



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 379 173**

51 Int. Cl.:
G21C 1/08 (2006.01)
G21C 1/32 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **08871828 .3**
96 Fecha de presentación : **06.11.2008**
97 Número de publicación de la solicitud: **2220654**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **25.08.2010**

54 Título: **Sistema de arranque estable para un reactor nuclear.**

30 Prioridad: **15.11.2007 US 988382 P**
10.06.2008 US 136625

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
23.04.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
23.04.2012

73 Titular/es: **The State of Oregon Acting by and Through The State Board of Higher Education on Behalf of Oregon State University Oregon State University Office of Technology Transfer, Kerr 312 Corvallis, Oregón 97331-2140, US**

72 Inventor/es: **Reyes, Jose, N.; Groome, John, T.; Wu, Qiao; Woods, Brian, G. y Palmer, Todd S.**

74 Agente/Representante:
Torner Lasalle, Elisabet

ES 2 379 173 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).

ES 2 379 173 T3

DESCRIPCIÓN

Sistema de arranque estable para un reactor nuclear.

5 Antecedentes

En los reactores nucleares diseñados con sistemas operativos pasivos, se emplean las leyes de la física para garantizar que se mantiene una operación segura del reactor nuclear durante la operación normal o incluso en una condición de emergencia sin intervención ni supervisión del operador, al menos durante cierto período predefinido de tiempo. Un proyecto de reactor pequeño de aplicaciones múltiples de agua ligera realizado con la asistencia del Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, NEXANT, y del Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Estatal de Oregón se propuso desarrollar un reactor de agua ligera natural seguro y económico. La Figura 1 ilustra un diseño 5 de reactor nuclear resultante de este proyecto.

El diseño 5 de reactor nuclear incluye un núcleo 6 del reactor rodeado por una vasija 2 del reactor. El agua 10 de la vasija 2 del reactor rodea el núcleo 6 del reactor. El núcleo 6 del reactor está además situado en una envoltura 22 que rodea al núcleo 6 del reactor por sus lados. Cuando el núcleo 6 del reactor calienta el agua 10 como consecuencia de eventos de fisión, el agua 10 se dirige desde la envoltura 22 y saliendo de un tubo elevador 24. Esto da como resultado que más agua 10 sea introducida y calentada por el núcleo 6 del reactor, que mete más agua 10 aún en la envoltura 22. El agua 10 que emerge del tubo elevador 24 es enfriada y dirigida hacia el anillo 23 y luego vuelve al fondo de la vasija 2 del reactor mediante circulación natural. Al calentarse el agua 10, se produce vapor 11 a presión en la vasija 2 del reactor.

Un intercambiador 35 de calor hace circular agua de alimentación y vapor en un sistema secundario 30 de refrigeración para generar electricidad con una turbina 32 y un generador 34. El agua de alimentación pasa a través del intercambiador 35 de calor y se convierte en vapor supercalentado. El sistema secundario 30 de refrigeración incluye un condensador 36 y una bomba 38 de agua de alimentación. El vapor y el agua de alimentación en el sistema secundario 30 de refrigeración están aisladas del agua 10 en la vasija 2 del reactor, de modo que nos se les permite mezclarse ni entrar en contacto entre sí.

La vasija 2 del reactor está rodeada por una vasija 4 de contención. La vasija 4 de contención está situada en una piscina 16 de agua. La piscina 16 de agua y la vasija 4 de contención están bajo tierra 9 en un hueco 7 del reactor. La vasija 4 de contención está diseñada de modo que no se permite que agua o vapor de la vasija 2 del reactor escape a la piscina 16 de agua ni al entorno circundante. En una situación de emergencia, se descarga vapor 11 desde la vasija 2 del reactor a través de una válvula 8 de admisión de vapor a una mitad superior 14 de la vasija 4 de contención, y el agua 10 hierve vigorosamente a medida que se libera a través de una válvula sumergida 18 de extracción de fondo que está situada en una piscina 12 de supresión. La piscina 12 de supresión incluye agua subenfriada.

La física nuclear y la termohidráulica de un reactor de energía nuclear de circulación natural están estrechamente relacionadas. El núcleo 6 del reactor genera el calor que crea la fuerza ascensional necesaria para impulsar el flujo en el circuito cerrado. El agua que fluye en la vasija 2 del reactor sirve tanto como refrigerante del núcleo del reactor como de moderador fluido que ralentiza los neutrones producidos por el proceso de fisión en el núcleo 6 del reactor. La temperatura del moderador fluido afecta mucho el proceso de fisión nuclear que genera el calor en el núcleo 6 del reactor. A su vez, la temperatura del moderador fluido es gobernada por la potencia del núcleo del reactor y el caudal de fluido.

La estrecha relación entre la física nuclear y la termohidráulica hace que el arranque de un reactor nuclear de circulación nuclear sea potencialmente inestable cuando se retiran las varillas de control para lograr una criticidad del núcleo hasta el punto de aportar calor al fluido.

La presente invención aborda estos y otros problemas.

Resumen

En el presente documento se da a conocer un sistema de arranque estable que incluye un núcleo de reactor alojado en una vasija del reactor, y un sumidero de calor configurado para eliminar calor de la vasija del reactor. El sistema de arranque estable incluye además un calentador alimentado por electricidad configurado para aportar calor a la vasija del reactor antes de una inicialización del núcleo del reactor.

En el presente documento se da a conocer un módulo de reactor nuclear que incluye una vasija de reactor que contiene refrigerante, un núcleo de reactor sumergido en el refrigerante y un intercambiador de calor configurado para eliminar calor del refrigerante. El módulo de reactor nuclear incluye además uno o más calentadores configurados para aportar calor al refrigerante durante una operación de arranque y antes de que el núcleo del reactor alcance una situación crítica.

En el presente documento se da a conocer un procedimiento de arranque para un reactor nuclear, incluyendo el procedimiento la activación de un sistema de calentamiento para aumentar la temperatura de un refrigerante primario. El procedimiento también incluye la eliminación de calor del refrigerante primario, resultando una diferencia en la

ES 2 379 173 T3

densidad del líquido en la circulación natural del refrigerante primario a través del núcleo del reactor. El procedimiento incluye además la desactivación del sistema de calentamiento y la inicialización del núcleo del reactor para lograr la criticidad.

5 Breve descripción de los dibujos

La Fig. 1 ilustra un sistema de energía nuclear conocido en la técnica.

La Fig. 2 ilustra un conjunto novedoso de módulo de potencia que incluye un sistema de arranque estable.

10

Las Figuras 3A y 3B ilustran una tasa de cambio de las condiciones operativas para una primera fluctuación ejemplar de la potencia.

15

Las Figuras 4A y 4B ilustran una tasa de cambio de las condiciones operativas para una segunda fluctuación ejemplar de la potencia.

20

La Fig. 6 ilustra una realización adicional de un sistema de arranque estable.

La Fig. 7 ilustra otra realización adicional de un sistema de arranque estable.

25

La Fig. 8 ilustra un procedimiento de operación de un sistema de arranque estable.

Descripción detallada

30

Los sistemas de reactores pasivos, incluyendo los que dependen de la circulación natural, tienen un número reducido de dispositivos mecánicos móviles, motores, bombas y conexiones en comparación con los sistemas convencionales que podrían requerir revisión o mantenimiento continuo durante la vida del reactor. Puede ser aceptable cierto nivel de mantenimiento del reactor cuando se cambia el combustible o a mitad de la vida del reactor. Sin embargo, al reducir o eliminar el número de períodos de mantenimiento, puede hacerse que el reactor esté operativo durante más tiempo, aumentando con ello la eficiencia y reduciendo efectivamente el costo de la energía que produce.

35

La Fig. 2 ilustra un conjunto 25 novedoso de un módulo de potencia que incluye un sistema 20 de arranque estable. El sistema 20 de arranque estable puede generar calor para proporcionar un flujo inicial del fluido y establecer condiciones operativas de temperatura y presión para el conjunto 25 del módulo de potencia. En una realización, la temperatura operativa puede ser de aproximadamente 289 grados Celsius. El conjunto 25 del módulo de potencia puede depender de la circulación natural para la refrigeración normal del núcleo 6 de su reactor. La circulación natural del refrigerante dentro del conjunto 25 del módulo de potencia ocurre debido a las diferencias en temperatura del refrigerante 45 cuando, simultáneamente, es calentado por el núcleo 6 del reactor y refrigerado por un sumidero 26 de calor durante su operación. En una realización, el sumidero 26 de calor comprende un intercambiador de calor.

40

45

Los experimentos realizados en la Universidad Estatal de Oregón demostraron que el arranque de un reactor nuclear de circulación natural puede hacer que una gran masa de agua arrastrada por el vapor entre en el núcleo 6 del reactor mientras se encuentra en condiciones críticas. La rápida reducción de temperatura en el moderador fluido o refrigerante 45 puede dar como resultado un rápido aumento en la potencia del núcleo del reactor o en un salto transitorio de potencia cuando las varillas de control son inicialmente retiradas del núcleo 6 del reactor. Si el salto transitorio de potencia es demasiado grande, pueden bajarse las varillas, disminuyendo la cantidad de calor generado por el núcleo 6 del reactor. Una retirada y una inserción cíclicas de las varillas de control aumenta la complejidad y el tiempo requerido para alcanzar las temperaturas operativas y, en último término, lleva a un período más largo de arranque, así como a una supervisión adicional durante la operación del conjunto 25 del módulo de potencia.

50

55

Si se suben las varillas de control de forma controlada, puede hacerse que la temperatura del refrigerante 45 ascienda lentamente, de forma que se minimice el efecto de la masa de refrigerante arrastrada por el vapor. Sin embargo, este proceso puede llevar más de una semana para que el refrigerante 45 del reactor alcance temperaturas operativas. Además, la tasa de extracción puede variar según la edad y la condición del combustible en el núcleo 6 del reactor para dar cuenta de las diferencias en las tasas de fisión o en la química del refrigerante 45.

60

65

Antes del arranque del conjunto 25 del módulo de potencia, el núcleo 6 del reactor puede estar en una condición de parada fría con las varillas de control insertadas. Puede proporcionarse un sistema presurizador 55 para aumentar la presión del sistema promoviendo la ebullición local de fluido en el espacio superior 65 de cabeza del conjunto 25 del módulo del reactor. La presión aumentada del sistema permite que el refrigerante 45 fluya a través del núcleo 6 del reactor para alcanzar la temperatura de operación sin ebullición volumétrica en el circuito hidráulico. El sistema presurizador 55 puede incluir uno o más calentadores y pulverizadores. Los calentadores pueden estar cubiertos con fluido, como agua, para promover la generación de vapor. En una realización, el sistema presurizador 55 no incluye un pulverizador. Las menores presiones operativas del sistema del reactor y los mayores límites de presión de la vasija 2 del reactor pueden permitir que el conjunto 25 del módulo de potencia modere el nivel de presión sin un pulverizador.

ES 2 379 173 T3

El sistema 20 de arranque estable puede ser activado o energizado para aportar calor al refrigerante 45. En una realización, el refrigerante 45 comprende agua. El refrigerante 45 que fluye ascendiendo por el tubo elevador 24 es calentado por el sistema 20 de arranque estable. Los uno o más sumideros 26 de calor están configurados para eliminar calor del refrigerante 45. Situando el sistema 20 de arranque estable a una elevación por debajo del uno o más sumideros 26 de calor, se crea una fuerza ascensional necesaria que impulsa el refrigerante caliente T_H a través de la envoltura 22 y el tubo elevador 24. El refrigerante 45 que fluye a través del uno o más sumideros 26 de calor está relativamente frío en comparación con el refrigerante caliente T_H . El refrigerante frío T_C fluye descendiendo a través del anillo 23 al interior de la cámara 28 de sobrepresión inferior de la vasija 2 del reactor. Esto crea una diferencia de densidad entre el refrigerante caliente T_H en el tubo elevador 24 y el refrigerante frío T_C en el anillo 23, lo que crea además un flujo 40 de fluido a través del núcleo 6 del reactor. Puede usarse la tasa de eliminación de calor por el sumidero 26 de calor en función de la tasa de adición de calor por el sistema 20 de arranque estable para controlar la temperatura del refrigerante en el núcleo 6 del reactor durante el arranque del conjunto 25 del módulo de potencia.

El sistema 20 de arranque estable puede ser configurado para generar un flujo de fluido a través del núcleo 6 del reactor sin retirar las varillas de control, evitando con ello un salto transitorio de potencia durante el arranque del reactor. El sistema 20 de arranque estable simula la operación del núcleo 6 del reactor durante la inicialización o el arranque del núcleo del reactor. Sin embargo, el sistema 20 de arranque estable no introduce en el núcleo 6 del reactor una masa de refrigerante frío arrastrado por el vapor. El sistema 20 de arranque estable puede incluir un conjunto de calentadores, por ejemplo en el sistema presurizador 55, que están aislados del circuito hidráulico principal 40 para proporcionar control de la presión para el arranque del reactor. Dependiendo de la configuración del sistema de arranque, los calentadores también pueden servir para aumentar la temperatura del refrigerante. El sistema 20 de arranque estable también puede incluir conjuntos de calentadores situados en el tubo elevador 24 o en la envoltura 22 y a diversas elevaciones por debajo del sumidero 26 de calor. El sumidero 26 de calor puede estar situado fuera de las regiones del tubo elevador 24 o de la envoltura 22. La diferencia en densidad creada por el sistema 20 de arranque estable y el sumidero 26 de calor, unida a la diferencia en elevación L_{TH} , proporciona una fuerza ascensional necesaria que impulsa un flujo 40 de circulación natural a través del núcleo 6 del reactor.

Evaluación de la fluctuación por inyección de agua fría durante el arranque

El sistema 20 de arranque estable de la Fig. 2 proporciona energía de calentamiento para la iniciación de la circulación natural en el sistema de refrigeración primaria del reactor. El efecto de un cambio instantáneo en la temperatura de la entrada de refrigerante del conjunto 6 del módulo de potencia puede modelarse en varios intervalos de potencia de arranque. Analizando el intervalo entre una potencia del 1% y el 20%, en las tablas que siguen se enumeran los datos para múltiples simulaciones.

TABLA 1

Condiciones iniciales para las fluctuaciones por inserción de agua fría

% Potencia	Densidad de potencia (MW/m ³)	T _f (C)	T _m (C)	T _{m0} (C)
1	1,89	30,5	17,92	16,91
2	3,78	45,6	20,41	18,39
4	7,56	75,9	25,47	21,44
6	11,34	106,0	30,67	24,62
8	15,12	137,0	36,05	27,99
10	18,89	168,0	41,60	31,53
12	22,67	199,0	47,37	35,28
14	26,45	230,0	53,35	39,24
16	30,23	261,0	59,59	43,47
18	34,01	293,0	66,12	47,98
20	37,79	325,0	72,96	52,81

La ecuación de conservación de la energía y la ecuación de momento integrado pueden ser usadas para determinar los caudales y las tasas de calentamiento que pueden lograrse. Las condiciones iniciales pueden seleccionarse de tal modo que el núcleo 6 del reactor esté en un estado estacionario o en una condición operativa crítica. En las simulaciones descritas en el presente documento se usó un tratamiento de neutrones retardados en seis grupos, suponiendo datos únicamente para el isótopo fisible ²³⁵U. Los valores de los coeficientes de reactividad pueden ser escogidos para que sean representativos del combustible del reactor de agua ligera estándar.

ES 2 379 173 T3

Estimación de los caudales de arranque

Pueden ocurrir cambios en el caudal de circulación natural en una escala temporal lenta. Por lo tanto, la solución de estado estacionario de la ecuación de momento integrada en el eje del bucle es adecuada para este análisis. Básicamente, proporciona un equilibrio entre la fuerza de rozamiento y la fuerza ascendente debido a variaciones de la densidad en el circuito cerrado de calentamiento/refrigeración. La velocidad resultante del fluido en el núcleo del reactor puede expresarse como:

$$u_{co} = \left(\frac{\beta q_{in} L_{th} g}{\rho a_c C_p R_f} \right)^{1/3}$$

siendo:

- u_{co} velocidad del refrigerante en el núcleo 6 del reactor.
- β coeficiente de expansión térmica del refrigerante 45.
- q_{in} tasa de calentamiento.
- L_{th} distancia central entre el calentador y el refrigerador.
- g constante gravitatoria.
- ρ densidad del líquido.
- a_c área del flujo del líquido en el núcleo del reactor.
- C_p capacidad calórica del fluido.
- R_f resistencia del bucle adimensional.

La Tabla 2 demuestra resultados numéricos ejemplares para el caudal de masas y la velocidad del refrigerante como funciones de la potencia de calentamiento. Puede determinarse que el 19% del caudal nominal del núcleo puede establecerse usando un sistema de arranque estable que incluye calentadores de 1 MW.

(Tabla pasa a página siguiente)

ES 2 379 173 T3

TABLA 2

Potencia de calentamiento en función del caudal y la velocidad del refrigerante

q_{in} (MW)	u_{co} (m/s)	Caudal de masas (kg/s)
5	0,166247379	136,46
4,8	0,164000518	134,61
4,6	0,161690343	132,72
4,4	0,159312199	130,76
4,2	0,156860852	128,75
4	0,154330396	126,67
3,8	0,151714121	124,53
3,6	0,149004359	122,30
3,4	0,146192282	119,99
3,2	0,143267648	117,59
3	0,14021847	115,09
2,8	0,137030576	112,47
2,6	0,133687024	109,73
2,4	0,130167297	106,84
2,2	0,126446176	103,79
2	0,122492116	100,54
1,8	0,118264838	97,07
1,6	0,113711608	93,33
1,4	0,10876124	89,27
1,2	0,103313852	84,80
1	0,097222557	79,80
0,8	0,090252963	74,08
0,6	0,082000259	67,31
0,4	0,071633824	58,80
0,2	0,056855804	46,67
0	0	0,00

Las Figuras 3A y 3B ilustran una tasa de cambio de las condiciones operativas para una primera fluctuación ejemplar de potencia del 1%. Las Figuras 4A y 4B ilustran una tasa de cambio de las condiciones operativas para una segunda fluctuación ejemplar de potencia del 10%. Las Figuras 5A y 5B ilustran una tasa de cambio de las condiciones operativas para una tercera fluctuación ejemplar de potencia del 20%. Para las diferentes fluctuaciones ejemplares de potencia de las Figuras 3-5 se muestran curvas para la densidad P de potencia y la reactividad R del reactor en las Figuras 3A, 4A y 5A y curvas para la temperatura T_M del moderador, la temperatura T_I de la entrada y la temperatura T_F del combustible en las Figuras 3B, 4B y 5B.

La Tabla 3 ilustra una fluctuación de calentamiento del sistema de arranque estable durante un período de tiempo de 24 horas. El sistema 20 de arranque estable puede reducir el tiempo de arranque del reactor desde períodos más convencionales de una semana en los que las varillas de control son extraídas de forma controlable del núcleo del reactor hasta un día o menos.

ES 2 379 173 T3

TABLA 3

Fluctuación del calentamiento del sistema de arranque

	t (horas)	T - Grados C
5	0	20,0
	1	31,0
10	2	41,9
	3	52,9
	4	63,9
	5	74,9
15	6	85,8
	7	96,8
	8	107,8
	9	118,7
20	10	129,7
	11	140,7
	12	151,7
	13	162,6
25	14	173,6
	15	184,6
	16	195,6
	17	206,5
30	18	217,5
	19	228,5
	20	239,4
	21	250,4
35	22	261,4
	23	272,4
	24	283,3
40		

Las simulaciones ejemplares ilustradas en las Figuras 3-5 muestran claramente que una masa de agua fría arrastrada por el vapor introducida en el núcleo 6 del reactor provoca un aumento de la reactividad (debido a un coeficiente negativo de la temperatura del moderador), lo cual inicia entonces un salto transitorio amortiguado de potencia. Para potencias iniciales reducidas no se observan oscilaciones significativas y el núcleo 6 del reactor experimenta un aumento de potencia suave y relativamente pequeño (factor de ~ 2). Para potencias iniciales mayores y masas de agua arrastrada por el vapor relativamente más frías, los cambios en la densidad P de potencia y la reactividad R son relativamente grandes, y la fluctuación ocurre en una escala temporal mucho más corta. En el caso de una potencia del 5%, la inserción de agua fría hace que la densidad P de potencia aumente en un factor de ~ 14 y la reactividad R alcanza el 85% de supercriticalidad instantánea. En este caso, la temperatura T_F del combustible también aumenta casi en un factor de 2 en aproximadamente 5 segundos. Calentar gradualmente el refrigerante 45 antes de sacar las varillas de control minimizará el efecto de este tipo de fluctuación.

La Fig. 6 ilustra una realización adicional de un sistema 60 de arranque estable. La operación del sistema es similar a la realización descrita con respecto a la Fig. 2, pero el sistema 60 de arranque estable está situado debajo del núcleo 6 del reactor. Situar el sistema 60 de arranque estable por debajo del núcleo 6 del reactor evita que entre refrigerante frío T_C en el núcleo 6 del reactor, lo que, en caso contrario, podría dar como resultado una inserción de la reactividad. Además, situando el sistema 60 de arranque estable por debajo del núcleo 6 del reactor, puede haber disponible más espacio para la operación de las varillas de control que ocupan una porción del tubo elevador 24. El resultado es una circulación más intensa debido a la diferencia maximizada en elevación L_{TH} entre el sistema 60 de arranque estable y el sumidero 26 de calor.

El sistema 60 de arranque estable puede incluir uno o más calentadores situados por debajo del núcleo 6 del reactor. Los calentadores pueden ser calentadores eléctricos. Antes del arranque del conjunto 25 del módulo de potencia, el núcleo 6 del reactor puede estar en una condición de parada fría con las varillas de control insertadas. Los uno o más sumideros 26 de calor están configurados para eliminar calor del refrigerante 45. El sistema presurizador 55 puede estar configurado para aumentar una presión del sistema en la vasija 2 del reactor mediante la ebullición local de fluido (por ejemplo, agua) en el espacio superior 65 de cabeza de la vasija 2 del reactor. La presión aumentada permite

ES 2 379 173 T3

que el refrigerante 45 en la vasija 2 del reactor alcance la temperatura de operación sin la ebullición volumétrica en el circuito hidráulico 40.

5 El sistema 60 de arranque estable puede ser iniciado para crear una diferencia de densidad entre el refrigerante en el tubo elevador 24 y el refrigerante en el anillo 23. Situando los calentadores del sistema 60 de arranque estable a una elevación por debajo del sumidero 26 de calor, puede crearse una fuerza ascendente que impulsa a un refrigerante caliente T_H hacia arriba a través de la envoltura 22 y el tubo elevador 24 y a un refrigerante frío T_C hacia abajo a través del anillo 23 al interior de la cámara 28 de sobrepresión inferior. Esto crea un flujo de circulación natural a través del núcleo 6 del reactor. Puede usarse la tasa de eliminación de calor por medio del sumidero 26 de calor en función de la tasa de adición de calor por el sistema 60 de arranque estable para controlar la temperatura del refrigerante en el núcleo 6 del reactor. El diferencial entre la aportación de calor y la eliminación de calor aumenta la temperatura del fluido hasta las condiciones operativas.

15 La Fig. 7 ilustra otra realización adicional del sistema 70 de arranque estable en la que se emplea una bomba 75 de circulación. El circuito cerrado 85 de circulación puede incluir el Sistema de Control Químico y Volumétrico (CVCS) del sistema presurizador 55. La bomba 75 de circulación y un conducto 90 de extracción extraen parcialmente fluido caliente del sistema presurizador 55 situado en el espacio superior 65 de cabeza de la vasija 2 del reactor. El sistema 70 de arranque estable puede también incluir las válvulas V1, V2, V3 y una o más toberas 80 para controlar el flujo de refrigerante en el circuito cerrado 85 de circulación y distribuir el refrigerante caliente T_H al anillo 23.

20 Las toberas 80 pueden ser, por ejemplo, toberas de inyección o de inducción. El calentamiento del sistema de refrigerante primario puede efectuarse por medio de calentadores 100 en el sistema presurizador 55. En una realización, la bomba 75 de circulación y el circuito cerrado 85 de circulación están situados de forma externa a la vasija 2 del reactor. En otra realización, la bomba 75 de circulación o el circuito cerrado 85 de circulación, o ambos, están situados dentro de la vasija 2 del reactor. La bomba 75 de circulación puede aumentar la tasa de flujo de refrigerante dentro de la vasija 2 del reactor para que sea mayor que la proporcionada por la circulación natural por sí sola. En una realización, se sitúa un sistema presurizador en la cámara 28 de sobrepresión inferior de la vasija 2 del reactor, y se lleva vapor al espacio superior 65 de cabeza.

30 Antes del arranque del conjunto 25 del módulo de potencia, el núcleo 6 del reactor puede estar en una condición de parada fría con sus varillas de control insertadas. Los uno o más sumideros 26 de calor pueden estar configurados para extraer calor del refrigerante 45. El sistema presurizador 55 puede estar configurado para aumentar la presión del sistema en la vasija 2 del reactor mediante la ebullición local de fluido (por ejemplo, agua) en el espacio superior 65 de cabeza de la vasija 2 del reactor. La presión aumentada permite que el refrigerante 45 en la vasija 2 del reactor alcance la temperatura de operación sin la ebullición volumétrica en el circuito hidráulico 40. La bomba 75 de circulación inicia una circulación interna dentro de la vasija 2 del reactor bombeando refrigerante 45 extrayéndola del sistema presurizador 55 o del tubo elevador 24, o de ambos, por medio de conductos 90, 95 de extracción, y luego vuelve a inyectar el refrigerante 45 en el anillo 23 a través de una o más toberas 80. Las una o más toberas 80 pueden estar configuradas para expulsar el refrigerante caliente T_H a una elevación por debajo del sumidero 26 de calor. En una realización, el circuito cerrado 75 de circulación utiliza conductos o tubos existentes de distribución del CVCS. En una realización, la bomba 75 de circulación es una bomba del CVCS.

45 El fluido caliente del sistema presurizador 55 confluye en el circuito cerrado 70 de circulación, calentando el refrigerante 45 en el sistema refrigerante principal hasta la temperatura nominal u operativa. La tasa de eliminación de calor por medio del sumidero 26 de calor en función de la tasa de adición de calor por medio del sistema 20 de arranque estable puede usarse para controlar la temperatura del refrigerante en el núcleo 6 del reactor. Cuando el refrigerante 45 en el conjunto 20 del módulo del reactor alcanza la presión y la temperatura operativas, empiezan a retirarse varillas de control del módulo 6 del reactor. La creciente tasa de eliminación de calor del sumidero 26 de calor equilibra la tasa de producción de energía, lo que lleva a la condición de máxima potencia cuando puede terminar a ritmo constante el flujo de refrigerante 45 a través del circuito cerrado 85 de circulación.

55 La Fig. 10 ilustra un procedimiento de operación de un sistema de arranque estable, tal como los sistemas 20, 60, 70 de arranque estable descritos con respecto a las Figuras 2, 6 y 7. En la operación 110, se activa el sistema de calentamiento para aumentar la temperatura de un refrigerante primario, tal como el refrigerante 45 de la Fig. 2. En una realización, el refrigerante primario es calentado por un sistema de calentamiento que comprende uno o más calentadores eléctricos. El sistema de calentamiento puede estar situado por debajo del núcleo 6 del reactor. En otra realización, el sistema de calentamiento está situado por encima del núcleo del reactor.

60 En la operación 120, se elimina calor del refrigerante primario, en el que una diferencia en la densidad del líquido da como resultado la circulación natural del refrigerante primario a través del núcleo del reactor. En una realización, el calor es eliminado del refrigerante primario por medio de un intercambiador de calor.

65 En la operación 130, se monitoriza la temperatura del refrigerante primario, El sistema de calentamiento se desactiva después de que el refrigerante ha alcanzado una temperatura operativa. En una realización, la temperatura operativa identifica una temperatura de refrigerante asociada con una condición de estado estacionario de baja potencia del núcleo del reactor.

ES 2 379 173 T3

En la operación 140, se desactiva el sistema de calentamiento. Cuando el sistema de calentamiento incluye calentadores eléctricos, el sistema de calentamiento puede ser desactivado suprimiendo el flujo de corriente a los calentadores.

5 En la operación 150, se inicializa el núcleo del reactor para alcanzar criticidad. El núcleo del reactor puede ser inicializado o activado extrayendo varillas de control para aumentar la tasa de los eventos de fisión. En una realización, el núcleo del reactor es inicializado después de que se desactive el calentador. En otra realización, el núcleo del reactor es inicializado antes de que se desactive el calentador.

10 En la operación 160, se reactiva el sistema de calentamiento para controlar una presión operativa del reactor nuclear una vez que el núcleo del reactor haya alcanzado criticidad. El sistema de calentamiento puede ser reactivado después de que el reactor lleve operando en un estado estacionario durante un período de tiempo. El sistema de calentamiento puede ser reactivado para aumentar la presión dentro de la vasija del reactor.

15 El conjunto 25 del módulo de potencia de las Figuras 2, 6 y 7 puede ser configurado para operar en una vasija de contención y en una piscina sumergida de agua, tal como la ilustrada en la Fig. 1; sin embargo, los principios descritos en el presente documento se aplican también a otros diseños de reactor.

20 Aunque las realizaciones proporcionadas en el presente documento han descrito fundamentalmente un reactor de agua ligera presurizada, debiera ser evidente para un experto en la técnica que las realizaciones pueden ser aplicadas a otros tipos de sistemas de energía nuclear tal como se describen o con alguna modificación obvia. Por ejemplo, también puede hacerse que las realizaciones o variaciones de las mismas también sean operables con un reactor de agua en ebullición o con un reactor de agua pesada. Un reactor de agua en ebullición puede requerir vasijas mayores para producir la misma salida de energía.

25 La cantidad de calor generado por el sistema de arranque estable, la tasa de cambio en la temperatura del refrigerante y la tasa de cambio en la densidad de potencia, así como otras tasas y otros valores descritos en el presente documento, son presentados únicamente a título de ejemplo. Pueden determinarse otras tasas y otros valores mediante la experimentación, como la construcción de modelos de tamaño natural o a escala del reactor nuclear.

30 Habiendo descrito e ilustrado los principios de la invención en una realización preferente de la misma, debería ser evidente que la invención puede ser modificada en disposición y detalle sin apartarse de tales principios.

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Un sistema (20) de arranque estable para un reactor nuclear (5) que comprende:

5 una vasija presurizada (2) del reactor;

un núcleo (6) de reactor alojado en la vasija (2) del reactor, estando sumergido el núcleo (6) del reactor en un refrigerante primario del reactor nuclear y estando situado el núcleo (6) del reactor debajo de un tubo elevador (24);

10 un sumidero (26) de calor configurado para eliminar calor del refrigerante primario después de que este haya pasado a través del tubo elevador (24) de la vasija del reactor; y

15 un calentador configurado para aportar calor al refrigerante primario contenido dentro de la vasija del reactor antes de una inicialización del núcleo del reactor para lograr la criticidad del reactor, estando configurado el calentador para aportar el calor dentro del tubo elevador a una elevación por debajo de la del sumidero de calor para provocar una diferencia de densidad en el refrigerante primario que impulsa al refrigerante primario a través del núcleo del reactor mediante circulación natural.

20 2. El sistema según la reivindicación 1 en el que el sumidero (26) de calor comprende un intercambiador de calor de un sistema secundario de refrigeración.

25 3. El sistema según la reivindicación 1 en el que el sumidero de calor está situado dentro de la vasija del reactor a una elevación por encima del núcleo del reactor.

4. El sistema según la reivindicación 1 en el que la elevación del calentador está por encima del núcleo del reactor.

5. El sistema según la reivindicación 1 en el que la elevación del calentador está por debajo del núcleo del reactor.

30 6. El sistema según la reivindicación 1 en el que el calentador (20) está situado al menos parcialmente dentro de una envoltura que rodea el núcleo (6) del reactor.

35 7. El sistema según la reivindicación 1 en el que el calentador está configurado, además, para controlar la presión dentro de la vasija del reactor tras la inicialización del núcleo del reactor.

8. Un procedimiento de arranque para un reactor nuclear que comprende:

40 la activación de un sistema de calentamiento para aumentar la temperatura de un refrigerante primario del reactor nuclear antes de una inicialización del núcleo del reactor situado dentro de una vasija presurizada del reactor, estando configurado el sistema de calentamiento para aportar calor al refrigerante primario situado dentro de un tubo elevador situado por encima del núcleo del reactor;

45 la eliminación de calor del refrigerante primario con un intercambiador de calor situado dentro de la vasija del reactor a una elevación que está por encima del punto en el que se aporta calor al refrigerante primario en el tubo elevador, en el que una diferencia en la densidad del líquido del refrigerante primario en el tubo elevador y en el intercambiador de calor da como resultado la circulación natural del refrigerante primario a través del núcleo del reactor;

50 la desactivación del sistema de calentamiento; y

la inicialización del núcleo del reactor para lograr la criticidad.

55 9. El procedimiento según la reivindicación 8

en el que el sistema de calentamiento comprende uno o más calentadores o

en el que el sistema de calentamiento comprende uno o más calentadores eléctricos.

60 10. El procedimiento según la reivindicación 9 en el que los uno o más calentadores están situados dentro de la vasija del reactor a una elevación que está por debajo del núcleo del reactor.

65 11. El procedimiento según la reivindicación 8 que, además, comprende la reactivación del sistema de calentamiento para controlar una presión operativa del reactor nuclear una vez que el núcleo del reactor haya alcanzado la criticidad.

ES 2 379 173 T3

12. El procedimiento según la reivindicación 8 que, además, comprende la monitorización de la temperatura del refrigerante primario, en el que el sistema de calentamiento se desactiva una vez que el refrigerante primario haya alcanzado una temperatura operativa asociada con una condición de estado estacionario de baja potencia del núcleo del reactor.

5

13. El procedimiento según la reivindicación 9

en el que los uno o más calentadores calientan el refrigerante primario a una temperatura operativa que proporciona circulación natural del refrigerante primario desde el intercambiador de calor a los uno o más calentadores y a través del núcleo del reactor y/o

10

en el que los uno o más calentadores están configurados, además, para controlar una presión en la vasija del reactor una vez que el núcleo del reactor ha alcanzado una situación crítica.

15

14. El procedimiento según la reivindicación 13

en el que se permite que el núcleo del reactor alcance una situación crítica una vez que el refrigerante primario alcanza la temperatura operativa y/o

20

en el que los uno o más calentadores están situados dentro de una envoltura que rodea al menos parcialmente el núcleo del reactor.

25

15. El procedimiento según la reivindicación 9

en el que los uno o más calentadores están situados dentro de la vasija del reactor a una elevación que está por encima del núcleo del reactor y/o

30

en el que el núcleo del reactor es inicializado para alcanzar criticidad una vez que el sistema de calentamiento está desactivado.

35

40

45

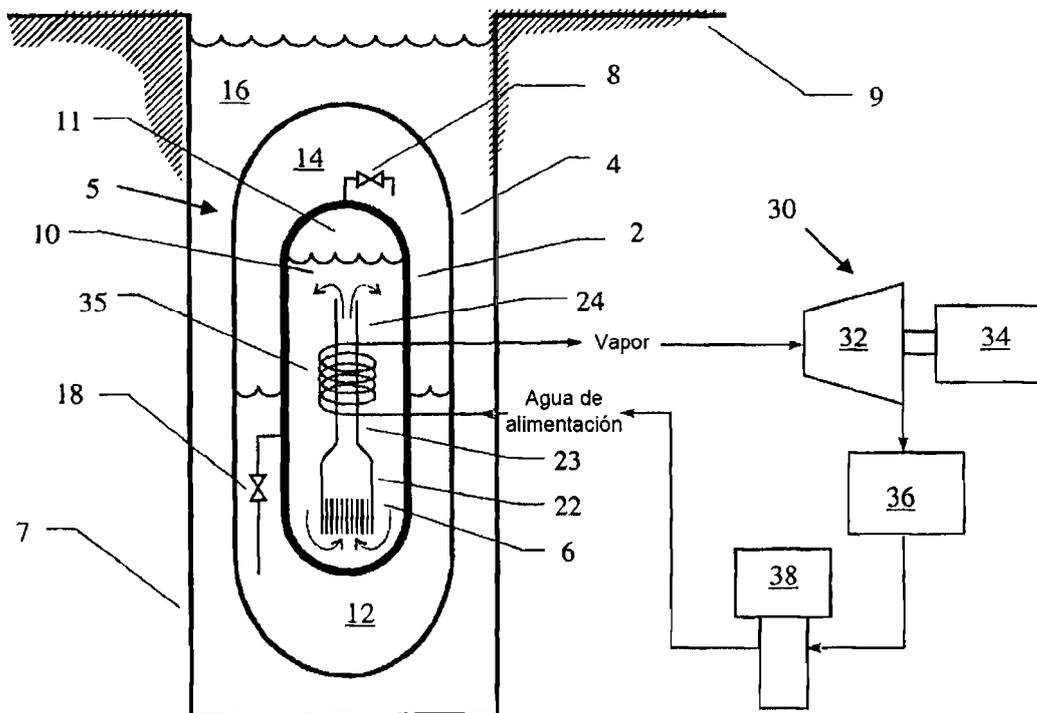
50

55

60

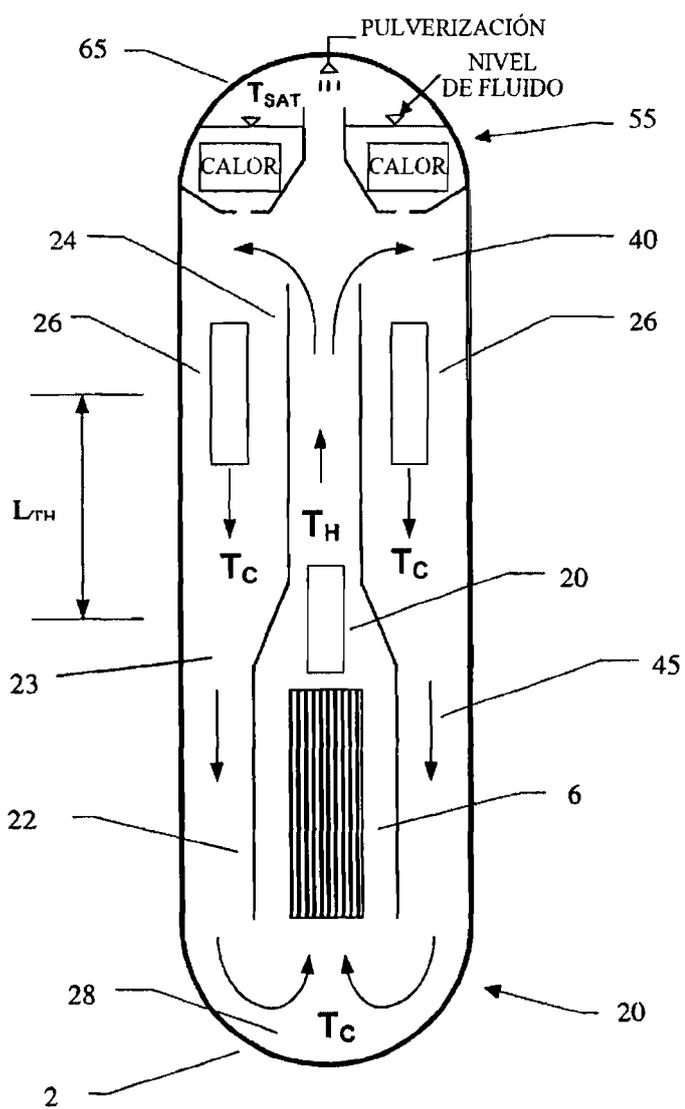
65

FIG. 1



TÉCNICA ANTERIOR

FIG. 2



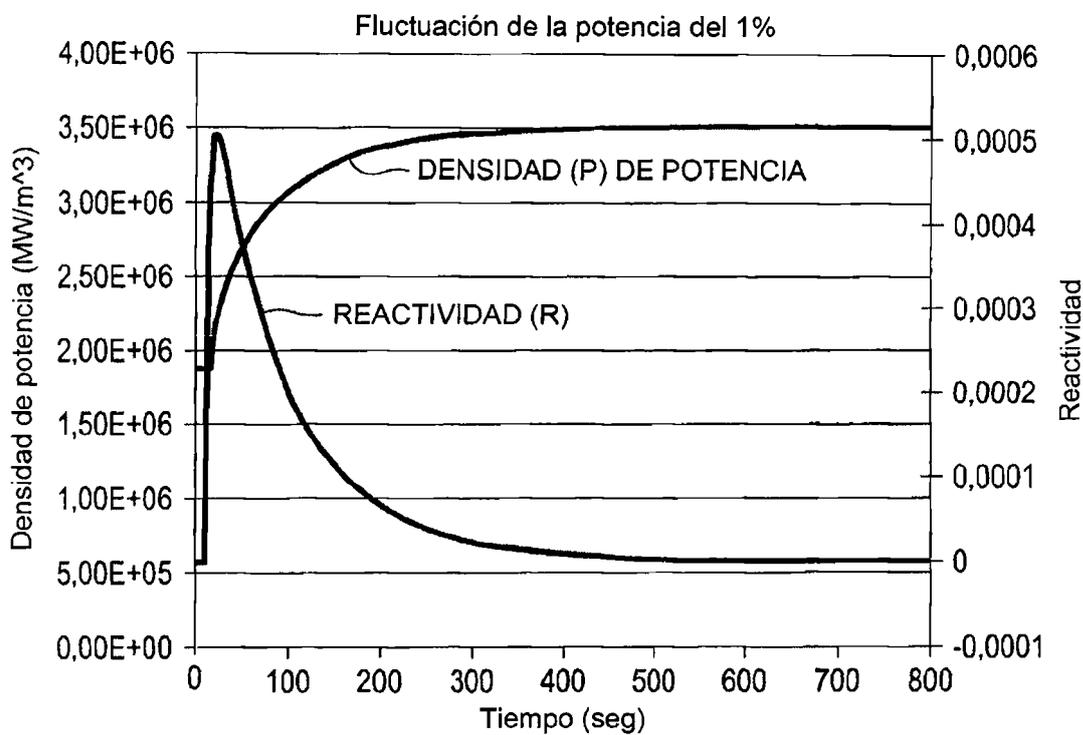


FIG.3A

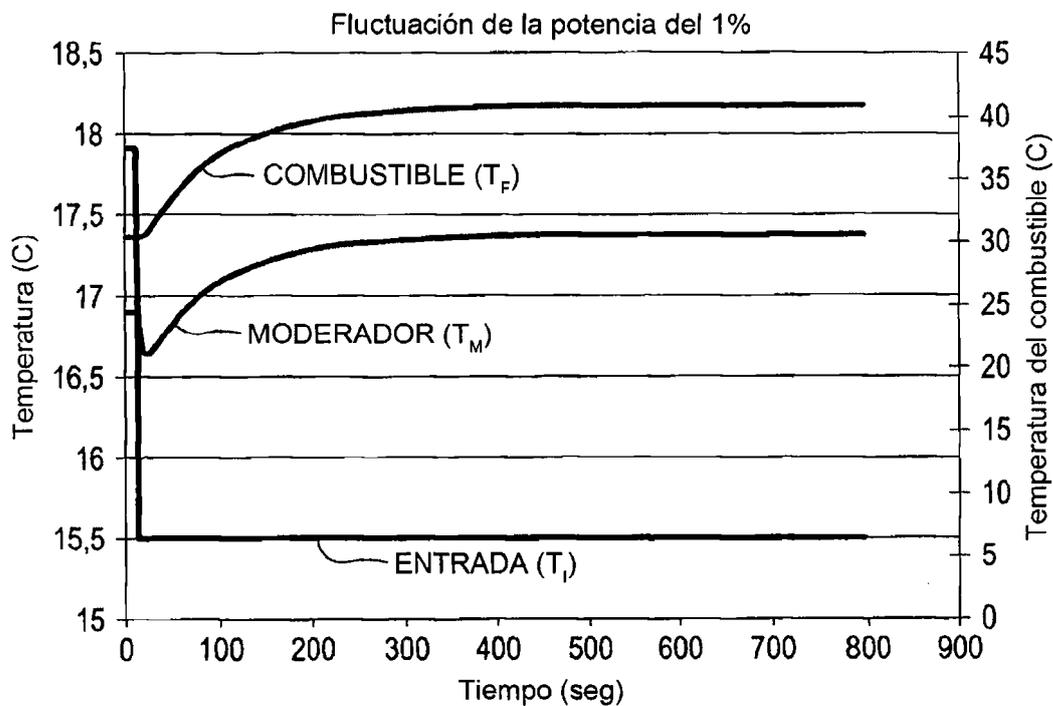


FIG.3B

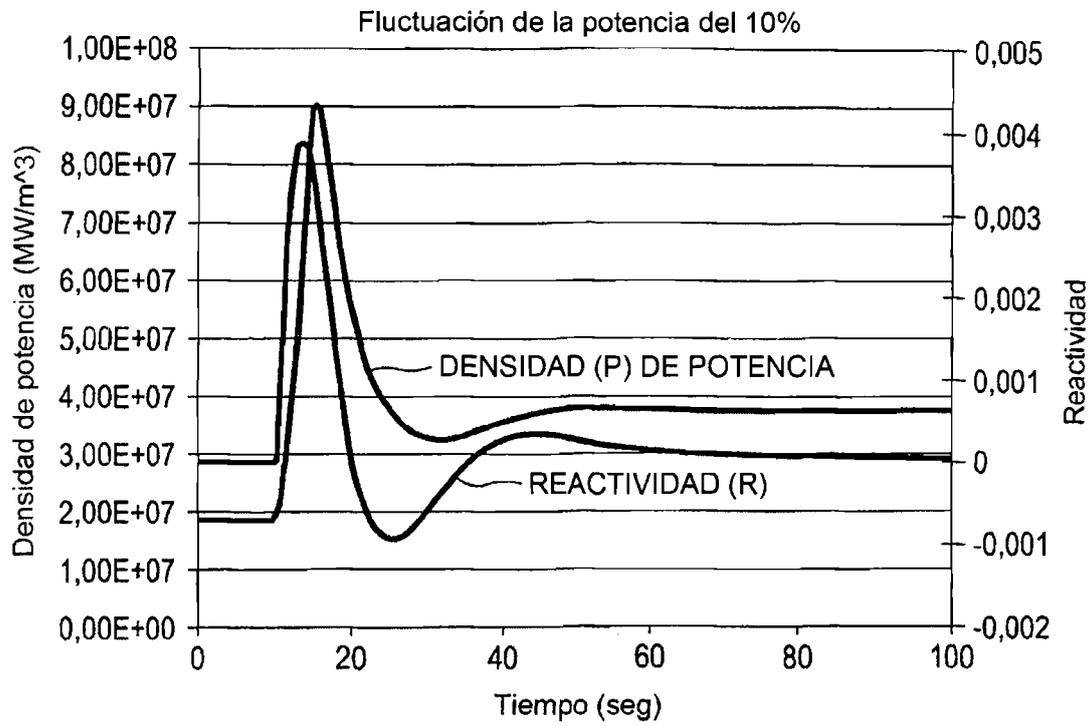


FIG.4A

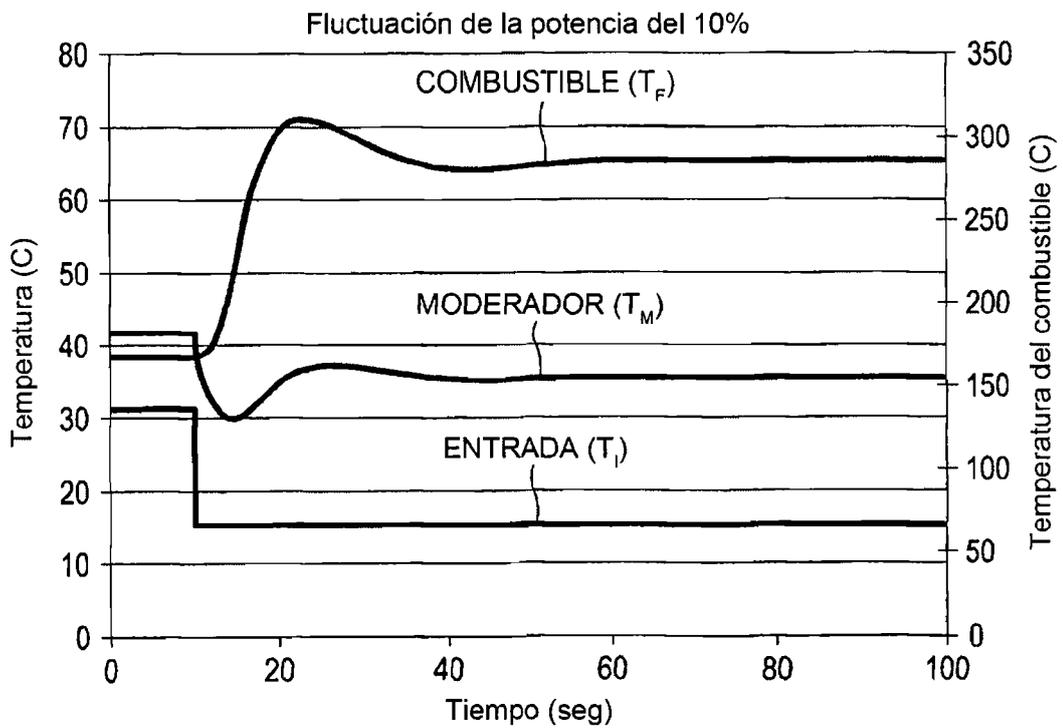


FIG.4B

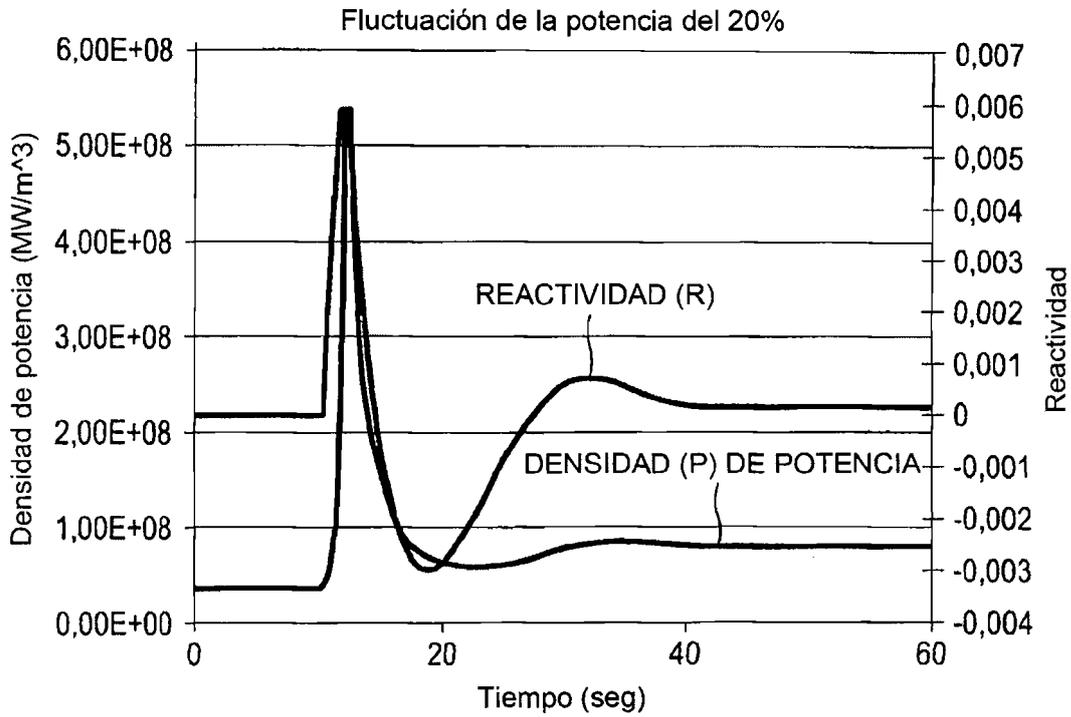


FIG.5A

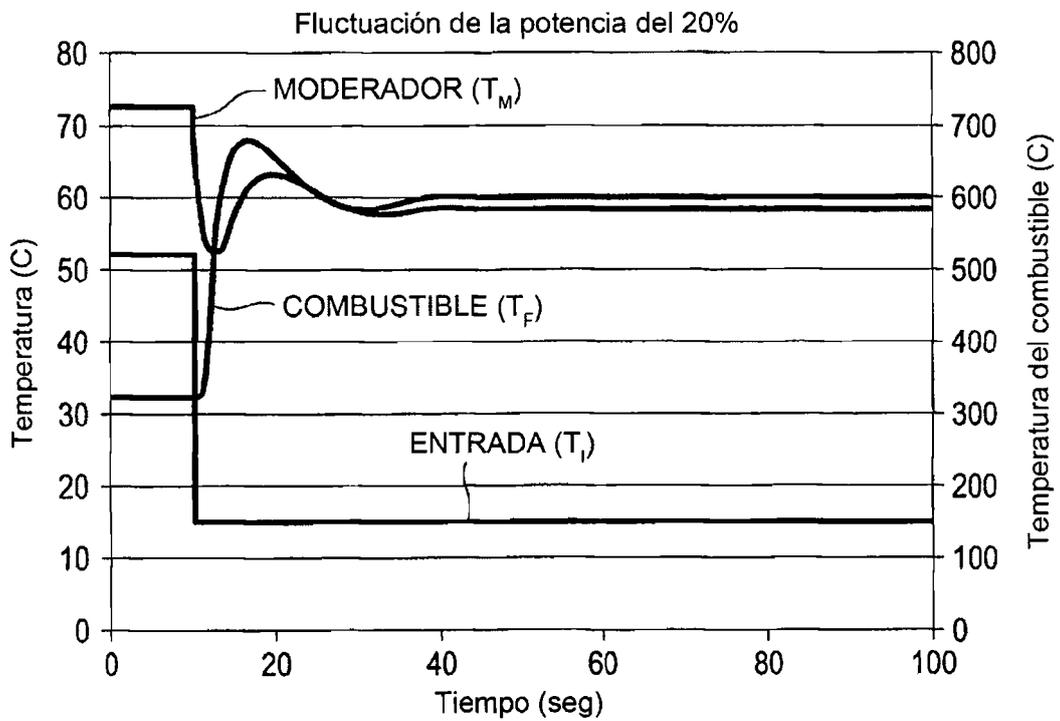


FIG.5B

FIG. 6

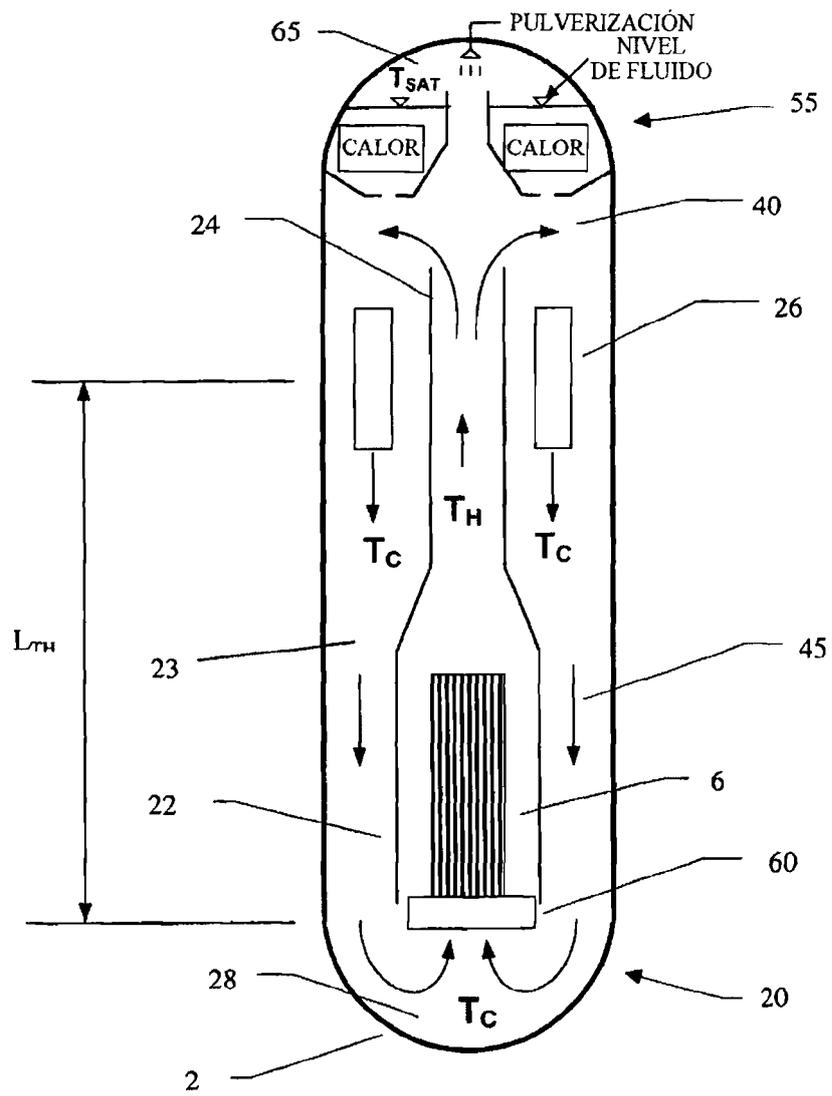


FIG. 7

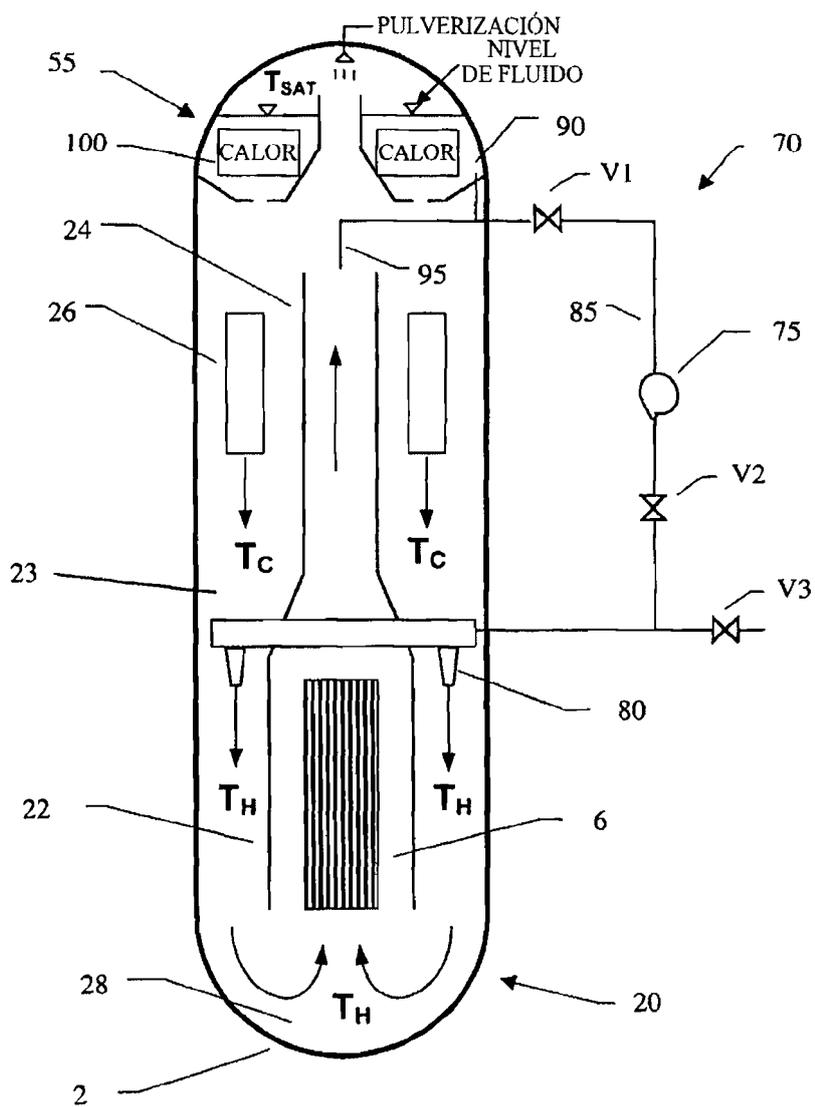


FIG. 8

