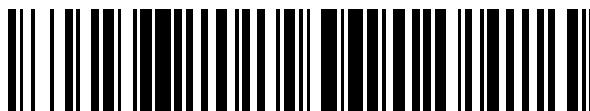


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 550 931**

51 Int. Cl.:

G21C 17/022 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.12.2007** **E 07872437 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.08.2015** **EP 2104939**

54 Título: **Procedimiento de estimación de la concentración de un elemento químico en el líquido de refrigeración primario de un reactor nuclear**

30 Prioridad:

26.12.2006 FR 0611383

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

13.11.2015

73 Titular/es:

**AREVA NP (100.0%)
Tour Areva, 1 Place de la Coupole
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

VERNERET, CLAUDE

74 Agente/Representante:

PONTI SALES, Adelaida

ES 2 550 931 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento de estimación de la concentración de un elemento químico en el líquido de refrigeración primario de un reactor nuclear

5

[0001] La invención se refiere en general a procedimientos para la estimación de la concentración de un elemento químico en el líquido de refrigeración primario de un reactor nuclear, en particular, de boro (ver también US 4204259).

10 **[0002]** Más específicamente, la invención se refiere a un procedimiento para estimar la concentración C de un elemento químico en el líquido de refrigeración primario de un reactor nuclear, según lo definido en el preámbulo de la reivindicación 1.

15 **[0003]** En los reactores nucleares en los que el líquido de refrigeración primario es esencialmente agua como, por ejemplo, en reactores de agua a presión, la reactividad del núcleo del reactor se controla entre otras cosas mediante la adición de boro en el líquido de refrigeración primario. El boro es un veneno de neutrones que absorbe una parte del flujo de neutrones generado por las reacciones nucleares en el núcleo del reactor. Así, cuando aumenta la concentración de boro en el líquido primario, la potencia térmica liberada por el núcleo del reactor disminuye. A la inversa, cuando disminuye la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario, aumenta la potencia térmica liberada por el núcleo del reactor.

20 **[0004]** La concentración de boro en el líquido de refrigeración primario se ajusta, automáticamente o manualmente, en función de las instrucciones de control del reactor, por ejemplo en relación con el ajuste de la potencia eléctrica que debe proporcionar el reactor a la red eléctrica de alta tensión.

25

[0005] Con este objeto, el reactor está provisto de un circuito conocido como el REA. Este circuito comprende medios para la inyección en el líquido de refrigeración primario de una solución que contiene esencialmente agua y que no contiene boro con el objetivo de ajustar a la baja la concentración de boro en el líquido primario. El circuito REA también cuenta con medios para inyectar una solución concentrada que contiene 7000 ppm de boro en el líquido de refrigeración primario con el fin de ajustar al alza la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario. En ambos casos, el volumen de líquido de refrigeración primario se mantiene constante mediante la eliminación del circuito primario de un volumen de líquido correspondiente al volumen inyectado.

30 **[0006]** Por lo tanto, para el control del reactor nuclear es muy importante conocer la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario en todo momento.

[0007] Con este objeto, el reactor está provisto de uno o más sensores (borímetros) diseñados para medir la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario.

40 **[0008]** La concentración de boro en el líquido de refrigeración primario medida automáticamente por el borímetro es inexacta (ruido del orden del 7 %) y se proporciona con una demora significativa, de cerca de unos veinte minutos.

45 **[0009]** Con el fin de superar la demora de la medición, la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario se podría estimar mediante la integración de los caudales de agua y de solución concentrada inyectados en el líquido de refrigeración primario a través del REA. Estos caudales producen variaciones en la concentración de boro.

50 **[0010]** El método de la integración de los caudales se basa en las siguientes ecuaciones.

[0011] La variación dC en la concentración de boro C del líquido de refrigeración primario para una masa constante de líquido de refrigeración primario M es causada por la inyección de una carga de líquido que tiene una concentración C* de boro (solución concentrada de boro o agua) y mediante la eliminación simultánea de una carga de líquido de refrigeración primario de concentración C. Por tanto, el equilibrio de masas se escribe de este modo:

55

$$M \, dC = C^* \, dm - C \, dm$$

donde dm es la masa de la carga tanto de líquido inyectado como de líquido de refrigeración primario retirado,

siendo $C^* = 0$ ppm para una dilución y $C^* = 7.000$ ppm para una inyección de una solución concentrada de boro.

[0012] Si se supone que los caudales de inyección y de retirada son constantes e iguales, el equilibrio se convierte en:

$$M \, dC = (C^* - C) q \, dt$$

donde q es el caudal de inyección/de retirada y dt es un intervalo de tiempo.

[0013] Al integrar obtenemos:

$$\ln(C(t) - C^*) = \ln(C(0) - C^*) - \frac{q}{M} t$$

donde $C(0)$ es la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario en $t = 0$

$$C(t) = C^* + (C(0) - C^*) e^{-\frac{q}{M} t}$$

o, del mismo modo, $(C^* - C(t)) = (C^* - C(0)) e^{-\frac{q}{Vol} t}$ si q ya no es un caudal de masa, sino un caudal de volumen, donde Vol es el volumen de líquido de refrigeración primario.

[0014] Este procedimiento tiene la ventaja de que permite realizar una estimación rápida de la variación en la concentración de boro al terminar la acción de dilución o inyección de una solución concentrada de boro (adición de boro). Al no tener en cuenta las demoras, relacionadas con la duración del recorrido de la carga a través del circuito primario y el tiempo necesario para que la carga inyectada se diluya y que la concentración de boro se homogeneice en el líquido de refrigeración primario, se adelanta la estimación de la concentración de boro unos diez minutos.

[0015] Las ecuaciones anteriores se pueden utilizar para simular diferentes tipos de acción (dilución o adición de boro) para un caudal de inyección constante, y también para simular una situación estacionaria (sin inyección). Estas proporcionan la concentración final (después de la acción) a partir de una concentración inicial (antes de la acción). Por tanto, es necesario actualizar la concentración de partida $C(0)$ antes de cada acción, lo que permite tomar un enfoque iterativo.

[0016] En este enfoque iterativo, a cada paso de tiempo k se le aplica la siguiente ecuación:

$$(C^* - C_{k+1}) = (C^* - C_k) e^{-\frac{q}{Vol} \Delta t}$$

donde C_k es la estimación de la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario en el paso k , y C^* se elige para que sea 0 o 7000 ppm, al igual que previamente, en función de si la acción en curso es la dilución o la adición de boro. Δt es la duración de un paso de tiempo.

[0017] La primera desventaja del procedimiento de integración de los caudales es que, a la larga, se produce una desviación en el valor estimado con respecto al valor real (véase, por ejemplo, la figura 2). Esta desviación surge de errores acumulados en cada paso de tiempo debidos, por ejemplo, a la diferencia entre el caudal q utilizado por las ecuaciones y el caudal de inyección real.

[0018] La segunda desventaja surge de la etapa de inicialización, necesaria para un procedimiento iterativo de este tipo. La inicialización debe ser lo más precisa posible, de lo contrario, los resultados se falsearán en cada paso de tiempo. Se puede realizar eligiendo como valor inicial C_0 para la concentración de boro en el líquido primario un promedio de las mediciones tomadas por el borímetro durante un período determinado. En el caso de las figuras 2 y de la 4 a la 6, el procedimiento iterativo (curva) ha sido inicializado usando la media de los valores encontrados durante las cuatro horas anteriores al inicio del procedimiento. Sin embargo, en este caso es imposible tener la certeza de que la media obtenida representa la concentración real de boro en el momento en que comenzó el

procedimiento iterativo. La inicialización también puede llevarse a cabo tomando como valor inicial la concentración de boro medida por determinación química, que es precisa, aunque tediosa y no muy rápida.

[0019] En cualquier caso, la suma de estas dos desventajas convierte a este procedimiento en poco fiable.

[0020] Además, el procedimiento por integración de los caudales ignora otras fuentes de variación en la concentración de boro, tales como la inyección de fluido en el circuito primario procedente del presurizador, el tanque de RCV, los filtros de desmineralización, etc.

[0021] En este contexto, la intención de la invención es proporcionar un procedimiento de estimación que sea más robusto que el procedimiento de integración de los caudales.

[0022] Con este objeto, la invención se refiere a un procedimiento de estimación de acuerdo con la reivindicación 1.

[0023] El procedimiento también puede tener una o más de las siguientes características dependientes, consideradas individualmente o en todas las combinaciones técnicamente posibles.

[0024] Otras características y ventajas se comprenderán a partir de la descripción detallada proporcionada a continuación a modo de indicación y sin ser de ninguna manera restrictiva, con referencia a las figuras adjuntas, entre las cuales:

- la figura 1 es un diagrama de bloques que muestra las principales etapas del procedimiento de la invención;

- la figura 2 es una representación gráfica que muestra el cambio en la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario a lo largo de un día, expresado en ppm (escala izquierda), medida mediante el borímetro (curva 1), estimada por el procedimiento de integración de los caudales (curva 2), y estimada por el procedimiento de la invención (curva 3); la figura también muestra la evolución de los caudales de inyección de agua (curva 4) y de solución concentrada de boro (curva 5) durante el transcurso del día, expresados en metros cúbicos por hora (escala derecha);

- la figura 3 es una representación gráfica similar a la de la figura 2, que muestra la evolución en la concentración de boro del líquido de refrigeración primario, estimada utilizando el procedimiento de la invención inicializado normalmente con la primera medición del borímetro (curva 3), que se estima mediante el procedimiento de la invención inicializado con un valor aberrante de 500 ppm (curva 3) y estimado por el procedimiento de integración de los caudales inicializado mediante la primera medición del borímetro (curva 2), y

- las figuras de la 4 a la 6 son representaciones gráficas similares a la de la figura 2 y muestran la evolución en la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario y los caudales inyectados durante tres períodos de un mes de duración, en una situación real de funcionamiento de una central nuclear.

[0025] El procedimiento representado esquemáticamente en la figura 1 está destinado a estimar la concentración de boro C en el líquido de refrigeración primario de un reactor nuclear.

[0026] Este reactor, como se describió anteriormente, comprende medios para la inyección en el líquido de refrigeración primario de una solución de dilución que tiene una concentración del elemento químico mencionado que está por debajo de un límite predeterminado, medios para inyectar en el líquido de refrigeración una solución concentrada del elemento químico mencionado con una concentración predeterminada C^* , y un sensor capaz de medir una cantidad C_m representativa de la concentración del elemento químico mencionado en el líquido de refrigeración primario.

[0027] Los medios de inyección comprenden el circuito REA del reactor, que es capaz de inyectar agua sin contenido de boro (solución de dilución) o una solución concentrada, por ejemplo a una concentración C^* de 7000 ppm de boro. El circuito REA es conocido y no se describirá aquí.

[0028] El procedimiento es un procedimiento iterativo que comprende:

- una etapa de inicialización;

a continuación, de modo repetido, en cada paso de tiempo k:

- una etapa de adquisición de una cantidad q_{dk} que representa el caudal de inyección de la solución concentrada en el paso k, una cantidad q_{ck} que representa el caudal inyectado de solución concentrada en el paso k, y una cantidad C_{mk} que representa la concentración de boro medida por el sensor en el líquido de refrigeración primario;

- una etapa de cálculo de un valor estimado C_{ek+1} de la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario en el paso $k+1$ en función de las cantidades representativas q_{dk} , q_{ck} , C_{mk} adquiridas en la etapa k.

[0029] Durante la etapa de inicialización, se selecciona un valor inicial estimado C_{e0} de la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario. Este valor se calcula directamente a partir de la cantidad C_{m0} que representa la concentración del elemento químico mencionado medida por el sensor en el momento de iniciar el procedimiento iterativo o inmediatamente antes del mismo. Este valor se calcula utilizando una sola medición realizada por el sensor, y no se trata de la media de varias mediciones realizadas por el sensor en diferentes instantes. El cálculo de C_{e0} no implica la medición de las cantidades que representan los caudales de inyección de solución de dilución o de solución concentrada.

[0030] La etapa de adquisición se realiza utilizando uno o más sensores de caudal en el circuito REA y mediante el borímetro.

[0031] La etapa de cálculo se lleva a cabo con la ayuda de las ecuaciones de Kalman.

[0032] El filtrado de Kalman es un procedimiento de modelado conocido y, a continuación, solo mencionaremos algunos elementos teóricos. La aplicación del filtrado de Kalman para la estimación de la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario se detalla a continuación.

[0033] El filtro de Kalman está diseñado para modelar el estado de un procedimiento que se caracteriza por un vector de estado x . Se basa en las dos siguientes ecuaciones.

$$\text{Ecuación de evolución del vector de estado: } x_{k+1} = A x_k + B u_k + w_k$$

$$\text{Ecuación de observación: } y_k = D x_k + v_k.$$

[0034] La ecuación de evolución en el vector de estado corresponde al modelado del procedimiento, donde u es un control y w es un ruido (ruido de modelado y/o ruido de control). El vector de estado x del procedimiento es la cantidad que se busca estimar. Puede tener una o más dimensiones, en las que cada coordenada del vector correspondiente a un parámetro característico del procedimiento.

[0035] El vector de medición y es una función de estado x y del ruido de medición v . y tiene la misma dimensión que x .

[0036] A , B y D son matrices cuadradas que tienen la misma dimensión que x .

[0037] El filtro de Kalman hace que sea posible ponderar la información a priori, obtenida en los controles anteriores con las mediciones realizadas durante el funcionamiento y disponibles en un momento determinado. Esta ponderación es óptima si los ruidos v y w , que se supone que son independientes, de media de cero y covarianza conocidas, son gaussianos. Sirve para reducir al mínimo la previsión matemática de error entre el estado y su estimación.

[0038] Las ecuaciones de filtro de Kalman para el estado discreto son las siguientes.

[0039] En el texto a continuación, $x_{k|k}$ representa la mejor estimación de x_k obtenida a partir de los datos disponibles en el paso k, es decir, antes de que esté disponible la medición y_{k+1} . Del mismo modo, $x_{k+1|k}$ e $y_{k+1|k}$ representan las mejores estimaciones de x_{k+1} e y_{k+1} que pueden obtenerse a partir de los datos disponibles en el paso k, es decir, antes de que esté disponible la medición y_{k+1} .

La ecuación de estado da: $\underline{x}_{k+1|k} = A \underline{x}_{k|k} + B u_k$.

El error de estimación viene dado por: $\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_{k+1|k} = A [\underline{x}_k - \underline{x}_{k|k}] + w_k$.

[0040] La matriz de covarianza del error de estimación $\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_{k+1|k}$ se representa mediante $P_{k+1|k}$. El ruido w , de matriz de covarianza W , siendo independiente de la estimación, tenemos:

$$P_{k+1|k} = A P_{k|k} A^T + W$$

[0041] De la ecuación de observación podemos deducir incluso la medición predicha $y_{k+1|k}$ y la matriz de covarianza del error asociado $Q_{k+1|k}$:

$$\underline{y}_{k+1|k} = D \underline{x}_{k+1|k}$$

$$Q_{k+1|k} = D P_{k+1|k} D^T + V$$

donde V es la matriz de covarianza del ruido v .

[0042] Una vez que se conoce la medición y_{k+1} , obtenemos

$$\underline{x}_{k+1|k+1} = \underline{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \underline{y}_{k+1|k}),$$

ya sea:

$$\underline{x}_{k+1|k+1} = \underline{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - D \underline{x}_{k+1|k})$$

con

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} D^T (D P_{k+1|k} D^T + V)^{-1}$$

de donde se deduce la expresión de la matriz de covarianza del error de estimación:

$$P_{k+1|k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} D P_{k+1|k},$$

ya sea:

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} D) P_{k+1|k}$$

donde I es la matriz identidad.

[0043] En resumen, las ecuaciones de Kalman son las siguientes: Ecuaciones de predicción:

$$\underline{x}_{k+1|k} = A \underline{x}_{k|k} + B u_k$$

$$P_{k+1|k} = A P_{k|k} A^T + W$$

Ecuaciones de filtrado:

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} D^T (D P_{k+1|k} D^T + V)^{-1}$$

$$\underline{x}_{k+1|k+1} = \underline{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - D \underline{x}_{k+1|k})$$

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} D) P_{k+1|k}$$

[0044] A continuación se describe la aplicación de estas ecuaciones para la estimación de la concentración de boro en el líquido de refrigeración primario.

5

[0045] El parámetro de estado y el parámetro de medición tenidos en cuenta para la aplicación de las ecuaciones de Kalman varían en función de si la carga inyectada en el circuito primario es de agua o de solución concentrada de boro, o también si no se inyecta nada, como se indica en la tabla incluida a continuación. En la práctica se hace una distinción entre dos casos, la conmutación entre las dos formas del parámetro de estado y entre las dos formas del parámetro de medición que tiene lugar de acuerdo con el caudal de solución concentrada.

10

[0046] El parámetro de medición se obtiene directamente a partir de la concentración de boro medida por el borímetro, $y = \ln(C_m)$ (dilución) o $y = \ln(C^* - C_m)$ (adición de boro). El valor C^* considerado en las fórmulas para los parámetros de estado y de medición (si el caudal de solución concentrada no es cero) corresponde a la concentración de boro de la solución concentrada.

15

	Parámetro de estado x	Parámetro de medición y
Caudal de solución concentrada cero	$x = \ln(C(t))$	$y = \ln(C_m)$
Caudal de solución concentrada distinto de cero	$x = \ln(C^* - C(t))$	$y = \ln(C^* - C_m)$

[0047] Las ecuaciones de Kalman, adaptadas para estimar la concentración de boro, son en forma de escala y se convierten en:

20

• Ecuaciones de predicción:

$$\underline{x}_{k+1|k} = \underline{x}_{k|k} + u_k$$

con $u_k = - (\Delta t_k / Vol) q_k$, donde Δt_k es la duración del paso k de tiempo, que se considera que es constante, y q_k es el caudal de inyección en el instante k, y q_k se considera que es igual a q_{dk} cuando el flujo de solución concentrada es cero, y siendo llevados para ser igual a q_{ck} cuando el caudal de solución concentrada es distinto de cero.

25

$$P_{k+1|k} = P_{k|k} + W$$

30 donde P es la varianza del parámetro de estado x, y W es la varianza del ruido w.

• Ecuaciones de filtrado:

$$\underline{x}_{k+1|k+1} = \underline{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \underline{x}_{k+1|k})$$

35

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1}) P_{k+1|k}$$

con $K_{k+1} = P_{k+1|k} / (P_{k+1|k} + V)$, donde V es la varianza del ruido v.

40 [0048] Como muestra la figura 1, para cada paso k, la etapa de cálculo comprende una subetapa en la que se da forma a los parámetros de estado y de medición, seguida de otra subetapa de cálculo. Durante la subetapa de conformación, la forma de los parámetros de estado y medición se selecciona primero en función del valor

representativo del caudal de solución concentrada obtenido en la etapa de adquisición. Después, aún dentro de la subetapa de conformación, los valores iniciales de los parámetros de estado y de medición que deben tenerse en cuenta en la subetapa de cálculo se calculan a partir de los valores finales obtenidos en el paso k-1. Si la forma de los parámetros de estado y medición es la misma en el paso k y en el paso k-1, los valores iniciales de estos parámetros para el paso k son los mismos que los valores finales obtenidos en el paso k-1. Por el contrario, si las formas de los parámetros de estado y medición difieren entre el paso k y el paso k-1, los valores finales de estos obtenidos en la etapa k-1 han de someterse a una conversión con el fin de obtener los valores iniciales que deben considerarse para la etapa k.

10 **[0049]** Las dos subetapas de la etapa de cálculo se llevan a cabo utilizando el mismo microprocesador.

[0050] Se han comparado los rendimientos del procedimiento de estimación mediante filtrado Kalman y los otros procedimientos mencionados anteriormente (medición directa e integración de caudales) mediante tres transcurso del ciclo 13 de la central nuclear francesa Cattenom 1, durante períodos de un mes con el propósito de estimar una posible desviación: noviembre de 2003 para el comienzo del ciclo (figura 4), enero de 2004 para la mitad del ciclo (figura 5) y diciembre de 2004 para el final del ciclo (figura 6). Los rendimientos comparados de la reproducción a corto plazo de las acciones de adición de boro y de dilución se evaluaron durante una jornada encargada, el 30 de noviembre de 2003, de nuevo en la central nuclear de Cattenom 1 (figura 2).

20 **[0051]** Como muestran las figuras 2 y de 4 a 6, el uso combinado de la información de control (caudales de inyección) y las mediciones de la concentración de boro hace posible aunar las ventajas del procedimiento por integración de los caudales y del procedimiento que utiliza directamente los valores leídos por los borímetros. El ajuste adecuado de la relación V/W permite ajustar los pesos respectivos del control y de la medición.

25 **[0052]** La relación V/W se elige generalmente entre 100 y 10.000, preferiblemente entre 1000 y 5000, e incluso mejor alrededor de 2000. Un aumento de la relación V/W da preferencia al control sobre la medición. Por lo tanto, se puede utilizar para seguir fielmente las inyecciones de agua o de solución concentrada de boro, pero puede producir estimaciones más alejadas del valor medido. Por el contrario, una disminución de la relación V/W da preferencia a la medición sobre el control. Proporciona estimaciones que están más próximas a la medición, pero sigue la inyección de agua o de solución concentrada de boro con una mayor demora.

[0053] Como en el caso del procedimiento de integración de flujo, la concentración de boro estimado por filtrado de Kalman sigue rápidamente los cambios en la concentración de boro debido a las acciones de adición de boro y de dilución. En las figuras 2 y de 4 a 6, se constata que, tras las variaciones en la concentración de boro como resultado de la inyección de agua o de boro, el filtro de Kalman sigue de cerca, a corto plazo, el procedimiento de integración de los caudales. Y es en ese sentido donde se obtiene el beneficio, en la reducción de la demora en la medición de la concentración de boro.

[0054] En un plazo mayor, el filtro de Kalman hace un seguimiento de los valores medidos, siempre que las inyecciones de agua o solución de boro concentrado sean espaciadas. No hay, pues, desviación a largo plazo como en el procedimiento de integración de los caudales (véase, por ejemplo, los últimos días de la figura 5), ya que el filtro de Kalman se aplaza con respecto al valor medido. El problema de la demora en la medición de la concentración de boro real también se suprime, porque la medición solo se tiene realmente en cuenta cuando no hay ningún cambio rápido en la concentración de boro debido al control (inyecciones procedente del REA).

45 **[0055]** A diferencia del procedimiento de integración, este procedimiento hace posible observar las variaciones en la concentración de boro que no son directamente debidas a la inyección de cargas procedentes del REA, porque las mediciones se tienen en cuenta, pero con el retraso inherente en la medición si las variaciones son rápidas.

50 **[0056]** Además, no hay absolutamente ninguna necesidad de introducir una concentración inicial precisa de boro en la fase de inicialización. El filtro de Kalman se encarga, a partir de un valor inicial cualquiera, de recuperar la concentración de boro con ayuda de la medición en unos momentos. Sin embargo, cuanto más preciso sea el valor inicial, más rápidamente alcanzará la concentración de boro estimada el valor que habría tenido con una inicialización precisa. A modo de ejemplo, con una diferencia inicial de 100 ppm, la discrepancia es menor que 1 ppm después de 25 minutos. La figura 3 ilustra el comportamiento del filtro de Kalman con una inicialización aberrante de 500 ppm (curva 3 ') en lugar de aproximadamente 1.075 ppm (curva 3 correspondiente a la inicialización utilizando la concentración medida por el boro). Las curvas 3 y 3' convergen rápidamente y se superponen en menos de tres horas después de la inicialización. El hecho de tomar como valor inicial el primer valor de la concentración de boro medida por el borímetro (como en el caso de la curva 3), se trata de un método de

inicialización práctico que produce una discrepancia inicial pequeña con respecto a la verdadera concentración (del orden de 25 ppm como máximo) y una convergencia muy rápida.

[0057] Asimismo, el procedimiento del filtro de Kalman da lugar a una importante reducción del ruido en comparación con únicamente la medición (reducción de un factor 10 en 24 horas de estabilidad en noviembre de 2003, en la figura 4).

[0058] Con el fin de mejorar la precisión de la modelización a corto plazo, se pueden tener en cuenta las demoras (del orden de unos diez minutos) debidas al tiempo necesario para la homogeneización de la carga inyectada en el líquido de refrigeración primario y al tiempo de recorrido de la carga inyectada a través del circuito primario. El tiempo de recorrido puede traducirse en un lapso de unos pocos minutos (retraso puro) sobre los caudales de inyección. Asimismo, la introducción de una constante de tiempo (filtrado de primer orden de los caudales) permite simular los efectos de homogeneización de la carga inyectada en el circuito primario. Estas mejoras solo son útiles para aumentar la precisión de la concentración de boro estimada en términos de unos pocos minutos tras las inyecciones.

[0059] También es posible tener en cuenta el volumen muerto que queda en la tubería de inyección del REA al final de cada inyección. De hecho, las cargas de agua y de solución concentrada de boro pasan a través de la misma tubería de inyección. Además, las cargas no se inyectan jamás en su totalidad, ya que un pequeño volumen muerto permanece en el tubo tras la inyección. Este volumen es de unos cien litros o menos. Cada nueva carga inyectada «empuja» en la tubería principal el volumen muerto restante de la carga anterior. Por tanto, el efecto de volumen muerto aparece cuando el REA inyecta sucesivamente dos cargas de distinta naturaleza, agua después de solución concentrada de boro y viceversa. Este efecto puede tenerse en cuenta en el modelado, considerando que, después de inyectar una carga de una naturaleza diferente de la anterior, la inyección de la carga anterior continúa mientras no se ha inyectado un volumen equivalente al volumen muerto. Sin añadir esto a la simulación, la concentración de boro estimada puede diferir temporalmente de la concentración real entre 3 y 8 ppm cuando termina la segunda inyección.

[0060] El uso de un filtro de Kalman, por tanto, hace posible reconstruir la verdadera concentración de boro a partir de los caudales de dilución y de adición de boro, pero también a partir de la medición de la concentración de boro, de manera muy satisfactoria.

[0061] Dado que la información sobre la concentración de boro en el circuito primario se obtiene sin demora y con ruido reducido, las aplicaciones en las que esta información se debe comparar con otra información pueden producirse más rápido y la comparación puede ser más ajustada. Así, por ejemplo, en un sistema de vigilancia que integre un modelo de cálculo de neutrones, la concentración de boro estimada se compara con la concentración de boro teórica calculada con el fin de comprobar el comportamiento del modelo de neutrones. La concentración de boro también se puede comparar con un umbral a fin de detectar los accidentes de reactividad, tales como la dilución intempestiva.

[0062] Además de esto, los cálculos de los volúmenes de agua o de solución concentrada de boro que deben inyectar los operadores basándose en la concentración de boro estimada serán más precisos. Es de esperar que el núcleo del reactor se podrá controlar mediante acciones más ajustadas, de manera que habrá menos inyecciones de cargas en el líquido de refrigeración primario y, por lo tanto, que el volumen de efluentes radiactivos producidos por estas inyecciones se reducirá.

[0063] Por otra parte, también se podrá reducir la utilización de la dosificación química por muestreo de líquido de refrigeración primario. Estas dosificaciones son particularmente largas. En particular, durante las pruebas periódicas, donde se requiere una medición precisa de la concentración de boro, el número de muestras que hay que tomar y analizar será más pequeño, lo que producirá un ahorro de tiempo apreciable.

[0064] El procedimiento descrito anteriormente puede tener muchas variantes.

[0065] El procedimiento puede aplicarse a la estimación de la concentración en el líquido de refrigeración primario de un reactor de un elemento químico distinto del boro.

[0066] El procedimiento puede aplicarse a cualquier tipo de reactor nuclear en el que se deba controlar la concentración de un elemento químico en el líquido de refrigeración primario, por inyección de una solución de dilución o de una solución concentrada de dicho elemento químico.

- [0067]** En el procedimiento, es posible considerar que las inyecciones de solución de dilución y de solución concentrada se efectúan con el mismo caudal predeterminado. En ese caso, la etapa de adquisición de cantidades representativas de los caudales de inyección de solución de dilución y de solución concentrada se limita simplemente a establecer en cada paso si hay en curso una inyección de solución de dilución procedente del circuito REA o no, y si hay en curso una inyección de solución concentrada procedente del circuito REA o no.
- [0068]** Del mismo modo, la duración de cada paso de tiempo Δt_k puede considerarse como constante o puede considerarse como variable.
- [0069]** La concentración C^* de la solución concentrada no es necesariamente igual a 7.000 ppm; puede ser diferente.
- [0070]** La etapa de inicialización del procedimiento puede llevarse a cabo de muchas maneras. Se puede llevar a cabo como se describe anteriormente, utilizando la primera medición realizada por el sensor, pero, de una manera no preferida, también puede llevarse a cabo teniendo en cuenta la media de las mediciones realizadas por el sensor durante un período determinado de tiempo, o incluso fijando arbitrariamente el valor de la concentración a un valor determinado.
- [0071]** La solución de dilución puede estar prácticamente desprovista del elemento químico, por ejemplo, agua técnicamente pura, o puede ser una solución que contenga una pequeña concentración del elemento químico en comparación con el líquido de refrigeración primario, por ejemplo, una concentración inferior a 100 ppm.
- [0072]** El cambio entre las dos formas de los parámetros de estado y de medición en la primera subetapa de cálculo puede llevarse a cabo no solo en función de si el caudal de solución concentrada es cero o no, sino más bien en función de que la cantidad de control de calidad representativa de este caudal sea o no inferior a un límite predeterminado. Este límite ha de ser bajo con respecto al caudal nominal de inyección de la solución concentrada.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de estimación de la concentración (C) de un elemento químico en el líquido de refrigeración primario de un reactor nuclear, siendo el elemento químico boro o un compuesto de boro, comprendiendo este reactor medios para inyectar en el líquido de refrigeración primario una solución de dilución de concentración en dicho elemento químico inferior a un límite de concentración predeterminado, medios para inyectar en el líquido de refrigeración primario una solución concentrada de dicho elemento químico de concentración predeterminada (C*), y un sensor capaz de medir una cantidad (C_m) representativa de la concentración de dicho elemento químico en el líquido de refrigeración primario, **caracterizado porque** el procedimiento es un procedimiento iterativo que comprende de manera repetida en cada paso de tiempo k:

- una etapa de adquisición de una cantidad (q_{dk}) representativa del caudal de inyección de la solución de dilución en el paso k, una cantidad q_{ck} representativa del caudal de inyección de la solución concentrada en el paso k, y una cantidad (C_{mk}) representativa de la concentración de dicho elemento químico medida por el sensor en el líquido de refrigeración primario;

- una etapa de cálculo de un valor estimado (C_{ek+1}) de la concentración de dicho elemento químico en el líquido de refrigeración primario en el paso k+1 en función de las cantidades representativas (q_{dk}, q_{ck}, C_{mk}) adquiridas en la etapa k, realizándose la etapa de cálculo con ayuda de las ecuaciones de Kalman, realizándose la etapa de cálculo de el paso k utilizando en las ecuaciones de Kalman un parámetro de estado x = ln(C) cuando la cantidad (q_{ck}) representativa del caudal de inyección de la solución concentrada es inferior a un límite de caudal predeterminado, y un parámetro de estado x = ln(C*-C) cuando la cantidad (q_{ck}) representativa del caudal de inyección de la solución concentrada es superior a dicho límite de caudal predeterminado.

2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** la etapa de cálculo en el paso k se realiza utilizando en las ecuaciones de Kalman un parámetro de medición y = ln(C_m) cuando la magnitud (q_{ck}) que representa el caudal de inyección de la solución concentrada es menor que dicho límite de caudal predeterminado, y un parámetro de estado y = ln(C*-C_m) cuando la magnitud (q_{ck}) que representa el caudal de inyección de la solución concentrada es superior a dicho límite caudal predeterminado.

3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, **caracterizado porque** las ecuaciones utilizadas en la etapa de cálculo son:

$$\underline{x}_{k+1/k} = \underline{x}_{k/k} + U_k$$

u_k = -(Δt_k/Vol) q_{dk} cuando la magnitud (q_{ck}) que representa el caudal de inyección de la solución concentrada en el paso k es inferior a dicho límite predeterminado del caudal

u_k = -(Δt_k/Vol) q_{ck} cuando la magnitud (q_{ck}) que representa el caudal de inyección de la solución concentrada en el paso k es superior a dicho límite predeterminado del caudal

$$P_{k+1/k} = P_{k/k} + W$$

$$\underline{x}_{k+1/k+1} = \underline{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \underline{x}_{k+1/k})$$

$$P_{k+1/k+1} = (1 - K_{k+1}) P_{k+1/k}$$

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} / (P_{k+1/k} + V)$$

donde $\underline{x}_{k/k}$ es el valor del parámetro de estado x en el paso k determinado a partir de los datos disponibles en el paso k; Δt_k es la duración del paso de tiempo k; Vol, el volumen del circuito primario; P_{k/k}, la varianza del parámetro de estado x en el paso k determinado a partir de los datos disponibles en el paso k; y W y V, las constantes

predeterminadas.

4. Procedimiento según la reivindicación 3, **caracterizado porque** la relación V/W está comprendida entre 100 y 10.000.

5

5. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** comprende una etapa de inicialización durante la cual un valor inicial estimado (C_{e0}) de la concentración de dicho elemento químico en el líquido primario se calcula directamente a partir de la cantidad (C_{m0}) representativa de la concentración de dicho elemento químico medida por el sensor de líquido de refrigeración primario.

10

6. Procedimiento de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado porque** el reactor nuclear es un reactor nuclear de agua a presión.

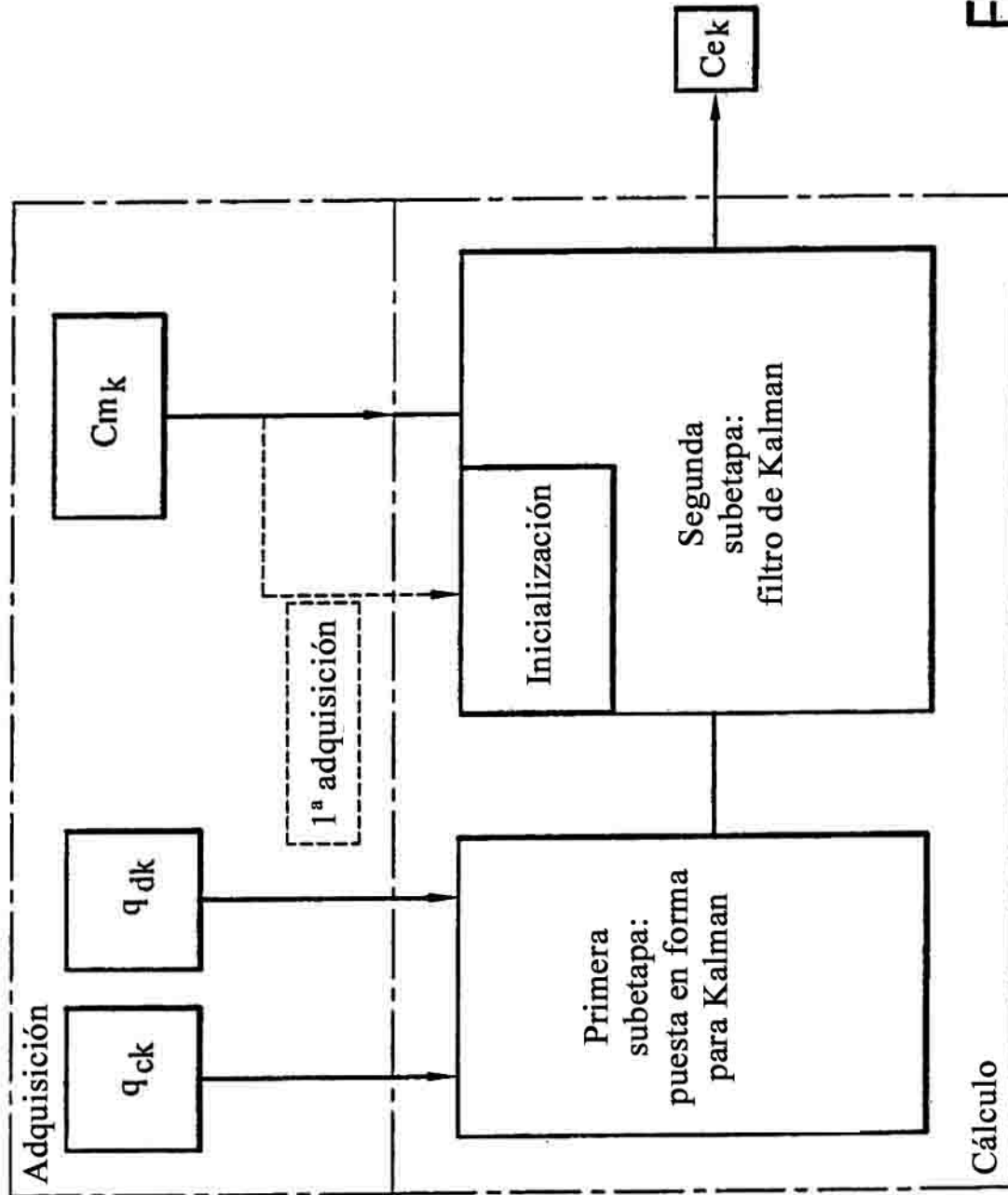
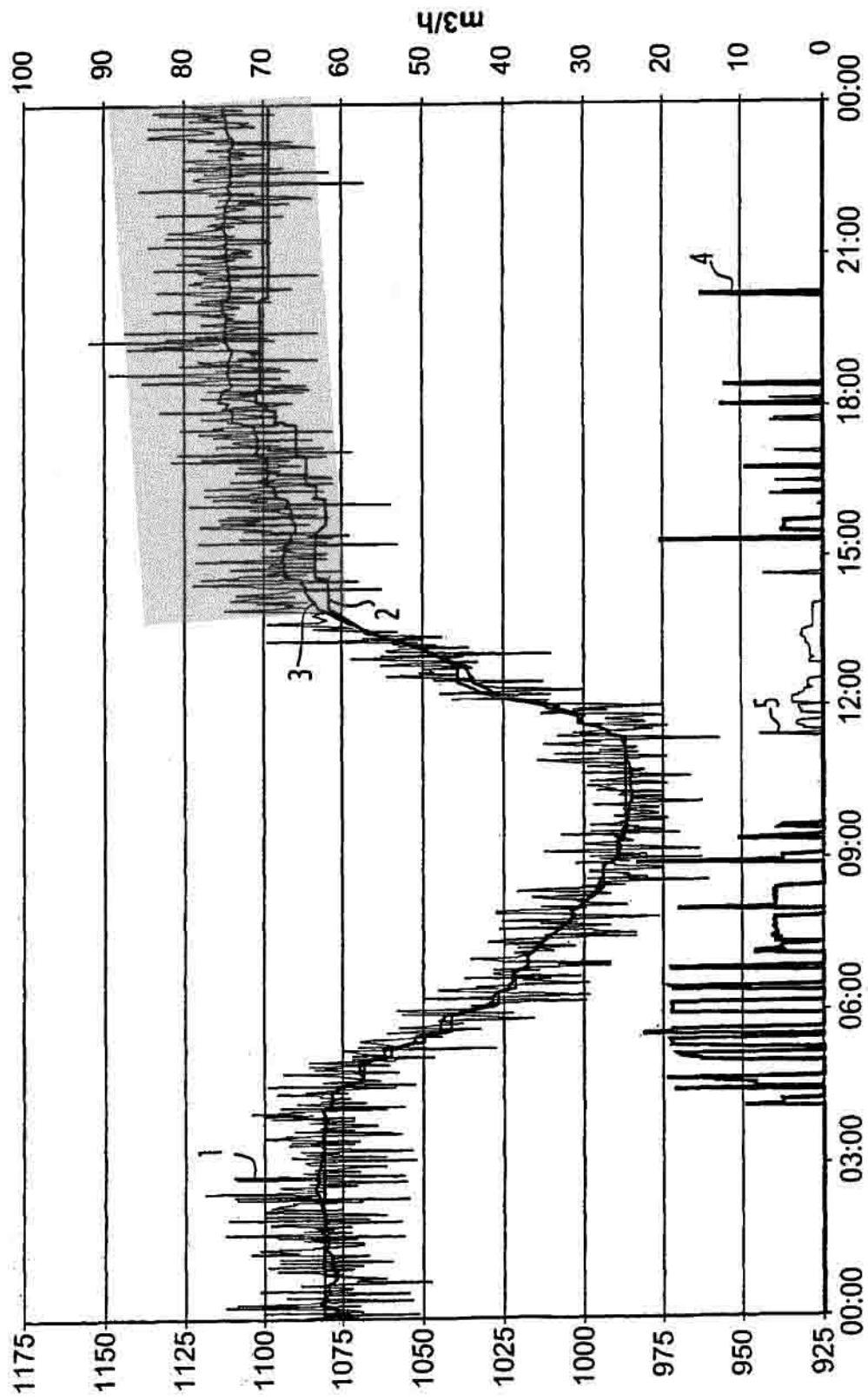
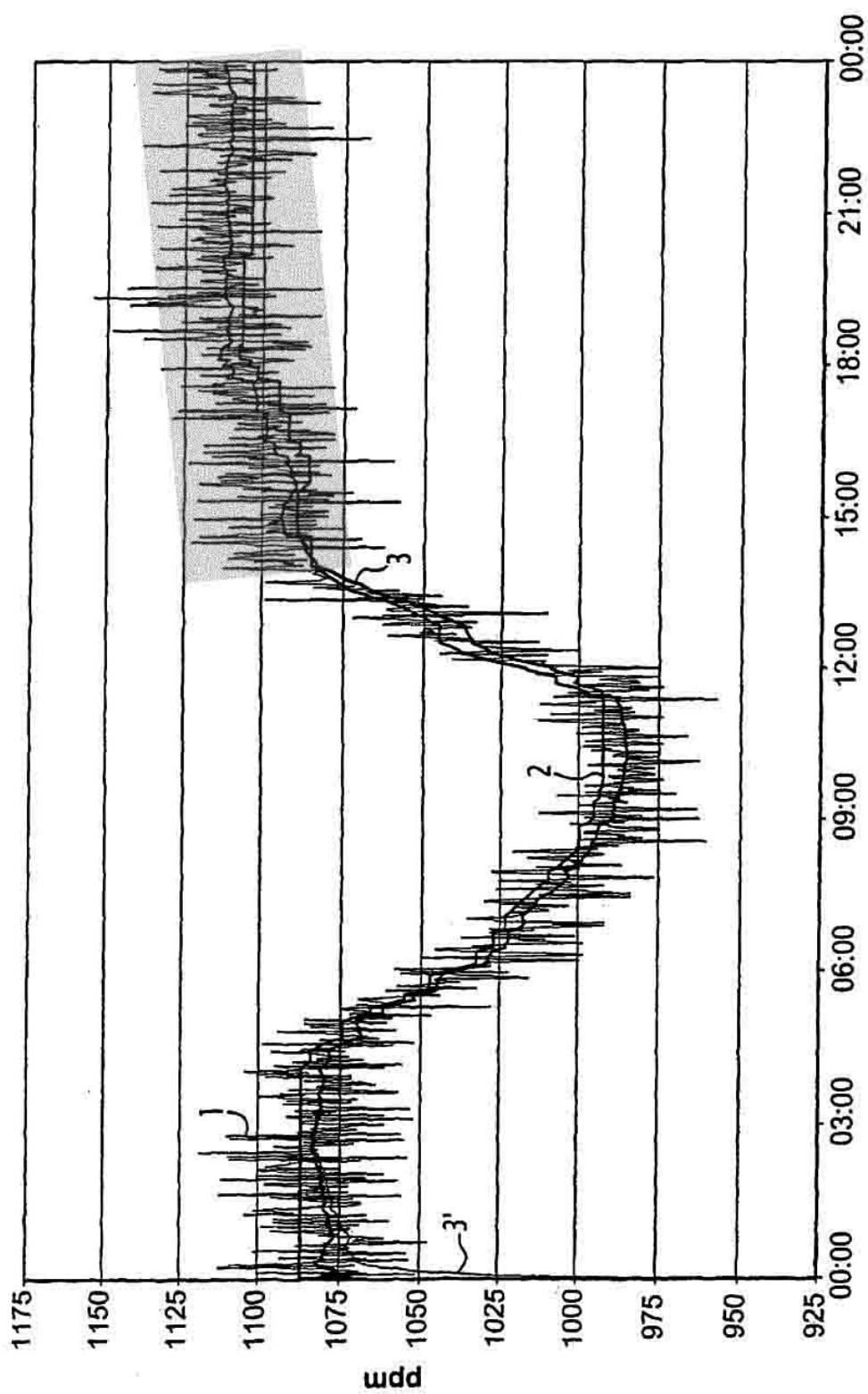


FIG.1



30 de noviembre de 2003

FIG.2



30 de noviembre de 2003

FIG.3

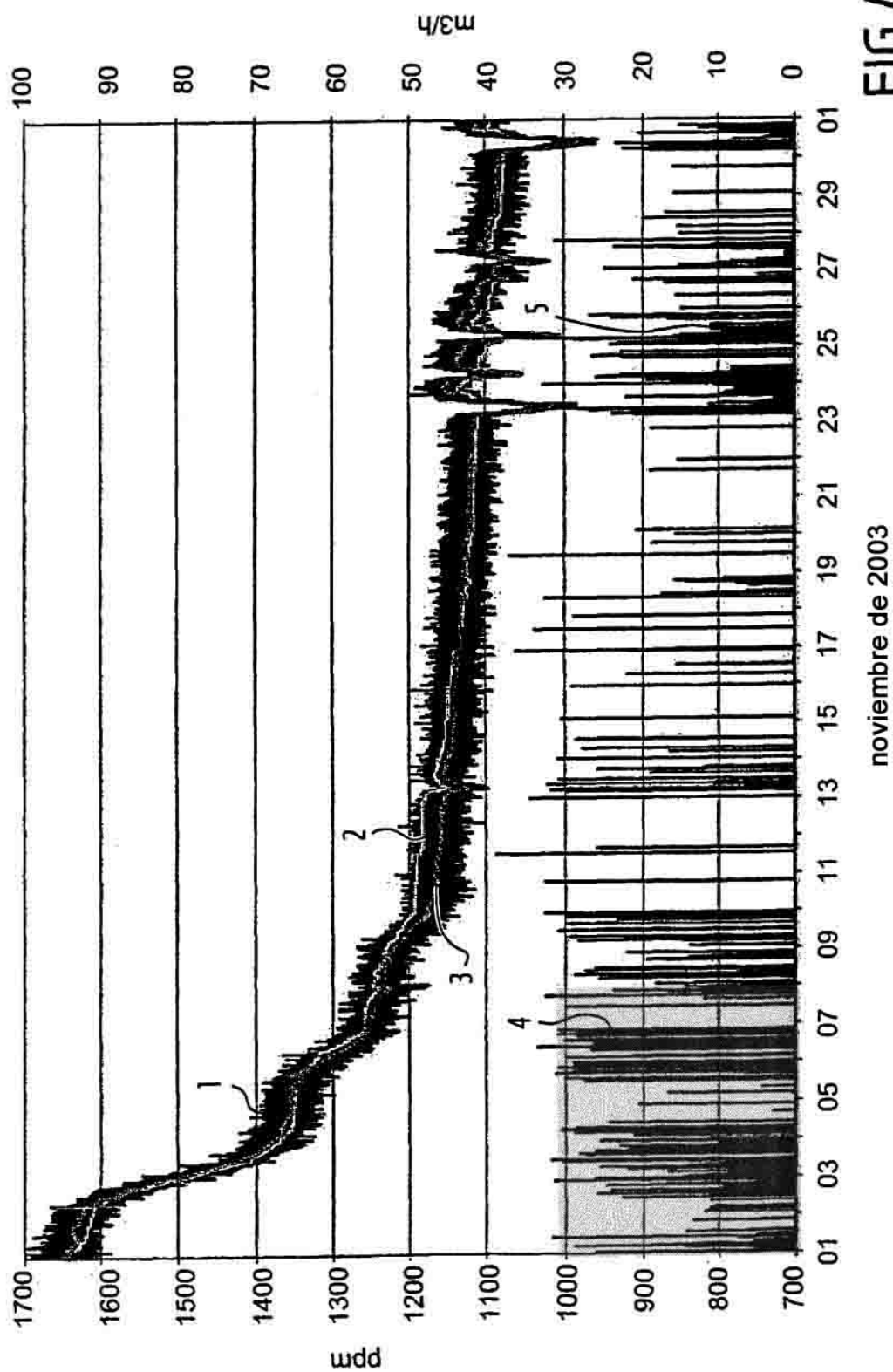


FIG.4

noviembre de 2003

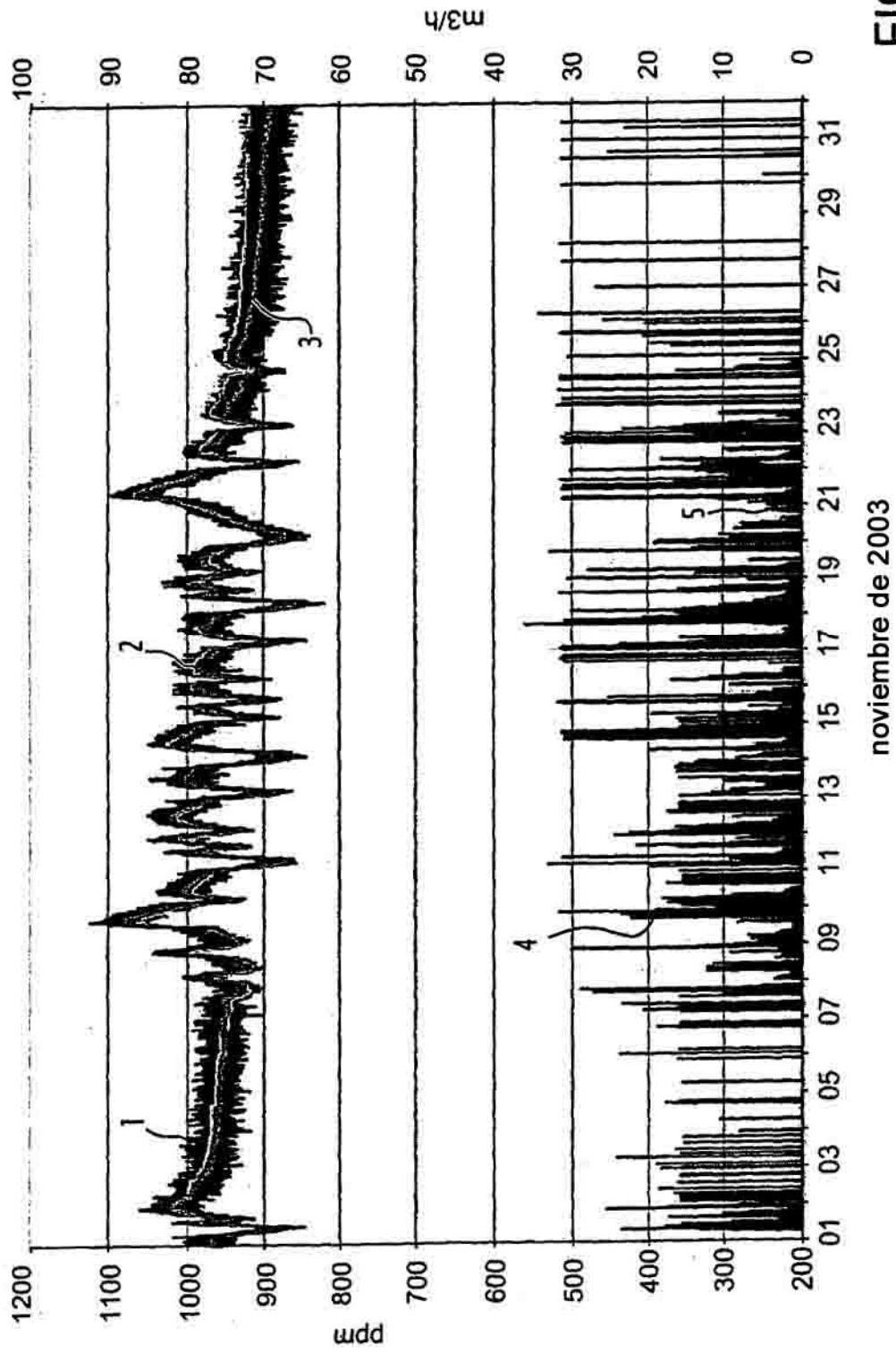


FIG.5

noviembre de 2003

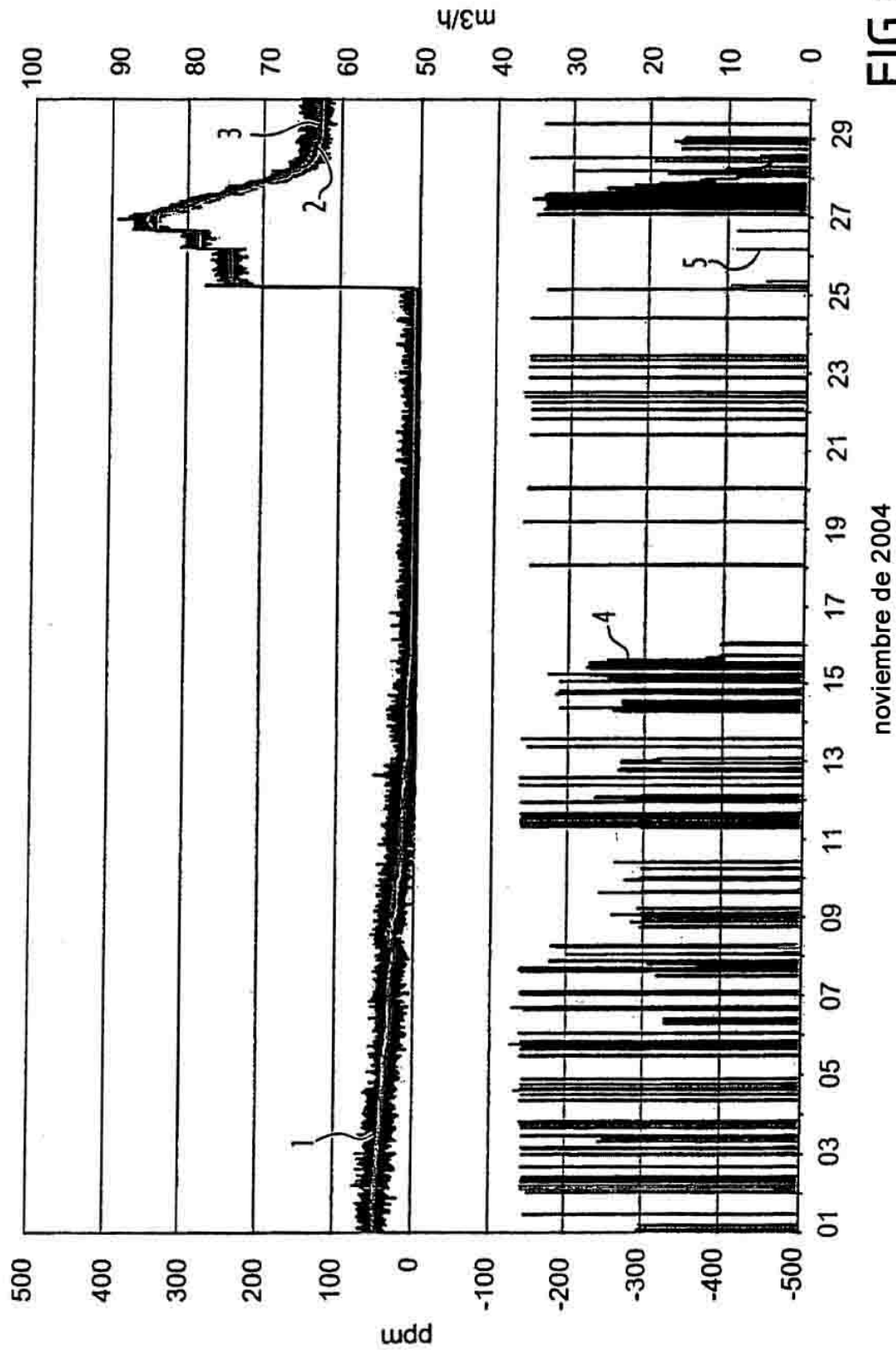


FIG.6