



19	ES	11	460129	10	A1
		21			
		22	FECHA DE PRESENTACION		
			18-1-78		

- 5 ENE. 1979

Concedido el Registro de acuerdo con los datos que figuran en la presente descripción y según el contenido de la Memoria adjunta.

PATENTE DE INVENCION

30	PRIORIDADES:	32	FECHA	33	PAIS
31	NUMERO				
	760,490		19-1-77		ESTADOS UNIDOS.

47	FECHA DE PUBLICIDAD	51	CLASIFICACION INTERNACIONAL	62	PATENTE DE LA QUE ES DIVISIONARIA
			G21C		

54	TITULO DE LA INVENCION
METODO DE EXPLOTACION DE UN REACTOR NUCLEAR PARA PERMITIR EL SE- GUIMIENTO DE CARGA.	

71	SOLICITANTE (S)
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION.	

DOMICILIO DEL SOLICITANTE	
Westinghouse Building, Gateway Center - Pittsburgh, Pennsylvania 15222 - ESTADOS UNIDOS.	

72	INVENTOR (ES)

73	TITULAR (ES)

74	REPRESENTANTE
D. BERNARDO UNGRIA GOIBURU	

1 El presente invento se refiere a un método mejorado para la explotación de un reactor nuclear que permite el seguimiento de la carga manteniendo al mismo tiempo una distribución axial de la energía sustancialmente constante.

5 En los reactores de agua bajo presión se incluye corrientemente un elemento de absorción de neutrones en el interior del medio refrigerante (que sirve también como moderador) en concentraciones variables y controladas con el objeto de modificar la reactividad y por tanto el calor generado en el interior del núcleo, cuando se necesita. Además, unas barras de control están dispersas entre los conjuntos de combustible, pudiendo desplazarse axialmente en sentido longitudinal en el interior del núcleo para controlar la reactividad del mismo y por tanto la potencia generada. Generalmente, en el pasado, en los reactores de agua bajo presión se utilizaban tres tipos de barras de control que tenían varias finalidades. Las barras de longitud máxima que se extienden longitudinalmente por lo menos sobre la altura axial del núcleo, sirven para el control de la reactividad. Las barras de control de longitud parcial, que tienen una longitud axial sustancialmente inferior a la altura del núcleo, se emplean normalmente para el control de la distribución axial de la energía. Además, se utilizan unas barras de control de parada del reactor con el objeto de interrumpir la reacción de fisión sostenida en el interior del núcleo y para interrumpir el funcionamiento del reactor. Las barras de longitud parcial y las barras de longitud máxima están dispuestas de modo que puedan desplazarse progresivamente dentro y fuera del núcleo con el fin de obtener el grado de control deseado.

25 Se forma xenón como subproducto de la reacción de fisión, por medio de un proceso de decaimiento β de yodo radioac

1. tivo. El xenón tiene la propiedad de presentar una importante
sección transversal de absorción de neutrones y por tanto tiene
un efecto notable sobre la distribución de la energía en el in-
terior del núcleo y sobre el control de la reactividad. Aunque
5 las otras formas de actuar en la reactividad responden directa-
mente al control, la concentración del xenón en el interior del
núcleo crea serios problemas de control del reactor porque pre-
senta un período de decaimiento relativamente largo y necesita
hasta por lo menos 20 horas después de un cambio de potencia
10 para alcanzar un valor constante.

Aunque la distribución radial de la potencia del nú-
cleo es bastante uniforme debido a la disposición prescrita de
los conjuntos de combustible y a la posición de las barras de
control que están situadas simétricamente, radialmente a través
15 del núcleo, la distribución axial de la potencia puede variar
de manera importante durante el funcionamiento del reactor. La
distribución axial de la potencia del núcleo puede crear nume-
rosos problemas durante las operaciones del reactor. Normalmen-
te, la circulación del refrigerante a través de los conjuntos
20 de combustible se efectúa desde una porción inferior del núcleo
hasta unas regiones superiores del núcleo, lo que da lugar a la
formación de un gradiente de temperatura en sentido axial a lo
largo del núcleo. Los cambios en el grado de fisión, que depen-
den de la temperatura, variarán por tanto a lo largo del eje
25 del núcleo. En segundo lugar, la variación axial de la distri-
bución de la energía altera la distribución axial del xenón,
lo que acentúa todavía más las variaciones de la potencia en
el sentido axial del núcleo. En tercer lugar, la introducción
de las barras de control de longitud máxima desde la parte su-
30 perior del núcleo, sin tener en cuenta debidamente el historial

1 de funcionamiento anterior del reactor puede incrementar la
asimetría axial de la energía.

El cambio de la potencia suministrada por el núcleo
del reactor que se necesita para adaptarla a un cambio de la
5 potencia eléctrica de una instalación generadora de electrici-
dad se llama corrientemente seguimiento de carga. Un programa
de control de seguimiento de carga corrientemente recomendado
por los vendedores de reactores utiliza el movimiento de las
barras de control de longitud máxima para los incrementos y las
10 reducciones del nivel de potencia y las barras de control de
longitud parcial para controlar las oscilaciones axiales y la
forma del perfil axial de la energía. Los cambios de reactivi-
dad asociados con los cambios en la concentración del xenón se
compensan generalmente por unos cambios correspondientes en la
15 concentración del elemento de absorción de neutrones en el re-
frigerante o moderador del núcleo. En este modo de explotación,
las barras de longitud parcial se desplazan para mantener la
desviación axial en la gama deseada, típicamente de más o me-
nos 15%. La desviación axial es un parámetro útil para la me-
20 dición de la distribución axial de la energía y se define por
la siguiente fórmula:

$$\text{Desviación axial} = \frac{P_t - P_b}{P_t + P_b} ,$$

25 en la cual P_t y P_b indican la fracción de energía generada en
la mitad superior y en la mitad inferior del núcleo, respecti-
vamente. Con un programa de seguimiento de carga de este tipo,
no se efectúa ningún esfuerzo para mantener el perfil axial de
energía inherente al núcleo. Las barras de longitud parcial se
30 desplazan para reducir lo más posible la desviación axial, inde

1 pendiente de la desviación axial de estado constante esta
blecida anteriormente. Este procedimiento produce una fluctua
ción constante de la desviación axial durante las operaciones
de seguimiento de carga sostenidas, dando lugar a un cierto nú
5 mero de condiciones de funcionamiento indeseable. En primer
lugar, es probable que se producirá un efecto de concentración
de energía, es decir una cresta de energía importante centrada
axialmente. Dichas crestas de energía dan lugar a una limita
ción de la potencia del reactor ya que este último debe funcio
10 nar a un nivel de potencia reducido de modo que estas crestas
no rebasen magnitudes especificadas. En segundo lugar, se pro
ducen cambios importantes en el tercio axial de energía, de na
turaleza transitoria, durante los grandes cambios de carga de
bidos a la introducción masiva de barras de control a niveles
15 de potencia reducidos. En tercer lugar, se producen importan
tes transitorios de xenón cuando se vuelve a la potencia nor
mal, dando lugar a fenómenos periódicos, tales como oscilacio
nes axiales de la potencia. En cuarto lugar, las instrucciones
generales de utilización de las barras de longitud parcial su
20 ministradas por los fabricantes de reactores son generalmente
poco precisas y necesitan una anticipación y una interpretación
por parte del operador de la planta nuclear. En quinto lugar,
se producen factores de canales calientes más importantes (es
decir puntos calientes que se producen en el interior de los
25 canales de refrigeración entre los conjuntos de combustible)
necesitando una reducción de la potencia nominal del reactor
para acomodar los fenómenos transitorios importantes y/o los
perfiles de energía perjudiciales. En estos programas de segui
miento de carga no existe ninguna protección contra una concen
30 tración de energía importante con pequeñas variaciones axiales.

1 Un nuevo método de explotación de un reactor nuclear,
descrito en la patente de los Estados Unidos nº 4.057.463 ha si
do propuesto con el objeto de evitar las características de ex
plotación perjudiciales descritas más arriba. El método propues
5 to mantiene un perfil axial de xenón sustancialmente simétrico
durante el funcionamiento normal del reactor, seguimiento de
carga inclusive. El funcionamiento normal excluye generalmente
el arranque del reactor y la parada del reactor y se interpre
ta normalmente como incluyendo la gama de explotación de poten
10 cia del reactor en respuesta a los requisitos de carga. La rea
lización de la distribución de xenón deseada de acuerdo con es
te método, se obtiene supervisando la potencia generada en el
núcleo en unos primero y segundo emplazamientos axiales. Los
parámetros de potencia del núcleo medidos en los dos emplaza
15 mientos se computan de acuerdo con una relación predeterminada
tal como la desviación axial para facilitar un valor indicativo
de la distribución axial de la energía del núcleo. Los mecanis
mos de control de reactividad del reactor se manipulan de acuer
do con los valores supervisados con el objeto de mantener una
20 distribución de potencia sustancialmente simétrica en el inte
rior del núcleo durante el funcionamiento del reactor, segui
miento de carga inclusive.

 Se han descrito dos modos de realización separados
para mantener la distribución axial de energía deseada, de
25 acuerdo con este nuevo método de explotación del reactor. En
el primer modo de realización, las barras de control de longi
tud parcial permanecen extraídas del núcleo mientras que el
elemento de absorción de neutrones situado en el refrigerante
del núcleo se emplea para facilitar el reglaje de la reactivi
30 dad del núcleo de modo que corresponda a los cambios de los re

1 quisitos de potencia de salida, y se manipulan las barras de
control de longitud máxima para mantener el perfil axial de po
tencia deseado. En el segundo modo de realización, las barras
de control de longitud máxima se utilizan para controlar los
5 cambios de reactividad asociados con los cambios de potencia en
el núcleo, y las barras de longitud parcial se emplean para con
trolar la distribución axial de la energía, mientras que el ele
mento de absorción de neutrones situado en el refrigerante del
núcleo compensa los cambios de reactividad debidos a la acumu
10 lación o al agotamiento del xenón. Cada modo de realización es
capaz de llevar a la práctica los conceptos del método y cada
unos tiene sus respectivas ventajas distintas. Por ejemplo,
la utilización de las barras de control de longitud parcial pre
senta ciertas ventajas respecto al funcionamiento sin barras de
15 control de longitud parcial, tales como la capacidad de obtener
rápidos cambios de la potencia de salida y la comodidad del con
trol de desviación axial. Un inconveniente de la utilización de
las barras de longitud parcial es la ocultación del grado de
quemado que se produce cuando las barras de longitud parcial
20 están situadas cerca de la parte central del núcleo durante el
funcionamiento a la potencia máxima. Debido a que las barras
de control de longitud parcial actúan como elementos de absor
ción de neutrones, el combustible apantallado por las barras
de longitud parcial se agota mucho más lentamente que el com
25 bustible del resto del núcleo. Esto puede dar lugar a elevados
niveles de cresta en el centro del núcleo cuando se extraen
las barras de longitud parcial si se realiza un funcionamiento
con carga elevado. La ocultación del grado de quemado ha sido
objeto de gran preocupación y la utilización de las barras de
30 longitud parcial ha sido desaconsejada. En variante, el funcio

1 namiento sin barras de longitud parcial, aunque deseable desde
el punto de vista del rendimiento del combustible, presenta un
retorno relativamente lento a una capacidad de suministro de
energía en respuesta al incremento de la carga. La velocidad
5 de incremento de la potencia durante el funcionamiento sin las
barras de longitud parcial depende de la velocidad de dilución
del elemento de absorción de neutrones contenido en el refrige
rante, el cual, en el caso de reactores de agua bajo presión,
es boro. Actualmente, los reactores nucleares en servicio uti
10 lizan sistemas de intercambio iónico o sistemas de cambio de
refrigerante para controlar la concentración de boro en el re
frigerante. Estos sistemas presentan típicamente un tiempo de
respuesta relativamente lento.

Por consiguiente, se desea obtener un método mejorado
15 de explotación de un reactor nuclear capaz de incrementar la
capacidad de seguimiento de carga de las centrales de energía
nuclear para adaptarla a rápidas variaciones de carga.

El objeto principal consiste en proporcionar un méto
do mejorado de explotación de un reactor nuclear que permite
20 realizar el seguimiento de carga manteniendo al mismo tiempo
una distribución axial de la energía sustancialmente constante.

El invento consiste en un método de explotación de
un reactor nuclear que permite el seguimiento de carga, tenien
do el reactor un núcleo que incluye un material fisionable con
25 una dimensión axial, un medio refrigerante y un moderador, que
sirven respectivamente para extraer el calor del núcleo y fre
nar los neutrones de fisión en el núcleo, teniendo el moderador
un coeficiente de temperatura de reactividad negativo, incluyen
do el método las operaciones que consisten en mantener una dis
30 tribución de energía sustancialmente constante en el sentido

1 axial a través del núcleo y en aumentar la reactividad en el
interior del núcleo sin alterar sustancialmente la distribución
axial de la energía del núcleo, al producirse una demanda dada,
por medio de una reducción de la temperatura del refrigerante,
5 de manera controlada.

En breves términos, el método según el invento mejora la capacidad de seguimiento de carga de los reactores nucleares, que tienen un coeficiente de temperatura negativo del moderador de reactividad, funcionando con una desviación axial sustancialmente constante y con o sin barras de control de longitud parcial, mediante una adaptación a los requisitos de incremento de reactividad en el interior del núcleo por encima y más allá de la capacidad de dilución del sistema de boro con una reducción controlada de la temperatura del núcleo. La temperatura del núcleo se reduce a una velocidad compatible con la velocidad de incremento de los requisitos de carga hasta una diferencia de temperatura máxima preestablecida con relación a la temperatura de funcionamiento programada del reactor. Además, se inhibe la extracción de las barras de control de longitud máxima por encima de un nivel capaz de alterar de manera perjudicial la desviación axial deseada.

Para facilitar el entendimiento del invento, se hará referencia al modo de realización que constituye un ejemplo del invento, que se ilustra en los dibujos adjuntos, en los cuales:

la figura 1 es una ilustración esquemática de una central nuclear;

la figura 2 es un diagrama en bloques de sistemas de control que se indican a título de ejemplo y que puede utilizarse para llevar a la práctica las fases del presente inven

1 to;

la figura 3 es una ilustración gráfica de la velocidad posible de incremento de la potencia de salida de la turbina en respuesta a un requisito de incremento de carga, en el comienzo de la vida y en el final de la vida de una central nuclear típica que utiliza un control de temperatura media de acuerdo con el "estado actual de la técnica" y un control de desviación axial constante sin barras de longitud parcial;

la figura 4 es una ilustración gráfica de la velocidad de incremento de la potencia de salida de la turbina que puede ser obtenida gracias al invento;

la figura 5 es una ilustración gráfica de la región de funcionamiento a temperatura reducida durante el retorno a la potencia, utilizando el método según el invento;

la figura 6 es una ilustración gráfica de tres variaciones que pueden ser utilizadas en la programación de la temperatura media del refrigerante primario de un reactor nuclear para controlar el funcionamiento del reactor;

la figura 7 es una ilustración gráfica de las variaciones que pueden producirse en la presión del vapor en función de la potencia, que corresponden a los programas de la temperatura media de la figura 6;

la figura 8 es una ilustración gráfica de un incremento transitorio de la potencia, que se da a título de ejemplo, que se obtiene utilizando el control por barras de longitud parcial;

la figura 9 es una ilustración gráfica de la temperatura media y del programa de temperatura media que corresponde al transitorio de potencia que se ilustra en la figura 8;

la figura 10 es una ilustración gráfica de la varia

1 ción de la presión del vapor en función del tiempo que corres-
ponde al transitorio de potencia ilustrado en la figura 8;

la figura 11 es una ilustración gráfica de un rápido
retorno al transitorio de potencia utilizando el control de
5 temperatura media de acuerdo con el estado actual de la técnica
y el funcionamiento sin barras de longitud parcial;

la figura 12 es una ilustración gráfica de la tempe-
ratura media y del programa de temperatura media que correspon-
de al transitorio que se ilustra en la figura 11;

10 la figura 13 es una ilustración gráfica de las varia-
ciones de la presión del vapor en función del tiempo, que
corresponden al transitorio ilustrado en la figura 11;

la figura 14 es una ilustración gráfica de un rápido
retorno a la potencia máxima utilizando los procedimientos del
15 invento;

la figura 15 es una ilustración gráfica del programa
de temperatura media que corresponde al transitorio de la figu-
ra 14; y

la figura 16 es una ilustración gráfica de las varia-
20 ciones de presión del vapor en función del tiempo, que corres-
ponden al transitorio de potencia ilustrado en la figura 14.

La figura 1 ilustra una representación esquemática
de un reactor de agua bajo presión típico que puede utilizar
el método según el invento para evitar las dificultades de ex-
25 plotación experimentadas en la técnica anterior, manteniendo
sin embargo una capacidad máxima de seguimiento de carga. El
reactor de la figura 1 incluye una vasija 10 que constituye
un recipiente capaz de resistir a la presión cuando está cerra-
do herméticamente por su conjunto superior 12. La vasija está
30 provista de un dispositivo de entrada de circulación de refri-

1 gerante 16 y de un dispositivo de salida de circulación de re
frigerante 14 que forman parte integrante de sus paredes cilín
dricas y que las atraviesan. Como es conocido en esta técnica,
la vasija contiene un núcleo de reactor del tipo descrito más
5 arriba, que consiste principalmente en una pluralidad de ele
mentos de combustible nuclear envainados que generan cantidades
sustanciales de calor, principalmente en función de la posición
de las barras de control descritas anteriormente. El calor ge
nerado por el núcleo del reactor es extraído del núcleo por
10 la circulación de refrigerante que penetra a través del disposi
tivo de entrada 16 y que sale a través del dispositivo de sali
da 14. Generalmente, la circulación que sale a través del dis
positivo de salida 14 es conducida a través de un conducto de
salida 26 hasta un sistema generador de vapor 28 del tipo de
15 cambio térmico, en el cual la circulación de refrigerante ca
liente es conducida a través de unos tubos, que se ilustran es
quemáticamente por la referencia numérica 18, y que están en
posición de cambio térmico con el agua utilizada para producir
el vapor. El vapor producido por el generador 28 se utiliza
20 corrientemente para accionar una turbina 20 destinada a la pro
ducción de electricidad. La circulación de refrigerante es con
ducida a partir del generador de vapor 28 por medio de la bomba
22 a través de un conducto de ramal frío 30 hasta el dispositi
vo de entrada 16. De este modo un circuito cerrado primario de
25 reciclado o de generación de vapor está provisto del tubo de
refrigerante que conecta la vasija 10 y el generador de vapor
28. La vasija representada en la figura 1 se ilustra con un sis
tema o circuito cerrado de circulación de fluido de este tipo,
aunque se entenderá que el número de estos circuitos puede va
30 riar de una instalación a la otra, utilizándose corrientemente

1 dos, tres o cuatro de ellos. Aunque esto no se representa en
el circuito ilustrado en la figura 1, un circuito de cada ins-
talación incluye un presurizador que responde a la iniciación
de una variación de presión en el interior del sistema prima-
5 rio debida a los cambios de temperatura y a las variaciones de
otras condiciones de funcionamiento, para mantener una presión
primaria sustancialmente constante.

El lado secundario del generador de vapor está aisla-
do del refrigerante primario por los tubos de cambio térmico
10 18. En el generador de vapor, el fluido secundario 34 se sitúa
en relación de cambio térmico con el refrigerante primario, ca-
lentándose y transformándose en vapor de agua. El vapor fluye
a través de un conducto de vapor 38, indicando por la flecha
36, hasta una turbina 20 que está conectado por medio del eje
15 24 con una carga, por ejemplo un generador eléctrico. La canti-
dad de vapor que se conduce a la turbina se controla por medio
de una válvula reguladora 40. Después de atravesar la turbina
20, el vapor se condensa en un condensador 42. El condensado o
agua que se forma de este modo es conducido de nuevo al lado
secundario o lado de envoltura del generador de vapor a través
de los conductos 50, a través de la bomba de condensado 44, del
calentador de agua de alimentación 46 y de la bomba de agua de
alimentación 48 como se indica por medio de la flecha de circu-
lación 52. De ese modo, se obtiene un sistema de reciclado se-
25 cundario generador de electricidad en el cual el tubo de flui-
do secundario conecta al generador de vapor 28 con la turbina
20.

Las temperaturas del refrigerante en el conducto de
salida 26 del reactor y en el conducto de entrada 30 del reac-
30 tor, para cada uno de los circuitos primarios de un sistema de

1 reactor de agua bajo presión típico, tal como el que se ilustra en la figura 1, se detectan por medio de elementos de medición de temperatura 54 y 56, respectivamente, los cuales pueden estar constituidos, cada uno por un termopar o un bulbo de resistencia sensible a la temperatura. Los elementos de medición de temperatura 54 y 56 producen señales de salida T_1 y T_2 , respectivamente, que son representativas de la temperatura instantánea en el emplazamiento de la medición. Las señales T_1 y T_2 de cada circuito se aplican a una unidad de promediado de temperatura y los valores medios respectivos procedentes de los varios circuitos se comparan para identificar la temperatura media de funcionamiento instantánea más elevada del reactor. La temperatura de funcionamiento identificada se compara a continuación con un valor de referencia que es corrientemente una función programada de la carga. Actualmente, cuando la temperatura instantánea identificada del reactor se aleja de la referencia programada, se genera una señal de error que controla el movimiento de las barras de control en la dirección que da lugar a una reducción del error. Por consiguiente, se utiliza normalmente un modo de funcionamiento con seguimiento de carga del reactor y temperatura media programada, tal como el que se describe en la patente de los Estados Unidos nº 3.423.285 a nombre de C.F. Currey y Socios:

25 Cuando se produce un incremento de la demanda de carga, el operador de la central abre la válvula reguladora 40 que alimenta la turbina 20 hasta que se obtenga la potencia de salida deseada. El mayor caudal de vapor conducido a la turbina reduce la presión secundaria y aumenta la extracción del calor a partir del refrigerante primario. Se evita una caída correspondiente en la temperatura del refrigerante primario mediante

30

1 la manipulación de las barras de control 58 en respuesta a las
señales de control obtenidas a partir del sistema de control de
temperatura media programada (es decir del tipo descrito en la
patente a nombre de Currey y Socios).

5 En la técnica se conocen varios programas de control
de temperatura media. Por ejemplo, uno de los primeros progra
mas mantenía el refrigerante en el circuito primario a una tem
peratura constante, en toda la gama de carga del reactor nu
clear. Para un reactor nuclear dado, este tipo de programa de
10 explotación permite que el valor de carga máxima de la central
nuclear sea más próximo a los límites de funcionamiento seguro
del reactor. Esto resulta del hecho de que uno de los parámetros
limitadores del reactor es la temperatura del refrigerante, por
que las consideraciones termo-hidráulicas exigen que la poten
15 cia de salida permisible del reactor sea reducida cuando la
temperatura del refrigerante aumenta. Además, los transitorios
de carga eléctrica aplicados a una central nuclear, tales como
por ejemplo un brusco incremento de la carga del turbogenerador
desde 90% a 100%, pueden producir fácilmente una sobrecarga
20 transitoria del reactor de un 5% por encima de la carga nominal
de 100%. Con un programa de control de temperatura media cons
tante, se reduce durante ese transitorio el incremento de la
temperatura del refrigerante. Por tanto, la carga máxima nomi
nal de la central puede ser especificada en un valor más próxi
25 mo al límite de funcionamiento seguro del reactor que en el
caso de un control del tipo de temperatura programada que per
mite normalmente un incremento de la temperatura durante una
sobrecarga de este tipo. Con este género de control de tempera
tura, la temperatura del refrigerante primario es independiente
30 de la carga de la central, lo que hace que se producen con los

1 cambios de carga un cambio de volumen pequeño o nulo. Por con
siguiente, el presurizador conectado con el circuito primario
puede tener una capacidad relativamente pequeña ya que sus di
mensiones pueden ser previstas solamente para condiciones tran
5 sitorias.

Sin embargo, el inconveniente de la utilización de un
control de temperatura constante en toda la gama de carga con
siste en que da lugar a una elevación de característica en la
presión del circuito secundario con cargas reducidas. Con car
10 gas reducidas, la diferencial media de temperatura entre el la
do de los tubos y el lado de la envoltura del generador de va
por disminuye hasta un valor bajo cuando la temperatura del
fluido secundario sube a un valor próximo al valor de la tempe
ratura del refrigerante primario. Esta elevación de la tempera
15 tura del fluido secundario da lugar a una elevación correspon
diente de la presión del fluido secundario. Por consiguiente,
para una presión de vapor dada con carga máxima, el circuito
secundario debe ser diseñado para presiones mucho más elevadas
que las presiones que existen al nivel de funcionamiento con
20 carga máxima. Evidentemente, la necesidad de diseñar el circui
to para una presión más elevada da lugar a un incremento impor
tante e indeseable en el coste de inversión del generador de
vapor y otros componentes utilizados en y conjuntamente con el
circuito secundario. El gráfico A de la figura 6 ilustra un
25 programa de temperatura media constante de este tipo con la va
riación correspondiente de la presión de vapor en función de
la potencia ilustrada por el gráfico A en la figura 7.

En variante, si se utiliza un programa de presión de
vapor constante como se ilustra por el gráfico B en la figura
30 7, se encuentran importantes variaciones de temperatura prima

1 ria como se ilustra por medio del gráfico B de la figura 6, ne
cesitando así un presurizador de mayor capacidad con sus
correspondiente coste más elevado y otros inconvenientes. El
programa de temperatura media variable que se ilustra por el
5 gráfico C en la figura 6 y su respuesta de presión de vapor
correspondiente identificada por el gráfico C en la figura 7,
constituye una solución de compromiso y facilita las condicio
nes de funcionamiento más eficaces para funcionamiento a poten
cia normal según se describe en la patente a nombre de Currey
10 y Socios.

La puesta en práctica de un control de desviación
axial constante sin utilizar barras de control de longitud par
cial para mantener las condiciones de funcionamiento más ade
cuadas en el interior del reactor con el fin de evitar limita
15 ciones de potencia, altera la práctica normal que consiste en
emplear las barras de control de longitud máxima para conseguir
la velocidad deseada de cambio de reactividad con el fin de man
tener la temperatura media instantánea igual a la temperatura
media programada. Las barras de control de longitud máxima ba
20 jo control de desviación axial constante sin barras de longitud
parcial, se utilizan para mantener la desviación axial sustan
cialmente igual a un valor deseado. Las variaciones de potencia
producidas por ejemplo por cambios de temperatura se compensan
ahora haciendo variar la concentración del elemento de absor
25 ción de neutrones en el refrigerante. En los reactores de agua
ligera bajo presión, el hidrógeno contenido en el refrigerante
actúa como moderador para frenar los neutrones creados en el
proceso de fisión hasta un nivel de energía más favorable para
sostener la reacción de fisión en cadena que se produce en el
30 interior del núcleo. Se utiliza corrientemente boro en estos

1 reactores, como elemento de absorción de neutrones en el refri
gerante. Las concentraciones de boro se controlan generalmente
por medio de un proceso de cambio iónico o de dilución que es
típicamente lento y cuya eficacia disminuye generalmente entre
5 el comienzo de la vida y el final de la vida del núcleo. Sin
embargo, el sistema es eficaz para compensar la mayoría de los
cambios de carga sin perturbar la distribución axial de la ener
gía del núcleo. La figura 3 ilustra la capacidad que tienen am
bos sistemas de barra de control de longitud máxima y de boro
10 para compensar el incremento de la carga de la turbina en fun
ción del tiempo tanto en el comienzo de la vida (BOL) como en
el final de la vida (EOL) de un núcleo de reactor típico. Los
requisitos de cambios de carga más rápidos se satisfacían en
el pasado utilizando instalaciones de combustible fósil como
15 sistemas auxiliares.

El presente invento proporciona un método mejorado
para explotar un reactor nuclear, que mantiene el proceso es
pecificado por el control de desviación axial constante, pro
porcionando sin embargo una mayor capacidad de respuesta a los
20 requisitos de incremento de carga y superando las limitaciones
de capacidad de dilución de los sistemas de boro. Para obtener
este resultado, el invento aprovecha el coeficiente de tempera
tura negativo del moderador de reactividad de los reactores de
agua ligera bajo presión para conseguir un rápido incremento
25 de la reactividad mediante una reducción controlada de la tem
peratura del circuito primario.

El retorno rápido a la potencia durante el seguimien
to de carga utilizando control de desviación axial constante
sin barras de longitud parcial está limitado porque es necesa
30 rio introducir las barras de control a una profundidad reducida

1 para mantener la configuración de flujo axial deseada en el núcleo. Una mejora considerable en el retorno a la capacidad de potencia se obtiene aprovechando cualquier capacidad sobrante disponible de la válvula reguladora y reduciendo al temperatura del refrigerante primario durante los incrementos transitorios de carga. El grado de incremento de reactividad depende de la magnitud de la caída de temperatura obtenida en el circuito primario y de la magnitud del coeficiente negativo de temperatura del moderador. Una capacidad sobrante de la válvula reguladora (disponible en la mayoría de los reactores) permite obtener niveles de potencia más altos y presiones de vapor más reducidas. La figura 4 ilustra el nivel de potencia que puede ser obtenido a razón de 5%/minuto (a partir del 50% de la potencia) en el comienzo de la vida del reactor que corresponde a la introducción de las barras de control de reactividad que se representan en la figura 3. En cada caso se ha supuesto una capacidad de válvula reguladora del 105% (valor típico) del valor nominal. Una comparación de los dos resultados ilustra el incremento de capacidad de seguimiento de carga obtenido gracias al método según el invento.

De acuerdo con un modo de realización preferido del invento, en respuesta a un incremento del requisito de potencia necesitado por un incremento de la carga, la válvula reguladora 40 de la turbina se carga (se abre) a la velocidad deseada de incremento de apertura (por ejemplo 5%/minuto). Al mismo tiempo se efectúa la dilución del boro a la velocidad máxima disponible. La carga de la turbina descrita más arriba producirá una reducción de la temperatura media instantánea del refrigerante del núcleo, la cual dará lugar a la extracción automática de las barras de control de longitud máxima por medio

1 del sistema de control de temperatura media. Se identifica la
diferencia de flujo axial, es decir la diferencia de flujo en
tre las regiones superiores e inferiores del núcleo, y se de
tiene la extracción automática de las barras de control de lon
5 gitud máxima si y cuando la diferencia de flujo axial alcanza
su límite superior de banda de control (más positivo) que corres
ponde a su valor deseado (ajustado por las especificaciones de
desviación axial constante). La temperatura del refrigerante
primario empezará a disminuir tan pronto como las barras de
10 control se detienen, o, si no se ha obtenido un acercamiento
a los límites de control de diferencia de flujo, cuando las
barras de control alcanzan su límite de extracción en la parte
superior del núcleo. Se supervisa constantemente la temperatura
media instantánea del refrigerante primario. Si y cuando la di
15 ferencia entre la temperatura media instantánea del refrigeran
te primario y la temperatura programada del refrigerante espe
cificada por el sistema de control de temperatura media alcan
za un valor máximo preestablecido, típicamente de 20°C, se de
tiene la carga de la turbina para impedir cualquier reducción
20 suplementaria de la temperatura. En la práctica, se utiliza
alguna compensación de retardo de velocidad para tener en cuen
ta la inercia térmica del sistema. El límite de temperatura má
ximo se ajusta para impedir una reducción de potencia del reac
tor que podría ser producida por el hecho de que el sistema ha
25 interpretado la caída de temperatura como una interrupción de
la tubería del generador de vapor. Si se alcanza el límite de
temperatura preestablecido y se detiene la carga de la turbina,
la diferencia entre temperatura real del refrigerante y tempe
ratura programada del mismo se reducirá como resultado de la
30 dilución del boro. En la mayoría de los casos, una reducción de

1 20°C de la temperatura permitirá obtener la velocidad deseada
del incremento de la reactividad. En caso contrario, se carga
y descarga la turbina como se indica más arriba hasta que la
válvula reguladora esté totalmente abierta. A partir de este
5 punto, la velocidad de incremento de la potencia se controla
por medio de la velocidad de dilución del boro. En esta última
fase se supone que la potencia de salida deseada no ha sido al-
canzada en algún punto intermedio. La operación de dilución del
boro se detiene cuando la turbina funciona a la potencia dese-
10 da y la temperatura del refrigerante ha alcanzado su valor de
programa especificado por el sistema de control de temperatura
media del refrigerante. Cualquier utilización de capacidad so-
brante de la válvula de regulación se detiene automáticamente
cuando se alcanza la potencia máxima, por medio de los contro-
15 ladores normales de la turbina.

Las fases de este método se aplican a cualquier ni-
vel de potencia inicial durante el funcionamiento y a cualquier
conjunto de condiciones de funcionamiento normales. El nivel
de potencia conseguido durante el retorno acelerado a la poten-
20 cia nominal depende principalmente del nivel de potencia ini-
cial, del ciclo del núcleo, (con o sin equilibrio), de la dura-
ción de vida del ciclo del núcleo, de la potencia nominal, y
de la reducción de la temperatura permitida. Naturalmente, se
observará que los valores especificados son valores típicos
25 aunque pueden variar en cierto grado de una instalación a la
otra según las especificaciones de explotación de cada insta-
lación particular.

La cantidad de energía (reactividad) que puede ser
obtenida reduciendo la temperatura del refrigerante primario
30 es proporcional a la caída de temperatura permitida. Sin embar-

1 go, existen límites prácticos a la magnitud de la reducción de
temperatura que puede ser obtenida. La figura 5 representa una
región de funcionamiento típica con temperatura reducida para
un reactor de agua ligera bajo presión. El límite izquierdo de
5 la región de funcionamiento está definido por el límite de fun
cionamiento inferior del sistema de control automático de las
barras y por el funcionamiento de los dispositivos de protección
de enfriamiento del reactor. El límite derecho depende de la
capacidad de la válvula de regulación (función de la temperatu
10 ra/presión del vapor). El límite derecho que se representa en
la figura 5 supone una capacidad de válvula de regulación igual
al 105% de la potencia máxima. En instalaciones nucleares en
funcionamiento existe una capacidad sobrante de válvula de re
gulación de 105 a 110%. El límite inferior de la región de fun
15 cionamiento está definido por los reglajes de los dispositivos
de protección de enfriamiento del reactor, por las fuerzas tér
micas aplicadas a las vasijas del reactor y a los demás compo
nentes de la instalación, y por consideraciones de arrastre de
humedad del generador de vapor.

20 El método según el invento es compatible con el fun
cionamiento por control programado de temperatura media que se
describe en la patente a nombre de Currey y Socios mencionada
más arriba. Para un control de desviación axial constante sin
barras de control de longitud parcial, la única modificación
25 necesaria consiste en que los reglajes de temperatura media
instantánea del refrigerante del núcleo se efectúen mediante
dilución de boro en lugar de desplazamiento de las barras de
control. El circuito de diagrama en bloques que se ilustra de
manera general por medio de la referencia numérica 60 en la
30 figura 2, es capaz de realizar las modificaciones necesarias.

1 La banda deseada de límites de flujo que es función de la po
tencia del reactor se programa en el circuito 62 de puntos de
reglaje. La diferencia de flujo entre las regiones superiores
e inferiores del núcleo se supervisa por medio de cuatro gru
5 pos de detectores de neutrones dispuestos alrededor de la peri
feria del reactor. La unidad de comparación 64 identifica el
valor menos favorable de diferencia de flujo que ha sido super
visado. La diferencia de flujo en el caso menos favorable se
compara con el punto de reglaje generado por el circuito 62
10 por medio de un comparador 66. Si se ha rebasado el punto de
reglaje, se genera una señal de inhibición que se aplica al
sistema de control de barras de longitud máxima para impedir
la extracción más completa de las barras de control. De manera
similar, la inhibición del límite de diferencia de temperatura
15 se obtiene por medio del circuito en bloques que se ilustra
por la referencia numérica 70. La temperatura media del refri
gerante que ha sido medida se compara con el valor programado
de la temperatura del refrigerante, que es función de la carga
representada por la entrada en forma de impulso de presión de
20 la turbina que se aplica a la unidad de programación 72. La
magnitud de la diferencia entre la temperatura media del refri
gerante que ha sido medida y la temperatura programada se apli
ca al comparador 74 que compara la señal con el punto de regla
je de diferencia de temperatura. Si se ha rebasado el punto de
25 reglaje, se inhibe por medio del controlador 76 cualquier car
ga suplementaria de la válvula de regulación de turbina. Una
señal de compensación 78 se suministra bajo la forma de retar
dos de velocidad para compensar la inercia térmica del sistema.
Por consiguiente, el sistema de control de temperatura media
30 actualmente en funcionamiento puede ser modificado fácilmente

1 para llevar a la práctica las operaciones según el invento con
el objeto de mejorar la capacidad de seguimiento de carga du
rante un funcionamiento con desviación axial constante.

Las figuras 14, 15 y 16 ilustran un cambio correspon
5 diente en las condiciones de la instalación cuando se produce
un retorno rápido a la potencia, utilizando el método según el
invento. La porción dibujada en líneas de puntos de la curva
ilustrada en la figura 15 identifica el programa de control de
temperatura media, mientras que la porción continua de la cur
10 va indica la variación obtenida utilizando los procedimientos
del invento. Las porciones dibujadas en líneas de puntos y en
líneas continuas de la figura 16 corresponden respectivamente
a las condiciones de funcionamiento identificadas en la figura
15. Por el contrario, las figuras 8, 9 y 10 representan de ma
15 nera correspondiente un retorno a la potencia, dado a título
de ejemplo, a una velocidad de 5%/minuto a partir de 50% de la
potencia, lo que es equivalente a la capacidad de reserva máxi
ma de variación a partir del 50% de la potencia. Las líneas de
puntos de las figuras 9 y 10 indican los valores del programa
20 y las líneas continuas corresponden a las condiciones de fun
cionamiento. La reserva de variación es la diferencia entre el
nivel de potencia de funcionamiento normal de la instalación y
el nivel de potencia que puede ser conseguido en el caso de un
brusco incremento importante de energía. El transitorio ilustra
25 do en la figura 8 no es posible sin utilización de barras de
longitud parcial, ya que las barras de control no se introdu
cen en el núcleo a una distancia suficiente para intentar este
cambio mediante su extracción. Sin embargo, si no se tiene en
cuenta la distribución axial de la energía, teóricamente es po
30 sible obtener este transitorio. Las figuras 11, 12 y 13 ilus

1 tran la capacidad de conseguir la potencia máxima bajo control
de desviación axial constante sin barras de control de longi
tud parcial. Las porciones dibujadas en líneas de puntos y en
líneas continuas del gráfico, corresponden respectivamente a
5 las condiciones de funcionamiento programadas ideales que han
sido experimentadas. Las características de funcionamiento ilus
tradas son compatibles con los datos de final de vida que se
ilustran en la figura 3. Solamente puede conseguir el 70% de
la potencia con un incremento de 5%/minuto. Por consiguiente,
10 se observará el incremento de capacidad de seguimiento de car
ga que permite el presente invento.

En resumen, la presente patente de invención que se
solicita deberá recaer en las siguientes

REIVINDICACIONES

15 1. Método de explotación de un reactor nuclear pa
ra permitir el seguimiento de carga, teniendo el reactor un nú
cleo reactivo que incluye material fisionable con una dimensión
axial, un medio refrigerante y un moderador, respectivamente
para extraer el calor del núcleo y para frenar los neutrones
20 de fisión en el núcleo, teniendo el moderador un coeficiente
de temperatura de reactividad negativo, incluyendo el método la
operación que consiste en mantener una distribución de potencia
sustancialmente constante en sentido axial a través del núcleo,
estando dicho método caracterizado porque la reactividad en el
25 interior del núcleo se aumenta sin alterar sustancialmente la
distribución axial de la potencia del núcleo, al producirse
una demanda dada, mediante una reducción de la temperatura del
refrigerante de una manera controlada.

30 2. Método según la reivindicación 1, caracterizado
porque el medio refrigerante se hace circular dentro y fuera

1 del núcleo y a través de un cambiador térmico en un sistema
cerrado primario de reciclado en el cual el cambiador térmico
sitúa el medio refrigerante en relación de cambio térmico con
5 el agua para formar vapor que se transporta a través de una
válvula reguladora hasta un orificio de descarga y porque la
temperatura del refrigerante se reduce aumentando la cantidad
de calor extraída del medio refrigerante por medio del cambia
dor térmico para producir vapor incrementando la cantidad de
vapor descargada mediante la abertura de la válvula de regula
10 ción.

3. Método según la reivindicación 2, caracterizado
porque incluye la operación que consiste en impedir que la tem
peratura del refrigerante disminuya por debajo de un valor pre
determinado gracias a una limitación de la apertura de la vál
15 vula de regulación.

4. Método según la reivindicación 3 caracterizado
porque el valor predeterminado es inferior en $11,1^{\circ}\text{C}$ (20°F)
respecto a la temperatura de funcionamiento normal del refrige
rante.

20 5. Método según la reivindicación 3 ó 4, en el cual
el medio refrigerante incluye un elemento de absorción de neu
trones, caracterizado porque incluye la operación que consiste
en diluir el elemento de absorción de neutrones comprendido en
el medio refrigerante para aumentar todavía más la reactividad
25 en el interior del núcleo después de que se ha detenido una re
ducción suplementaria de la temperatura del refrigerante por
debajo del valor predeterminado.

6. Método según una cualquiera de las anteriores
reivindicaciones, en el cual el reactor incluye unas barras de
30 control que se extienden axialmente por lo menos a lo largo de

1 la longitud axial del núcleo y que pueden desplazarse axialmen
te dentro y fuera del núcleo y en el cual la distribución axial
de la potencia está representada por la diferencia entre los
flujos generados en las mitades superior e inferior del núcleo,
5 caracterizado porque incluye la operación que consiste en man
tener la diferencia de flujos generados en las mitades superior
e inferior del núcleo sustancialmente constante durante el fun
cionamiento de potencia del reactor mediante el posicionamien
to axial de las barras de control.

10 7. Método según la reivindicación 6, caracterizado
porque incluye la operación que consiste en impedir que las
barras de control sean extraídas del núcleo cuando la diferen
cia entre los flujos rebasa sustancialmente un valor preesta
blecido.

15 8. Se reivindica por último como objeto sobre el
que ha de recaer la Patente de Invención que se solicita
por: METODO DE EXPLOTACION DE UN REACTOR NUCLEAR PARA PER
MITIR EL SEGUIMIENTO DE CARGA.

20 Todo conforme queda descrito y reivindicado en la
presente memoria descriptiva, que consta de veintisiete
páginas mecanografiadas y dibujos adjuntos.

Madrid, 18 Enero de 1.978

BERNARDO UNGRIA

P.P.



25

30

FE DE ERRATAS RELATIVAS A LA PATENTE DE INVENCION No 466.129

Página 25, línea 21, donde dice:

....de temperatura de reactividad negativo, incluyendo el método la operación que consiste en mantener una distribución de potencia sustancialmente constante en sentido axial a través del núcleo, estando dicho método caracterizado porque la reactividad en el interior del núcleo se aumenta sin alterar sustancialmente la distribución axial de la potencia del núcleo, al producirse una demanda dada, mediante una reducción de la temperatura del refrigerante de una manera controlada.

debe decir:

.....de temperatura de reactividad negativo, y un primer bucle de refrigerante para transmitir el medio refrigerante al generador de vapor por intercambio de calor, incluyendo el método la operación que consiste en mantener una distribución de potencia sustancialmente constante en sentido axial a través del núcleo, estando dicho método caracterizado porque la reactividad en el interior del núcleo se aumenta sin alterar sustancialmente la distribución axial de la potencia del núcleo, al producirse una demanda dada, mediante una reducción de la temperatura media del refrigerante mientras se mantiene sustancialmente constante el flujo del refrigerante primario.

Página 26, línea 13, donde dice:

... peratura del refrigerante disminuya por debajo de un valor pre

debe decir:

... peratura media del refrigerante disminuya por debajo de un valor pre-

FIG. 1

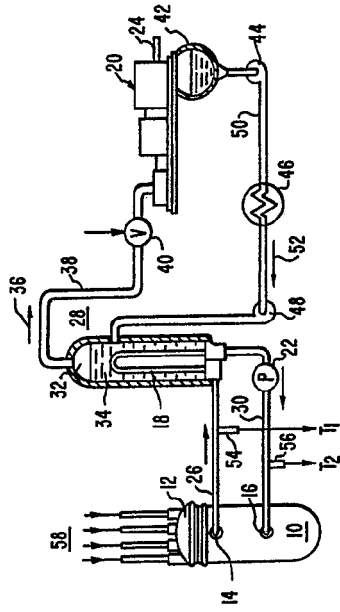


FIG. 3

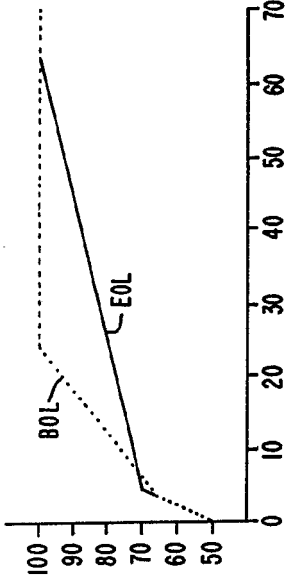


FIG. 4

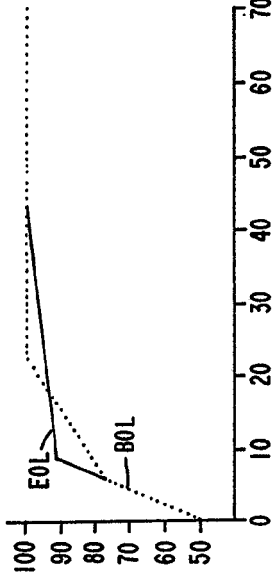


FIG. 5

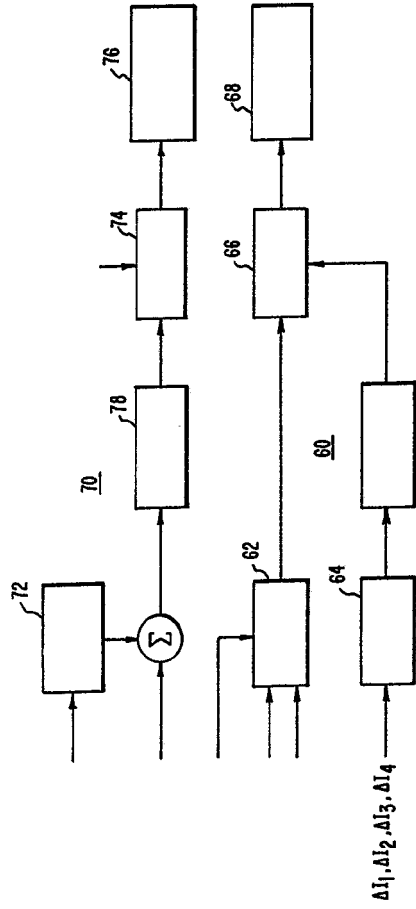
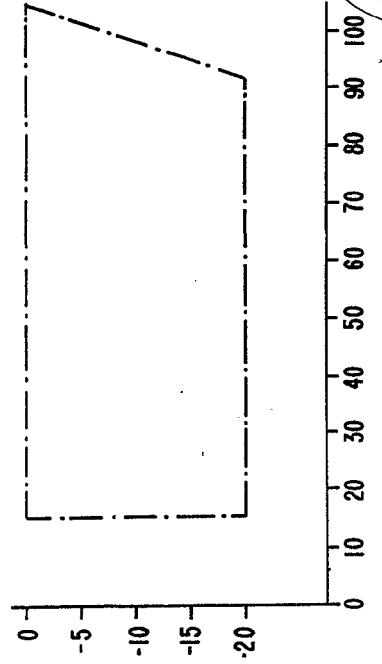


FIG. 2

FIG. 1

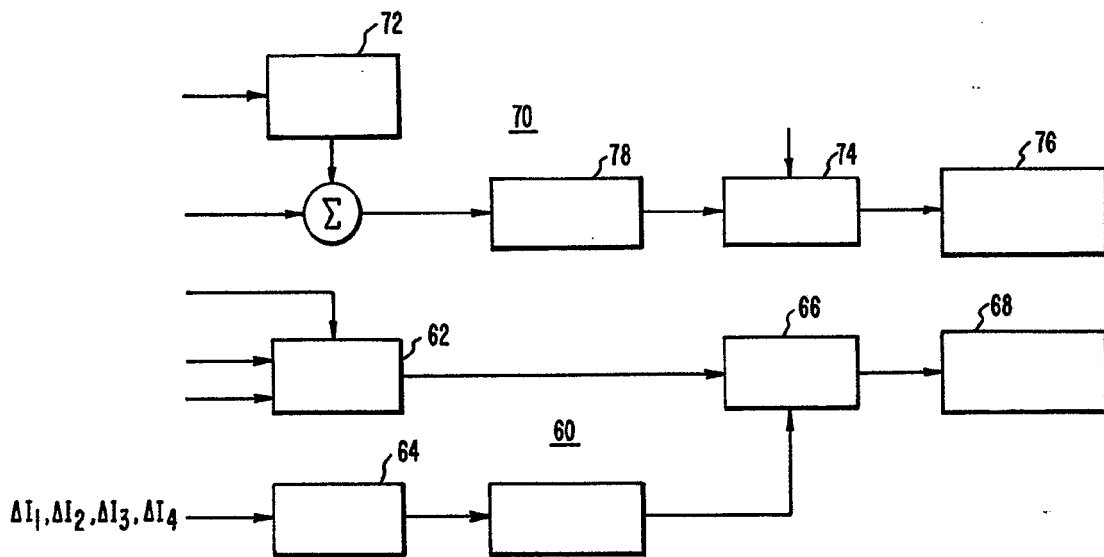
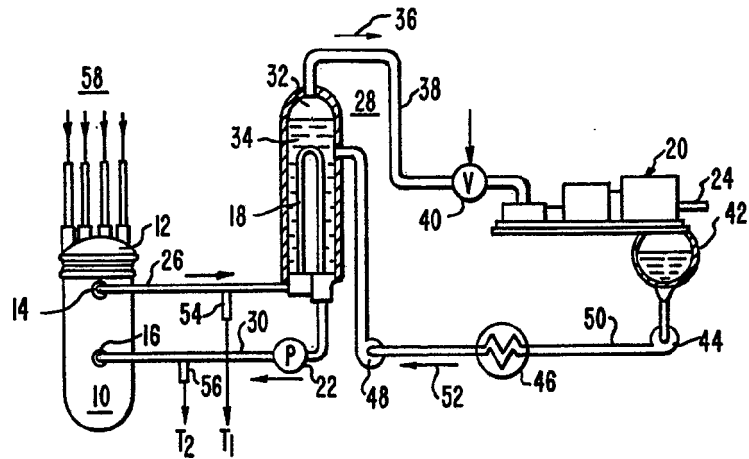


FIG. 2

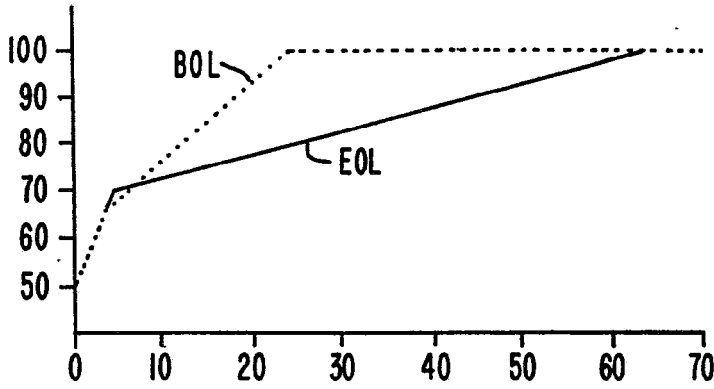


FIG. 3

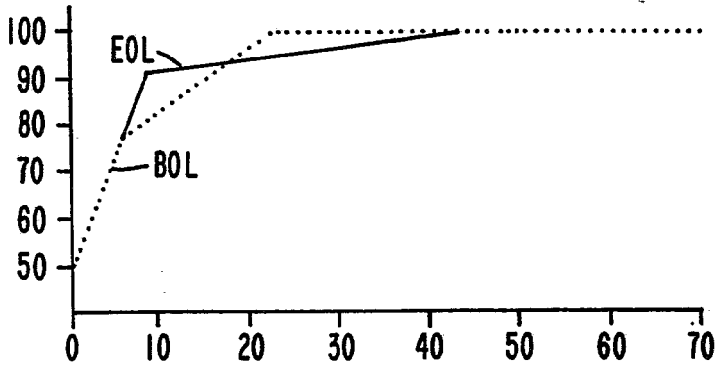
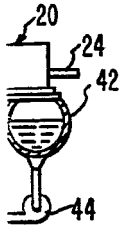


FIG. 4

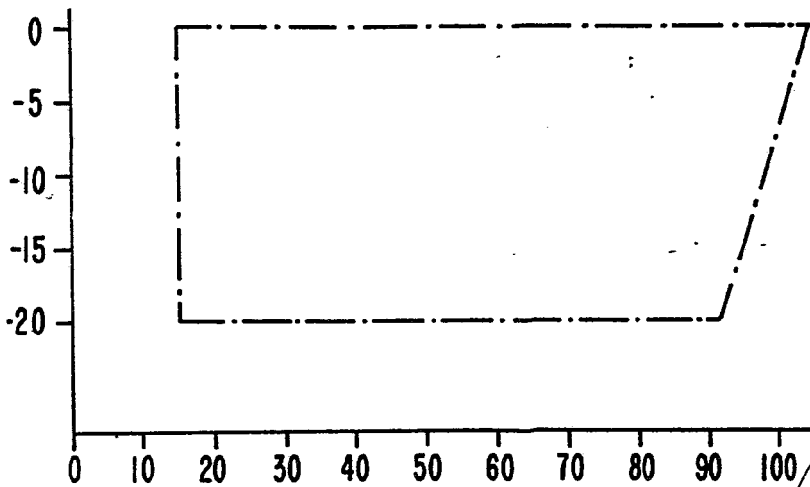
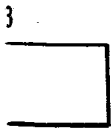
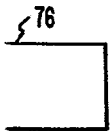


FIG. 5

ESCALA VARIABLE
Madrid, 18 Enero 1978
BERNARDO UNGRIA

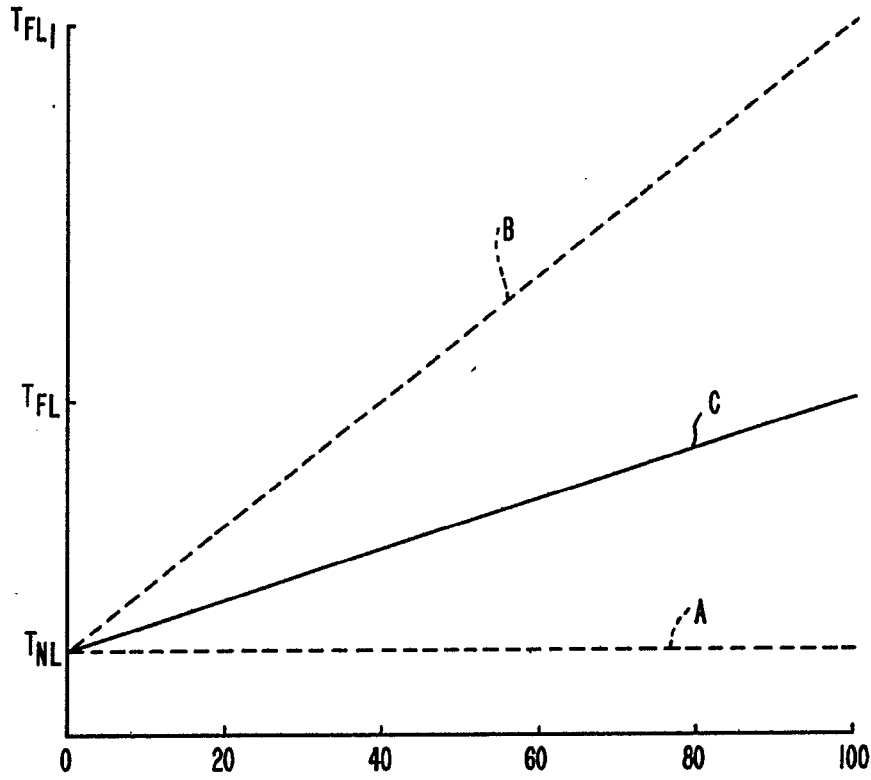


FIG. 6

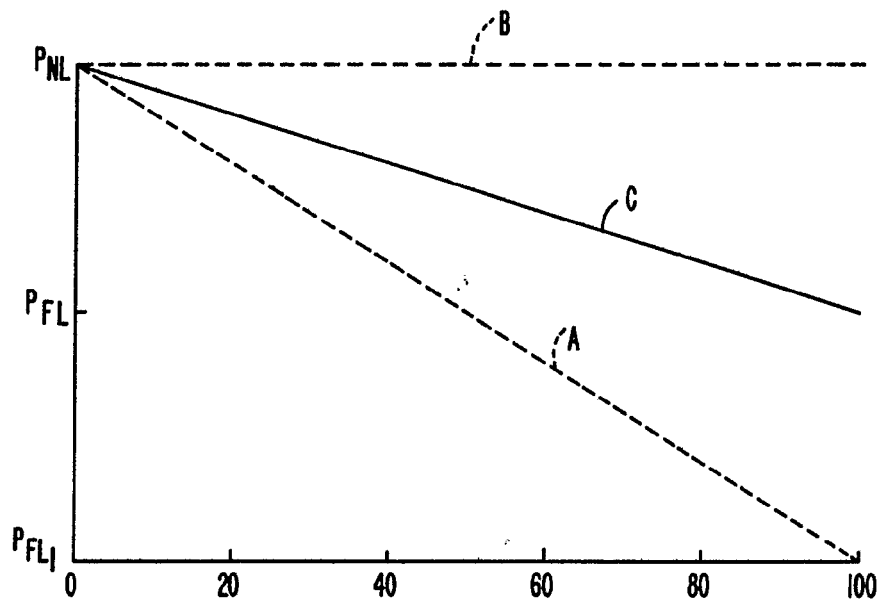


FIG. 7

ESCALA VARIABLE
Madrid, 18 Enero 1928
BERNARDO GARCIA
p.p.

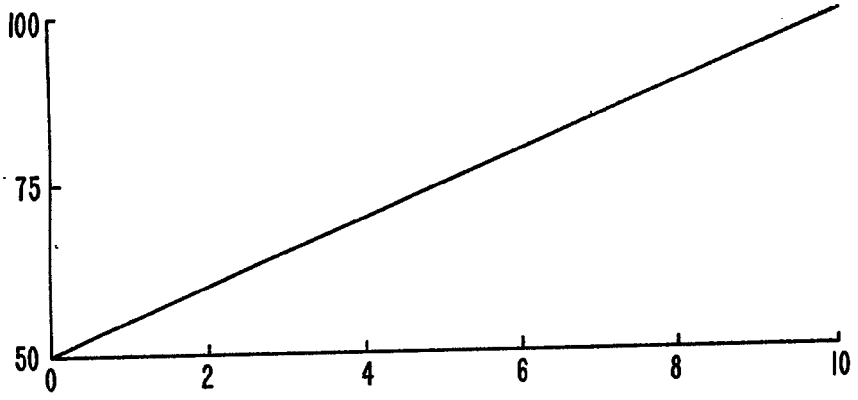


FIG. 8

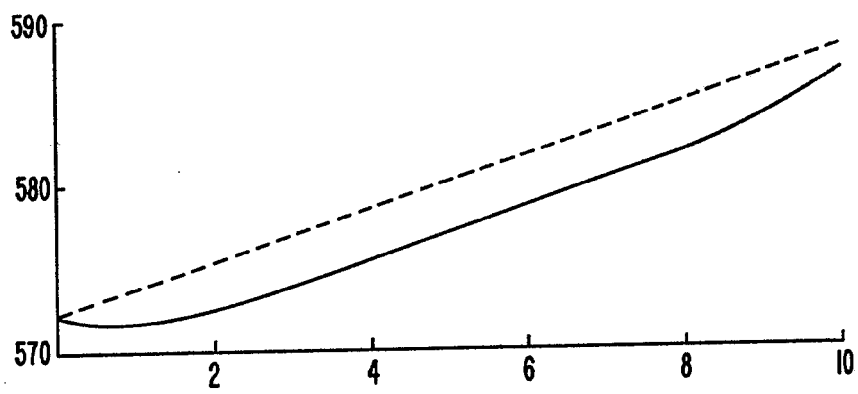


FIG. 9



FIG. 10

ESCALA VARIABLE
Madrid, 18 Enero de 1.978
BERNARDO VIGORÍA
P.P.

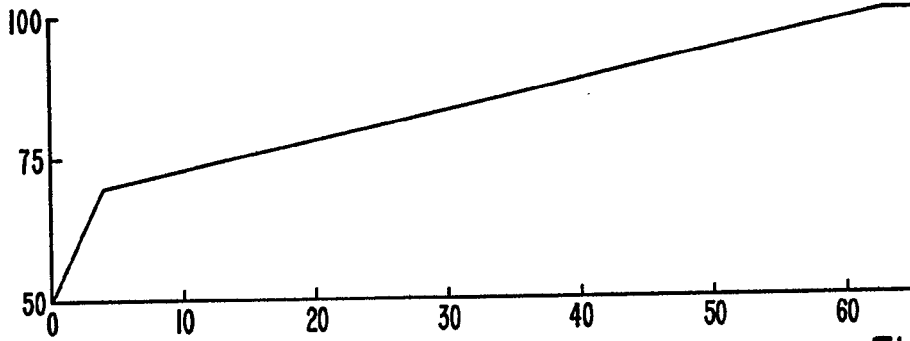


FIG. 11

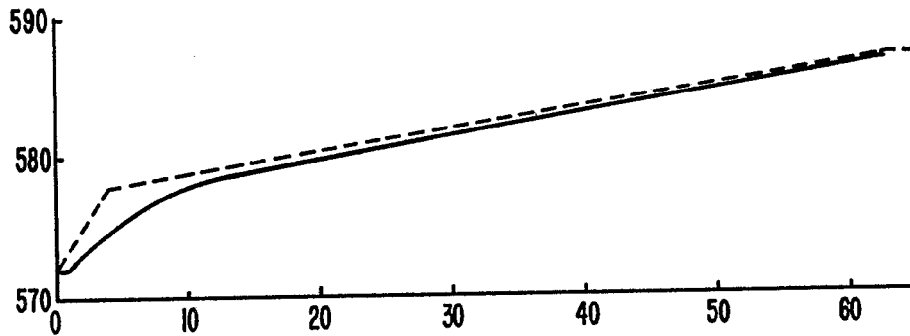


FIG. 12

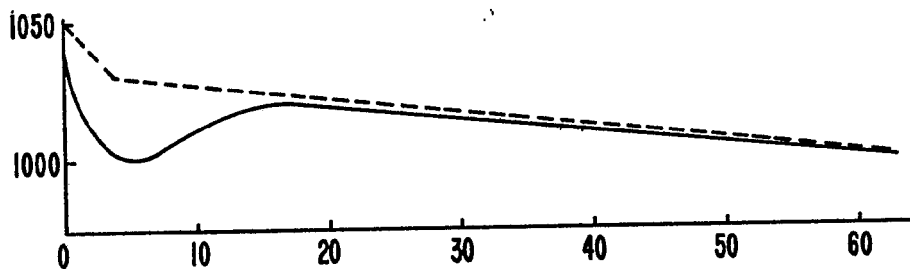


FIG. 13

ESCALA VARIABLE
Madrid, 18 Enero 1978
BERNARDO UNGELIA
P.P.

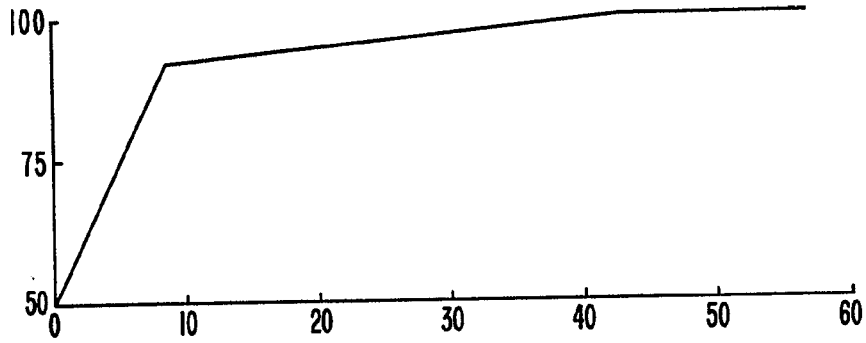


FIG. 14

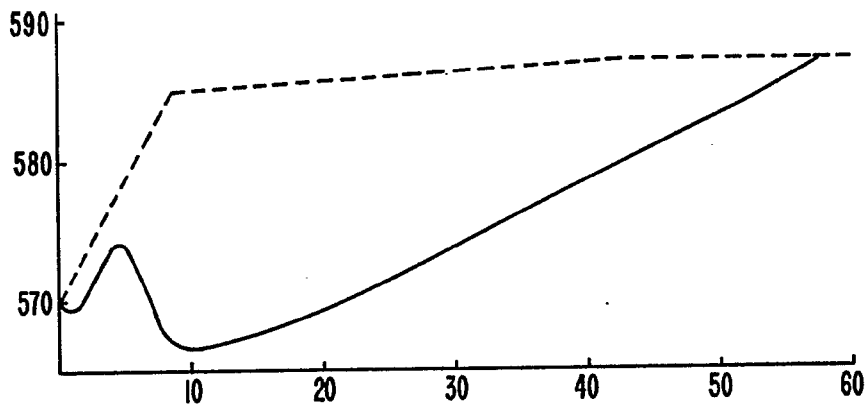


FIG. 15

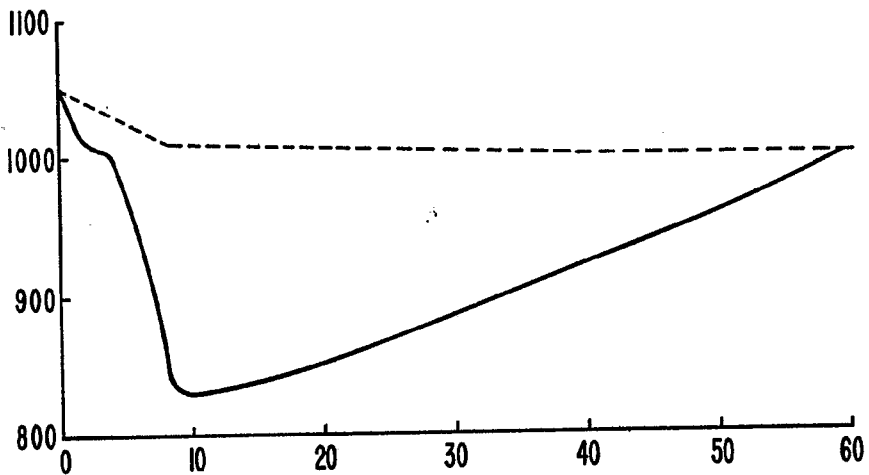


FIG. 16

ESCALA VARIABLE
Madrid, 18 Enero de 1.978
BERNARDO ANGRIÁ
P.P.