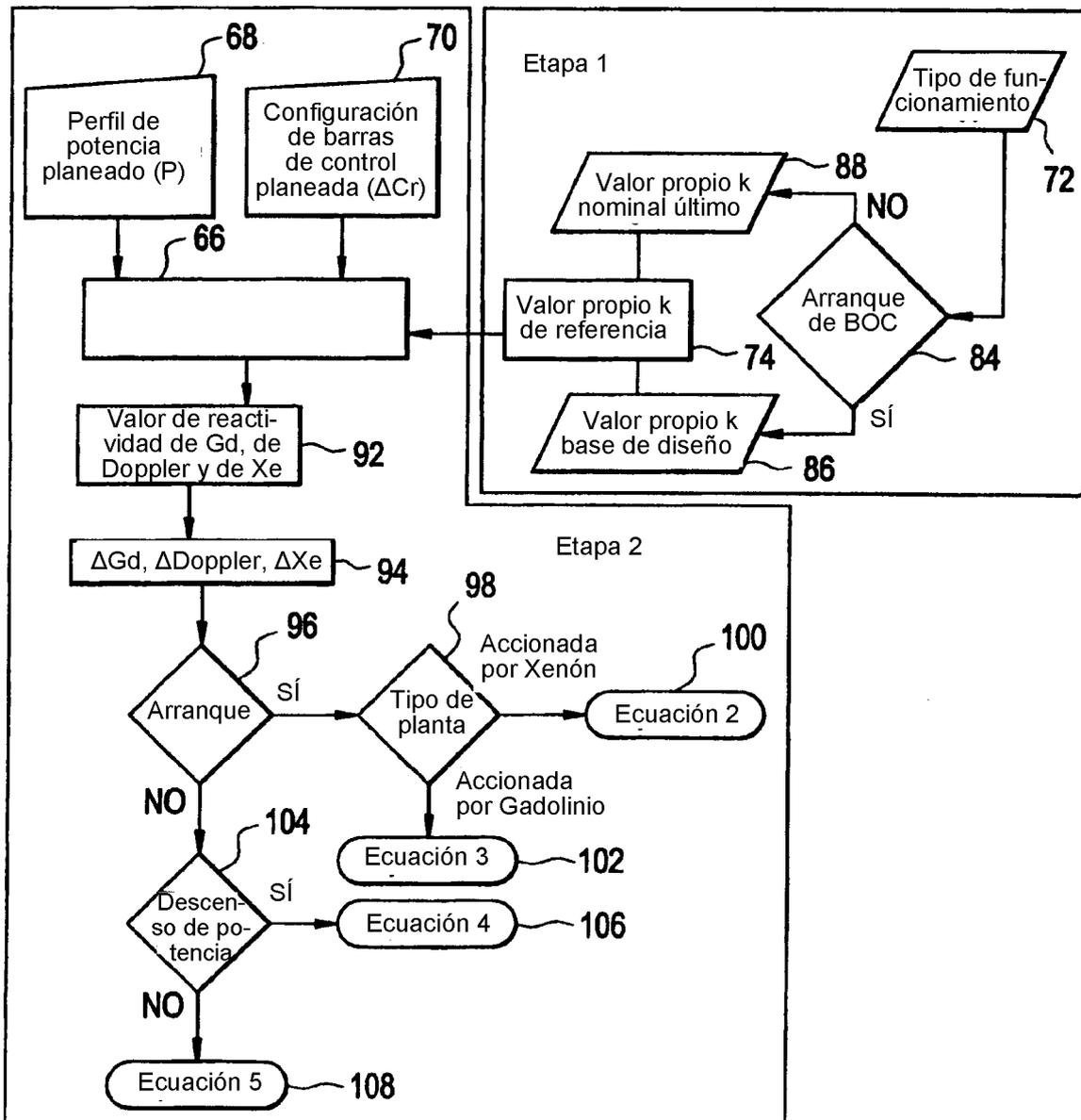


FIG. 5

