

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 510 549**

51 Int. Cl.:

C02F 1/00 (2006.01)

G05B 17/02 (2006.01)

G05D 21/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.06.2008 E 08771601 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.09.2014 EP 2220545**

54 Título: **Sistema de control para un sistema hidráulico industrial**

30 Prioridad:

03.08.2007 US 833282

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

21.10.2014

73 Titular/es:

**GENERAL ELECTRIC COMPANY (100.0%)
1 River Road
Schenectady, NY 12345, US**

72 Inventor/es:

**WAN, ZHAOYANG;
GEIGER, GARY E.;
ZHANG, YONG y
ZHANG, YU**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 510 549 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

Sistema de control para un sistema hidráulico industrial

Campo de la invención

5 El campo de la invención se refiere a la recopilación y análisis de datos en tiempo real, y la maximización para inhibir la corrosión/formación de costras/incrustaciones y el comportamiento de dispersancia de partículas al tiempo que se minimiza el coste del agua y los compuestos químicos de tratamiento, para así producir un sistema hidráulico industrial más eficaz y eficiente. En particular, se refiere a controles en tiempo real para sistemas hidráulicos industriales, tales como pero no limitados a, sistemas hidráulicos de refrigeración, sistemas de caldera, sistemas de recuperación de agua y sistemas de purificación de agua.

Antecedentes de la invención

10 El suministro abundante de agua dulce es esencial para el desarrollo de la industria. Son necesarias enormes cantidades para la refrigeración de productos y equipos, para requisitos de procesamiento, para la alimentación de calderas, y para el suministro de agua potable y sanitaria. Cada vez es más evidente que el agua dulce es una fuente valiosa que se debe proteger mediante una gestión, conservación, y uso adecuados. Con el fin de garantizar un suministro adecuado de agua de alta calidad para uso industrial, se deben implementar las siguientes prácticas: (1) purificación y acondicionamiento previos al uso por el consumidor (potable) o uso industrial; (2) conservación (y reutilización cuando sea posible); (3) tratamiento de aguas residuales.

15 El poder disolvente del agua puede plantear un riesgo importante para los equipos industriales. Las reacciones de corrosión provocan la disolución lenta de metales por el agua y, eventualmente, el fallo estructural del equipo de procesos. Las reacciones de deposición, que producen costras en las superficies de transferencia de calor y provocan la pérdida de producción, representan un cambio en el poder disolvente del agua a medida que se modifica su temperatura. El control de la corrosión y de la formación de costras es un aspecto importante de la tecnología del tratamiento del agua.

20 Los sistemas hidráulicos industriales típicos están sometidos a variaciones considerables. Las características de la composición del agua pueden cambiar con el tiempo. La brusquedad y el grado de cambio dependen de la fuente de agua. Las pérdidas de agua en un sistema de recirculación, las variaciones en las velocidades de producción, y los caudales de la alimentación química introducen variaciones en el sistema y, por tanto, influyen en la capacidad para mantener el control adecuado del sistema.

25 Normalmente, dado un contenido de iones calcio particular en el agua, se usa un tratamiento que consiste en un ortofosfato inorgánico, junto con un polímero soluble en agua, para formar una película protectora sobre las superficies metálicas en contacto con los sistemas acuosos, en particular los sistemas de refrigeración con agua, para así protegerlos de la corrosión. El polímero soluble en agua es crítico para controlar la cristalización del fosfato de calcio, de forma que se puedan mantener niveles de ortofosfato relativamente elevados en el sistema para conseguir la protección deseada sin que se produzcan incrustaciones o se impidan las funciones de transferencia de calor, que normalmente se producirían con la deposición de fosfato de calcio. Los polímeros solubles en agua también se usan para controlar la formación de sulfato de calcio y carbonato de calcio y además para dispensar particulados para proteger la eficiencia global de los sistemas hidráulicos.

30 La patente de Estados Unidos nº 5.171.450 estableció un reconocimiento simplificado de que el fenómeno de formación de costras o corrosión en torres de refrigeración se puede inhibir mediante la selección de un polímero adecuado, o combinación de polímeros, como agente de tratamiento. Esto se basa en las pérdidas del polímero activo como consecuencia del agotamiento debido a la formación de la película protectora sobre el equipo o a la evitación de depósitos mediante adsorción sobre impurezas sólidas para impedir la aglomeración o al crecimiento de cristales de particulados que se pueden depositar sobre el equipo. En esta patente, el polímero activo se define como el polímero medido por sus etiquetas de fluorescencia, y la pérdida de polímero activo se define mediante el uso de un trazador químico inerte (medido de la concentración total de producto) y restando la concentración de polímero activo como indica el nivel de polímero etiquetado. Así, el control de la corrosión y la formación de costras se consiguen mediante el control del polímero activo a un nivel al cual no son excesivas las pérdidas de componente activo.

35 En la patente de Estados Unidos nº 6.153.110 se definió la eficiencia de inhibición del polímero, es decir, la relación de nivel de polímero libre a nivel de polímero total. En la definición de los niveles de polímero libre y total, inicialmente se excluyó la pérdida de polímero del sistema no detectada en la toma de muestras en el sistema hidráulicos, y a continuación el polímero libre se definió como polímero sin reaccionar, y el polímero unido se definió como polímero asociado a partículas inhibidas (que funciona como inhibidor de costras) y polímero absorbido sobre costras sin depositar (que funciona como dispersante). El polímero libre y el polímero unido juntos comprenden el polímero total presente en el sistema hidráulico. Se estableció una correlación entre el porcentaje de eficiencia de inhibición del polímero y el porcentaje de inhibición de costras, y entre el porcentaje de eficiencia de inhibición del polímero y el porcentaje de dispersión particulada. Así, se consiguió el control de la formación de costras y de la deposición controlando el nivel de polímero libre a nivel de polímero total a una relación necesaria.

5 La patente de Estados Unidos nº 5.171.450 y la patente de Estados Unidos nº 6.153.110 adoptaron un punto de vista muy simplificado de los problemas a abordar. En realidad, los factores principales para el control de la formación de costras son el pH, la dureza y la temperatura, mientras que el polímero es el factor secundario. Véase, por ejemplo, la Tabla I dada a continuación, que muestra diferentes concentraciones de polímero activo necesarias a niveles de pH diferentes. Al no controlar el efecto primario del pH sobre la formación de costras, en caso de incrementar el pH, la falta de control da lugar a un consumo de polímero poco rentable.

Tabla I

pH	Concentración de polímero activo necesaria, ppm
7,2	2
7,4	4
7,6	7
7,8	12

10 Además, los presentes inventores se han hecho notar que las variables controladas en la patente de Estados Unidos nº 5.171.450 y la patente de Estados Unidos nº 6.153.110 no tienen relación directa con los parámetros de rendimiento clave específicos de sitio tales como la corrosión y la formación de costras. Cada sistema hidráulico industrial es único. En sistemas en funcionamiento, el tratamiento adecuado con frecuencia requiere el ajuste constante de la química para cumplir los requisitos de unas condiciones del sistema muy cambiantes. Aquello que es un objetivo adecuado de pérdida de polímero o de porcentaje de eficiencia de inhibición del polímero para un sistema en un momento puede no ser adecuado para el mismo sistema en otro momento o para otro sistema. Sin la medición directa del comportamiento, el control de la concentración de polímero no proporciona ninguna garantía del comportamiento específico de sitio.

15 Una tercera cuestión con los procesos disponibles actualmente es que el control de la concentración de polímero, y de sus derivados tales como la pérdida de polímero y el porcentaje de eficiencia de inhibición del polímero, no pueden detectar la formación localizada de costras en superficies calientes, que únicamente está correlacionada con la cantidad absoluta de pérdida de polímero sobre superficies específicas. Cuanto menor sea la superficie, mayor es el volumen del sistema, y menos probable es que la cantidad absoluta de pérdida de polímero debido a la formación de costras localizada se vea reflejada en cambios en la concentración de polímero. Por ejemplo, en una unidad de ensayo de laboratorio de 30 l, un tubo caliente de 0,5 de diámetro y 5 de longitud presenta muchas costras. Aun así, la pérdida absoluta de polímero en la superficie dividida por el volumen del sistema no se ve reflejada en el cambio en la concentración de polímero. Por ejemplo, si se aplica la misma relación de superficie a volumen a una torre de refrigeración real de 1.700.000 l, no se puede observar la cantidad absoluta de pérdida de polímero debido a la formación de costras en una superficie de transferencia de calor de 279 m² por cambios en la concentración del polímero.

20 Una cuarta preocupación es que un control de realimentación del nivel de polímero en base a la pérdida de polímero y el porcentaje de eficiencia de inhibición del polímero probablemente produciría un consumo poco rentable del polímero. La adición de polímero no ayuda a reducir la cantidad absoluta de polímero unido ya existente en el sistema, simplemente debido a que el polímero que se une a una costra sin depositar no se liberará de la costra. La reducción de la cantidad absoluta de polímero unido únicamente depende de la velocidad de purga del sistema. Para conseguir el mismo porcentaje de eficiencia de inhibición del polímero se requiere un mayor nivel de polímero cuando el polímero unido no se ha agotado completamente en el sistema. Por ejemplo, para conseguir la misma eficiencia de inhibición del polímero del 90 % se requieren 10 ppm de polímero total con 1 ppm de polímero unido, pero 20 ppm de polímero total con 2 ppm de polímero unido.

25 La patente de Estados Unidos nº 6.510.368 y patente de Estados Unidos nº 6.068.012 han propuesto sistemas de control en base al comportamiento midiendo directamente parámetros de comportamiento tales como la corrosión, la formación de costras e incrustaciones, por razones obvias de que el control de trazadores químicos inertes da lugar a un menor control de los compuestos químicos activos, y el control de los compuestos químicos activos da lugar a una falta de control de la alimentación química total, y ninguno de ellos garantiza un comportamiento específico de sitio. En ambas patentes, se desarrolló un árbol de decisiones para diagnosticar, a partir de las mediciones de comportamiento, las causas de la degradación del comportamiento y adoptar acciones correctoras en consecuencia.

30 Una desventaja importante de los sistemas de control anteriores en base al comportamiento es que son reactivos en lugar de proactivos, en otras palabras, la corrosión, formación de costras e incrustaciones ya se ha producido activamente en el sistema. Por otra parte, la corrosión, formación de costras e incrustaciones están muy interrelacionadas. Una vez haya comenzado, una de ellas desencadenará e intensificará las otras dos, lo que puede requerir tres o cuatro veces más productos químicos para devolver el sistema a su nivel basal de comportamiento, produciendo así un consumo de compuestos químicos poco rentable. El mantenimiento proactivo de la salubridad de

un sistema hidráulico industrial es más económico que intentar arreglar uno insalubre. Por tanto, en la industria aún se necesita un sistema de control que sea proactivo en lugar de reactivo y por tanto produzca procesos más eficientes y económicos.

- 5 La patente de Estados Unidos 6.535.795 B1 se refiere a un procedimiento de adición química que utiliza optimizaciones adaptativas para el control procesos. El documento de Estados Unidos 5.521.814 se refiere a un sistema de control de procesos que representa interrelaciones entre variables para cumplir un objetivo. El documento WO 01/98218 A2 se refiere a un aparato para la optimización dinámica de aditivos químicos en un sistema de tratamiento de aguas.

Sumario de la invención

- 10 Por consiguiente, en la presente memoria se proporciona un sistema de control de acuerdo con la reivindicación 1.

Las diversas características de novedad que caracterizan la invención se exponen con particularidad en las reivindicaciones adjuntas y que forman una parte de la presente divulgación. Para una mejor comprensión de la invención, de sus ventajas operativas y beneficios obtenidos con sus usos, se hace referencia a los dibujos acompañantes y a la materia descriptiva.

Breve descripción de los dibujos

Ahora, con referencia a las Figuras, que están destinadas a ser ilustrativas y no limitantes, y en las que elementos análogos están numerados de forma similar, y en las que no todos los números se repiten en cada Figura para mayor claridad de la ilustración.

La Figura 1 es una ilustración de un sistema hidráulico industrial con señales de entrada y salida.

- 20 La Figura 2 es una ilustración de una estructura de control para un sistema hidráulico industrial con señales de entrada y salida.

La Figura 3 muestra la identificación de una función de transferencia dinámica desde acciones de bomba (variable manipulada) hasta la concentración química (salida medida), basada en los datos en tiempo real de la concentración química y las acciones de bomba.

- 25 La Figura 4 es una representación de diferentes zonas operativas para un programa de tratamiento de aguas ilustrativo.

Las Figuras 5A y 5B representan el efecto de un modelo en base al control de acuerdo con una realización de la invención.

- 30 Las Figuras 6A y 6B muestran ensayos piloto para identificar los límites de formación de costras/incrustaciones y la dependencia del margen de seguridad de las incrustaciones sobre la química del agua.

Descripción detallada de la invención

El alcance técnico de la presente invención engloba no sólo aquellas realizaciones descritas, sino también todas aquellas que entren dentro del alcance de las reivindicaciones anexas.

- 35 Se ha encontrado un sistema de control que mide al menos una variable manipulada y al menos una salida medida que representa un margen de seguridad respecto a los límites de comportamiento, determina al menos una función de transferencia dinámica entre la al menos una salida medida y la al menos una variable manipulada, y define un índice derivado de los valores actuales y futuros de la al menos una salida medida y un índice derivado de los valores actuales y futuros de la al menos una variable manipulada. En cada tiempo de obtención de muestras, el sistema de control utiliza un procesador para maximizar el índice de la al menos una salida medida y minimizar el índice de la al menos una variable manipulada, y determinar los valores actuales y futuros de la al menos una variable manipulada y a continuación implementa el valor actual de la al menos una variable manipulada dentro del sistema hidráulico. Aunque los valores actuales y futuros de la al menos una variable manipulada están computarizados, el controlador implementa únicamente el primer valor computado de la al menos una variable manipulada, y repite estos cálculos en el siguiente tiempo de obtención de muestras.

- 45 En una realización alternativa, un sistema de control utiliza varias mediciones de información y modelos para decidir acciones de control óptimas para maximizar la inhibición de la corrosión/formación de costras/incrustaciones y el comportamiento de dispersancia de partículas y minimizar los costes del agua y de los compuestos químicos de tratamiento. Este sistema es capaz de funcionar automáticamente para un amplio espectro de condiciones de procesamiento, garantiza varios objetivos de comportamiento, y consigue un funcionamiento sólido bajo diversas alteraciones o alteraciones no medibles al tiempo que también consigue el objetivo económico.
- 50

Una diferencia fundamental entre la presente invención y lo que se conoce de la técnica anterior es que el proceso reivindicado en este documento es proactivo y óptimo a la hora de garantizar el comportamiento específico de sitio. Una realización del sistema de control reivindicado en este documento se basa en una visión integral del sistema hidráulico industrial y su estructura de control. Como se muestra en la Figura 1, las entradas 105 del sistema hidráulico 100 están clasificadas como alteraciones medidas 110, alteraciones no medidas 130, y variables manipuladas 120; las salidas 155 del sistema hidráulico están clasificadas como salidas medidas 150 y salidas no medidas 140. Como se demuestra en la Figura 2, las entradas del sistema de control 200 están clasificadas como alteraciones medidas 210, puntos de ajuste 220 y salidas medidas 230, y las salidas del sistema de control están clasificadas como variables manipuladas. Las alteraciones no medidas 260 se desconocen salvo por su efecto sobre la salida de la planta 270. El controlador 240 proporciona una compensación de realimentación para dichas alteraciones. Los puntos de ajuste 220 o referencias son el valor objetivo para la salida. La variable manipulada, o actuador 250, es la señal que ajusta el controlador 240 para conseguir sus objetivos. El controlador proporciona compensación de avance de la alimentación para dichas alteraciones medidas 210 a medida que se producen para minimizar su impacto sobre la salida 270. La salida 270 es la señal a mantener en el punto de ajuste. Este es el valor "verdadero", no degradado por el ruido medido. La medición de la salida 230 se usa para estimar el valor verdadero, o salida de la planta 270. La medición del ruido 280 representa el ruido eléctrico, errores en la toma de muestras, calibración de la deriva y otros efectos que perjudican la precisión y exactitud de la medición.

En una realización alternativa, el sistema de control inventado (1) define una clase especial de salidas medidas como márgenes de seguridad respecto a los límites de comportamiento (más allá de los cuales se produce, por ejemplo, la corrosión, formación de costras e incrustaciones); (2) opera el sistema hidráulico industrial en unas condiciones en las que existen márgenes de seguridad respecto a los límites de comportamiento; (3) cuantifica el impacto de las alteraciones no medidas (tales como, compuestos químicos auxiliares, estrés térmico, etc.) en términos de contracción de los márgenes de seguridad; (4) identifica las funciones de transferencia dinámica desde las alteraciones medidas (tales como, flujo auxiliar, flujo de purga, etc.) hasta las salidas medidas; (5) identifica las funciones de transferencia dinámica desde las variables manipuladas (tales como, bombas, válvulas, etc.) hasta las salidas medidas; (6) identifica la dependencia de los márgenes de seguridad sobre las salidas medidas relacionadas con la química del agua; (7) define un índice de comportamiento como suma ponderada de los valores actuales y futuros de las salidas medidas y un índice de costes como suma ponderada del coste del agua y los compuestos químicos de tratamiento a partir de los valores actuales y futuros de las variables manipuladas, teniendo en cuenta limitaciones sobre las salidas medidas y las variables manipuladas; (8) en cada tiempo de obtención de muestras, maximiza el índice de comportamiento y minimiza el índice de costes, y determina los valores actuales y futuros de las variables manipuladas; y (9) implementa los valores actuales de las variables manipuladas dentro del sistema hidráulico. A pesar de que están computados los valores actuales y futuros de la variable manipulada, el controlador únicamente implementa los primeros valores computados de las variables manipuladas, y repite estos cálculos en el siguiente tiempo de obtención de muestras.

A diferencia del árbol lógico cualitativo de la técnica anterior, en esta invención, las funciones de transferencia dinámica en (4), (5) y (6) se cuantifican explícitamente, y por tanto se puede resolver una optimización numérica.

En una realización, se establece un margen de seguridad respecto a los límites de formación de costras/incrustaciones usando un intercambiador de calor de prueba. Sobre un lateral de la superficie de transferencia de calor se encuentra un calentador eléctrico, y sobre la otra parte hay una corriente lateral del sistema hidráulico. Tanto el flujo térmico del calentador como el flujo de agua de la corriente lateral están controlados en sus puntos de ajuste. Por tanto, un incremento del gradiente de temperatura entre la superficie y el agua representa el comienzo de la formación de costras/incrustaciones. Si incrementamos el punto de ajuste del flujo térmico y/o reducimos el punto de ajuste del flujo de agua de manera que la temperatura superficial sea ΔT_1 más elevada que la superficie más caliente en el sistema hidráulico y no se detecta formación de costras/incrustaciones, entonces ΔT_1 se define como el margen de seguridad respecto al límite de formación de costras/incrustaciones del sistema hidráulico. Cuando se introducen alteraciones no medidas en el sistema hidráulico, el intercambiador de calor de prueba en primer lugar detecta la formación de costras/incrustaciones. La temperatura superficial se reduce al disminuir el punto de ajuste del flujo térmico y/o incrementar el punto de ajuste del flujo de agua, de manera que se suprime la formación de costras/incrustaciones, y la temperatura superficial es ΔT_2 más elevada que la superficie más caliente en el sistema hidráulico. Entonces, $(\Delta T_1 - \Delta T_2)$ representa el impacto de las alteraciones no medidas sobre el margen de seguridad de formación de costras/incrustaciones.

En una realización, se establece un margen de seguridad respecto a los límites de corrosión mediante el uso de una sonda de corrosión de prueba. Se impone una diferencia de potencial adicional ΔE_1 desde fuera entre los electrodos catódicos y canónicos y no se detecta corrosión, entonces ΔE_1 se define como el margen de seguridad respecto al límite de corrosión del sistema hidráulico. Cuando se introducen alteraciones no medidas en el sistema hidráulico, la sonda de corrosión de prueba detecta primero la corrosión. Se reduce la diferencia de potencial impuesta desde fuera hasta ΔE_2 de forma que se suprime la corrosión. Entonces, $(\Delta E_1 - \Delta E_2)$ representa el impacto de las alteraciones no medidas sobre el margen de seguridad de corrosión.

En una realización, el sistema de control identifica las funciones de transferencia dinámica desde las alteraciones medidas (por ejemplo, flujo auxiliar, flujo de purga, etc.) hacia las salidas medidas (por ejemplo, concentraciones químicas), y las funciones de transferencia dinámica desde las variables manipuladas (por ejemplo, bombas,

válvulas, etc.) hacia las salidas medidas (por ejemplo, concentraciones químicas). Las funciones de transferencia dinámica se pueden expresar como

$$y_{w1}(t+1) = f_1(y_{w1}(\tau), y_{w2}(\tau), \dots, u_1(\tau), u_2(\tau), \dots, v_1(\tau), v_2(\tau), \dots, \tau \leq t)$$

$$y_{w2}(t+1) = f_2(y_{w1}(\tau), y_{w2}(\tau), \dots, u_1(\tau), u_2(\tau), \dots, v_1(\tau), v_2(\tau), \dots, \tau \leq t)$$

...

- 5 en las que y_{w1}, y_{w2}, \dots son la salida medida con respecto a la química del agua; u_1, u_2, \dots son las variables manipuladas; v_1, v_2, \dots son las alteraciones no medidas. Las funciones de transferencia son dinámicas en el sentido de que las salidas medidas con respecto a la química del agua dependen de las salidas medidas, las variables manipuladas y las alteraciones medidas en tiempos anteriores.

- 10 Por ejemplo, un modelo de balance de masas para una especie química X se puede expresar como que la cantidad de X acumulada en el sistema es igual a la cantidad de X introducida en el sistema menos la cantidad de X que sale del sistema. La fórmula matemática para ello es:

$$V \frac{dC(t)}{dt} = -B(t) \cdot C(t) + F(t)$$

en la que V es el volumen del sistema, B es el flujo de purga, F es el flujo de la alimentación química, C es la concentración de la especie química X en el sistema. Usando un tiempo de toma de muestras de Δt y una

aproximación de Euler de primer orden para la derivada, es decir, $\frac{dC(t)}{dt} \approx \frac{C(t+1) - C(t)}{\Delta t}$, el modelo del

- 15 balance de masas se puede expresar como $C(t+1) = f(C(t), F(t), B(t))$, es decir, la concentración química (salida medida) a tiempo t+1 es una función de la concentración química (salida medida), la alimentación química (variable manipulada) y purga (alteración medida) a tiempo t. Suponiendo que la purga es constante, el modelo se convierte en

$$\tau \frac{dC(t)}{dt} = -C(t) + C_{ss} \cdot \% \text{pumpOpen}(t)$$

- 20 en la que $\tau (=V/B)$ es la constante de tiempo del sistema, $\% \text{pumpOpen}$ es el porcentaje de apertura de una bomba, $C_{ss}(=F/B)$ es la concentración en estado estacionario si $\% \text{pumpOpen}$ es igual al 100 %. Véase Figura 3, una función de transferencia dinámica desde las acciones de la bomba (variable manipulada) hasta la concentración química

(salida medida) se identifica como $1613 \frac{dC}{dt} = -C + 11,7 \cdot \% \text{pumpOpen}$, en base a los datos en tiempo real de la concentración química y de las acciones de la bomba.

- 25 Al tener una realización en la que están identificadas las dinámicas entre las acciones de la bomba química y la concentración química en el sistema, el controlador puede proporcionar las decisiones de control óptimas para desplazar el sistema hacia la zona operativa objetivo en un tiempo mínimo o a un coste mínimo. La Figura 4 representa diversas zonas operativas para un programa de tratamiento de agua ilustrativo. Las Figuras 5A y 5B muestran adicionalmente cómo un modelo en base al sistema de control desplaza la concentración de polímero desde 2 ppm a un objetivo de 4 ppm en un tiempo mínimo mientras satisface explícitamente las limitaciones de apertura de la bomba (es decir, $0 < \% \text{pumpOpen} < 100 \%$), comparado con el control de la relación, que introduce compuestos químicos en base al flujo de purga o al flujo auxiliar.
- 30

En una realización, el sistema de control identifica la dependencia de los márgenes de seguridad con respecto a las salidas medidas relacionadas con la química del agua. La dependencia se puede expresar como

$$y_{s1} = g_1(y_{w1}, y_{w2}, \dots)$$

$$y_{s2} = g_2(y_{w1}, y_{w2}, \dots)$$

...

- 35 en las que y_{s1}, y_{s2}, \dots son los márgenes de seguridad, y_{w1}, y_{w2}, \dots son la salida medida relacionada con la química del agua. Las funciones no lineales $g_1(\bullet), g_2(\bullet)$ se pueden dividir en varias regiones. Dentro de cada región, las funciones no lineales se aproximan mediante sus aproximaciones lineales, por ejemplo, para la región $(y_{w1}, y_{w2}, \dots) \in R^n$

$$\left. \frac{\partial y_{s1}}{\partial y_{w1}} \right|_{(y_{w1}, y_{w2}, \dots) \in R} = a_1, \left. \frac{\partial y_{s1}}{\partial y_{w2}} \right|_{(y_{w1}, y_{w2}, \dots) \in R} = a_2, \dots$$

$$\left. \frac{\partial y_{s2}}{\partial y_{w1}} \right|_{(y_{w1}, y_{w2}, \dots) \in R} = b_1, \left. \frac{\partial y_{s2}}{\partial y_{w2}} \right|_{(y_{w1}, y_{w2}, \dots) \in R} = b_2, \dots$$

...

Véanse las Figuras 6A y 6B. La Figura 6A representa ensayos piloto, en los que la temperatura superficial caliente del intercambiador de calor de prueba comienza a incrementarse drásticamente después de que la concentración de polímero caiga hasta cierto umbral. La conexión de los valores umbrales a diferentes temperaturas superficiales forma un límite, más allá del cual se produce la formación de costras/incrustaciones. La Figura 6B representa ensayos piloto, en los que la temperatura superficial comienza a incrementarse drásticamente después de que el pH aumente hasta cierto umbral. La conexión de los valores umbrales a diferentes temperaturas superficiales forma un límite, más allá del cual se produce la formación de costras/incrustaciones. La dependencia del margen de seguridad de la formación de costras/incrustaciones sobre la química del agua para la región T=60~71,1 °C (140~160 °F), pH=7,5~7,7 y el polímero = 1-4 ppm se puede expresar como: un incremento de 3 ppm puede proporcionar -6,6 °C (20 °F) en el margen de seguridad para la formación de costras/incrustaciones, o una caída de 0,2 en el pH puede proporcionar -6,6 °C (20 °F) en el margen de seguridad para la formación de costras/incrustaciones.

En una realización del sistema de control inventado, tanto el intercambiador de calor de prueba como la sonda de corrosión de prueba trabajan muy próximos a los límites de comportamiento. El sistema de control recopila datos acerca de la contracción de los márgenes de seguridad debido a las alteraciones no medidas, y de la expansión de los márgenes de seguridad debido a las variables manipuladas y su impacto sobre las salidas medidas relacionadas con la química del agua. A partir de los datos recopilados en tiempo real se puede identificar la dependencia de los márgenes de seguridad sobre las salidas medidas relacionadas con la química del agua.

En una realización, el sistema de control define un índice de comportamiento como suma ponderada de los valores actuales y futuros de las salidas medidas y un índice de costes como suma ponderada del coste del agua y los compuestos químicos de tratamiento a partir de los valores actuales y futuros de las variables manipuladas, teniendo en cuenta limitaciones sobre las salidas medidas y las variables manipuladas. En cada tiempo de obtención de muestras, el sistema de control maximiza el índice de comportamiento y minimiza el índice de costes, y determina los valores actuales y futuros de las variables manipuladas; e implementa los valores actuales de las variables manipuladas dentro del sistema hidráulico. A pesar de que están computados los valores actuales y futuros de la variable manipulada, el controlador únicamente implementa los primeros valores computados de las variables manipuladas, y repite estos cálculos en el siguiente tiempo de obtención de muestras. La fórmula matemática para ello es que en un tiempo de obtención de muestras, dado $y_{w1}(t), y_{w2}(t), \dots, v_1(t), v_2(t), \dots, t \leq t_0$, e $y_{s1}(t_0), y_{s2}(t_0), \dots$, resolver

$$\max_{\substack{u_1(t_0), u_2(t_0), \dots, \\ \dots \\ u_1(t_0+N), u_2(t_0+N), \dots}} \sum_{t=t_0}^{t_0+N} \{ [w_1 y_{s1}(t) + w_2 y_{s2}(t) + \dots] - [c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t) + \dots] \}$$

$$y_{w1}(t+1) = f_1(y_{w1}(t), y_{w2}(t), \dots, u_1(t), u_2(t), \dots, v_1(t), v_2(t), \dots, t \leq t)$$

$$y_{w2}(t+1) = f_2(y_{w1}(t), y_{w2}(t), \dots, u_1(t), u_2(t), \dots, v_1(t), v_2(t), \dots, t \leq t)$$

...

$$y_{s1} = g_1(y_{w1}, y_{w2}, \dots)$$

$$y_{s2} = g_2(y_{w1}, y_{w2}, \dots)$$

sujeto a

...

$$y_{w1}^L \leq y_{w1}(t) \leq y_{w1}^U, y_{w2}^L \leq y_{w2}(t) \leq y_{w2}^U, \dots$$

$$y_{s1}^L \leq y_{s1}(t) \leq y_{s1}^U, y_{s2}^L \leq y_{s2}(t) \leq y_{s2}^U, \dots$$

$$u_1^L \leq u_1(t) \leq u_1^U, u_2^L \leq u_2(t) \leq u_2^U, \dots$$

$$t = t_0 \dots t_0 + N$$

En la que t_0 es el tiempo actual, t_{0+N} es la etapa N más adelante en el futuro; w_i es el peso para el margen de seguridad i-ésimo, c_i es el coste asociado a la variable manipulada i-ésima; y_{wi}^L e y_{wi}^U son los límites inferior y superior para y_{wi} ; y_{si}^L e y_{si}^U son los límites inferior y superior para y_{si} ; u_i^L y u_i^U son los límites inferior y superior para u_i .

- 5 Aunque la presente invención se ha descrito con referencia a realizaciones preferidas, los expertos en la materia pertinente para la presente invención pueden introducir varios cambios o sustituciones en estas realizaciones sin apartarse del ámbito técnico de la presente invención. Por lo tanto, el ámbito técnico de la presente invención abarca no sólo las realizaciones descritas anteriormente, sino todo aquello que cae dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de control (200) para la monitorización y control de la salubridad de una superficie de transferencia de calor en un sistema hidráulico industrial, que comprende:
- 5 un intercambiador de calor que comprende una superficie de prueba; y un controlador (240); **caracterizado porque:**
- 10 el sistema de control (200) está configurado para medir una temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico y determinar un margen de seguridad ΔT respecto a un límite de formación de costras/incrustaciones, siendo el margen de seguridad ΔT la diferencia entre una temperatura de la superficie de prueba más allá de la cual se produce la formación de costras/incrustaciones y la temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico, y en el que el controlador (240) está configurado para comparar la temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico y una temperatura de punto de ajuste para la superficie de prueba, y para controlar al menos una variable manipulada (250) para suprimir la formación de costras/incrustaciones en respuesta a la comparación entre la temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico y la temperatura del punto de ajuste para la superficie de prueba.
2. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la al menos una variable manipulada (250) es un caudal de alimentación de un producto químico en un sistema acuoso en el sistema hidráulico industrial o una concentración química del producto químico en el sistema acuoso.
- 20 3. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el producto químico es un polímero anti-incrustaciones o anti-costras.
4. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 2, en el que el producto químico modifica el pH del sistema acuoso.
- 25 5. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 3, en el que el controlador (240) está configurado para incrementar el caudal de alimentación del polímero cuando la temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico es inferior a la temperatura del punto de ajuste de la superficie de prueba y para reducir el caudal de alimentación del polímero cuando la temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico es superior a la temperatura del punto de ajuste de la superficie de prueba.
- 30 6. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el controlador (240) está configurado para recopilar los datos relacionados con al menos una alteración medida (210), la al menos una variable manipulada (250) y una diferencia de temperatura entre la temperatura (230) de la superficie más caliente en el sistema hidráulico y la temperatura del punto de ajuste, y para utilizar los datos y correlaciones dinámicas predeterminadas entre la al menos una alteración medida y la diferencia de temperatura y entre la al menos una variable manipulada y la diferencia de temperatura para construir un índice de comportamiento que comprende una suma ponderada asociada a los valores previstos presentes y futuros de la diferencia de temperatura y un índice de costes que comprende una suma ponderada de los costes predichos presentes y futuros asociados a la al menos una variable manipulada (250), y en el que el controlador (240) está configurado para ajustar la al menos una variable manipulada (250) para maximizar simultáneamente el índice de comportamiento y así reducir los valores presentes y futuros de la diferencia de temperaturas, y minimizar el índice de costes y así reducir los costes predichos presentes y futuros.
- 40 7. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 6, en el que la maximización del índice de comportamiento y la minimización del índice de costes tiene en cuenta limitaciones de comportamiento para garantizar el comportamiento adecuado del sistema de control.
- 45 8. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 6, en el que la al menos una variable manipulada (250) es un caudal de alimentación de un producto químico en un sistema acuoso en el sistema hidráulico industrial o una concentración química del producto químico en el sistema acuoso.
9. El sistema de control (200) de acuerdo con la reivindicación 8, en el que el producto químico es un polímero anti-incrustaciones o anti-costras.
- 50 10. El sistema de control (200) de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9 en el que el sistema hidráulico industrial es un sistema de recirculación.
11. El sistema de control (200) de la reivindicación 10, en el que el sistema hidráulico industrial es un sistema de una torre de refrigeración o un sistema de caldera.
12. El sistema de control (200) de la reivindicación 6, en el que la al menos una alteración medida (210) comprende al menos una seleccionada del grupo que consiste en: cambios en la composición de la fuente de agua, pérdidas de

agua en el sistema de recirculación, cambios en las velocidades de producción, cambios en el entorno, y cambios en la estructura del sistema.

5 13. El sistema de control de la reivindicación 1, en el que la al menos una variable manipulada comprende al menos una seleccionada del grupo que consiste en: caudales de alimentación de productos químicos, caudal de flujo de agua auxiliar, caudal de flujo de agua de purga, y caudal de flujo de agua de recirculación.

14. El sistema de control de la reivindicación 6, en el que una o más funciones de transferencia dinámica correlacionan la al menos una alteración medida y la diferencia de temperatura.

15. El sistema de control de la reivindicación 6, en el que una o más funciones de transferencia dinámica correlacionan la al menos una variable manipulada y la diferencia de temperatura.

10

FIG. 1

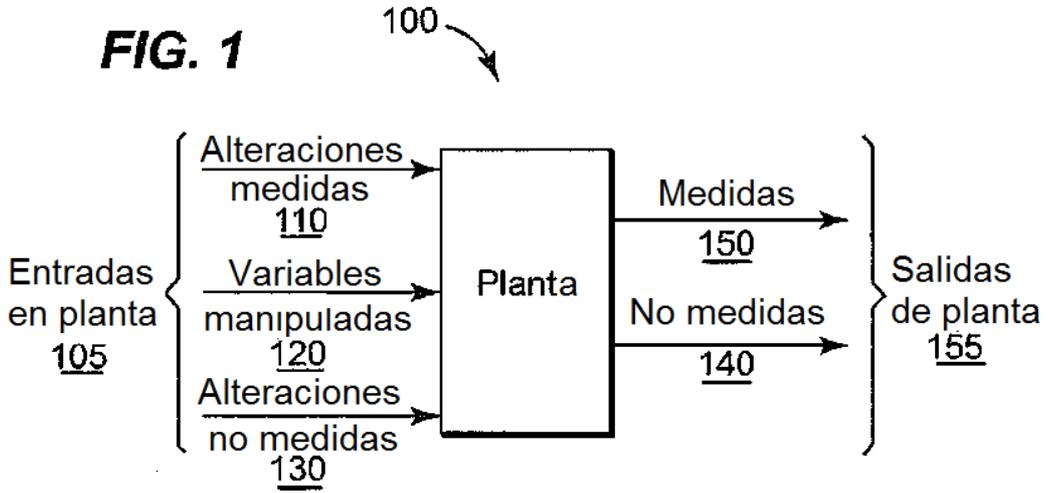


FIG. 2

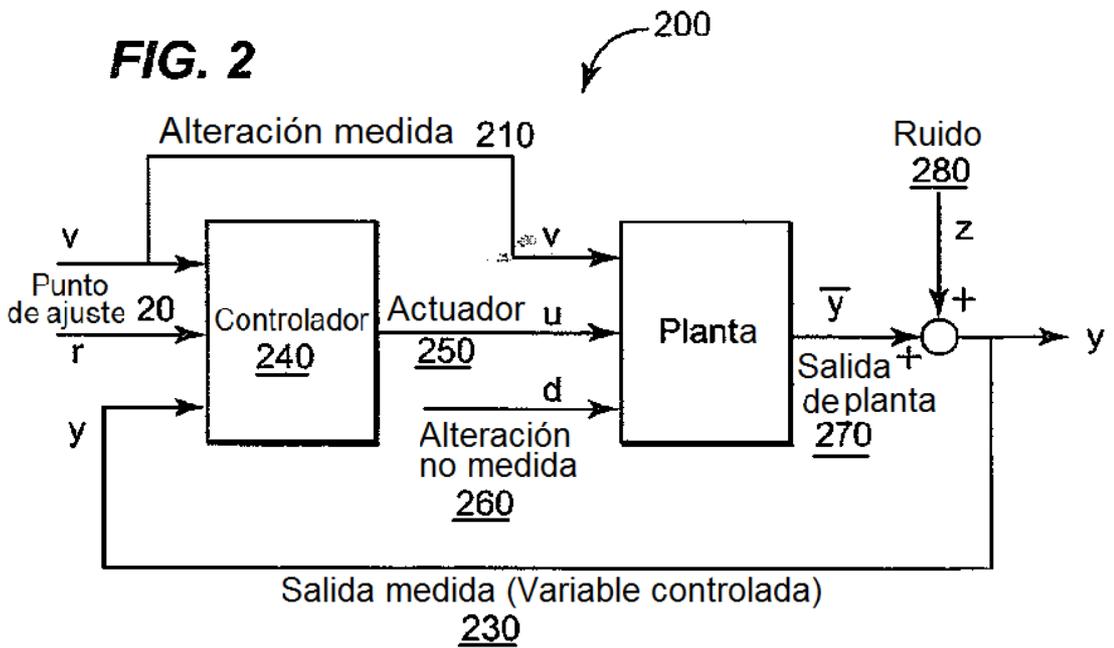


FIG. 3

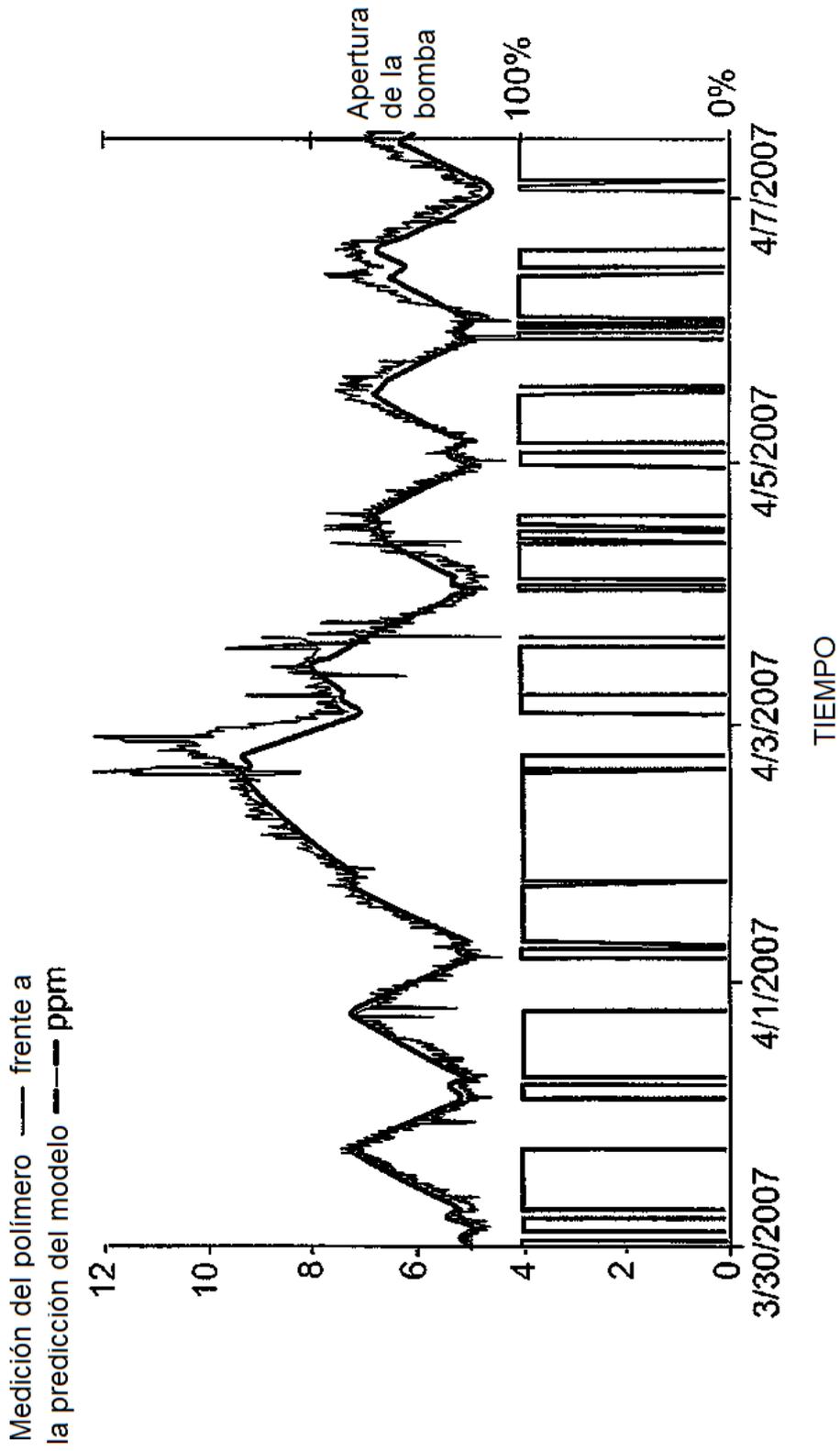


FIG. 4

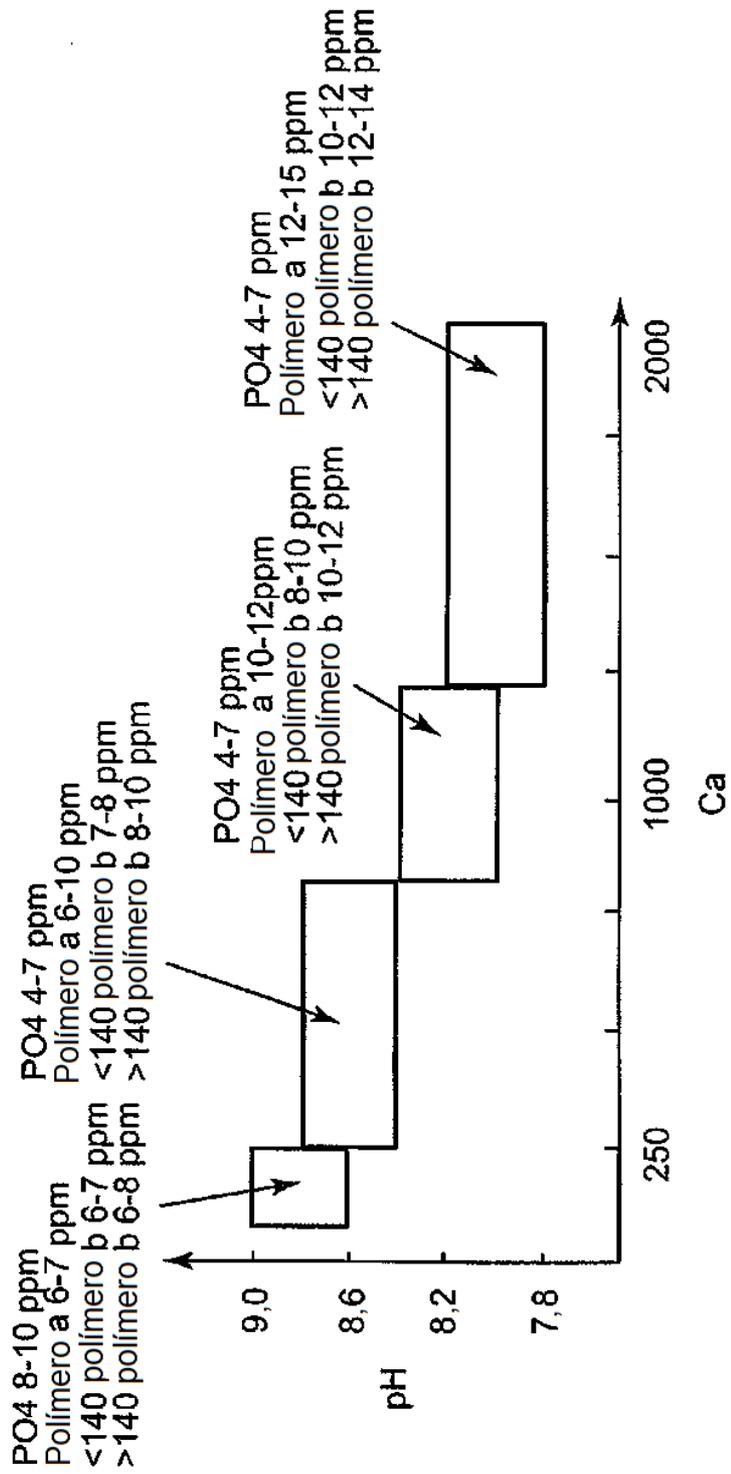


FIG. 5A

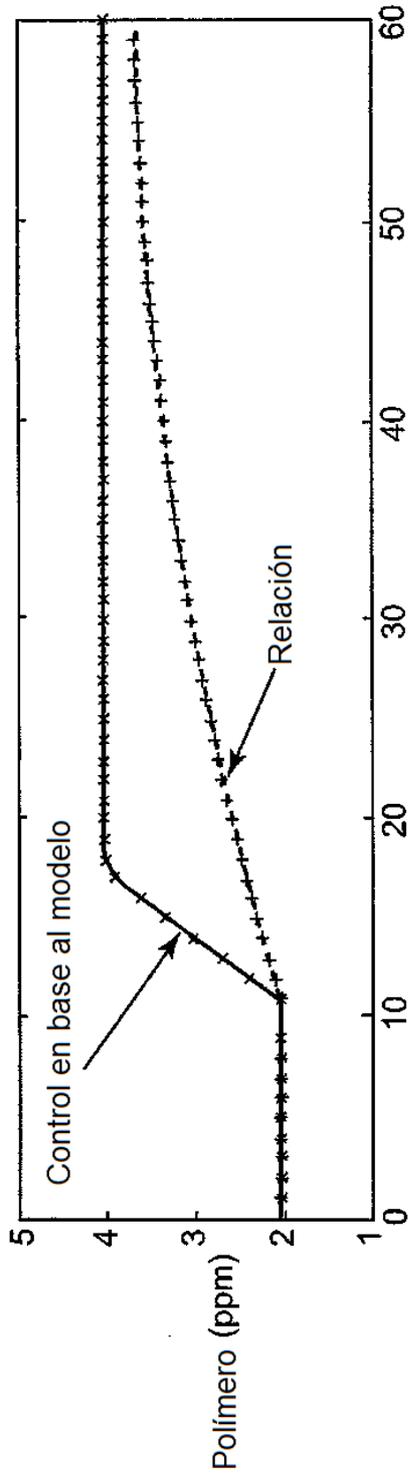


FIG. 5B

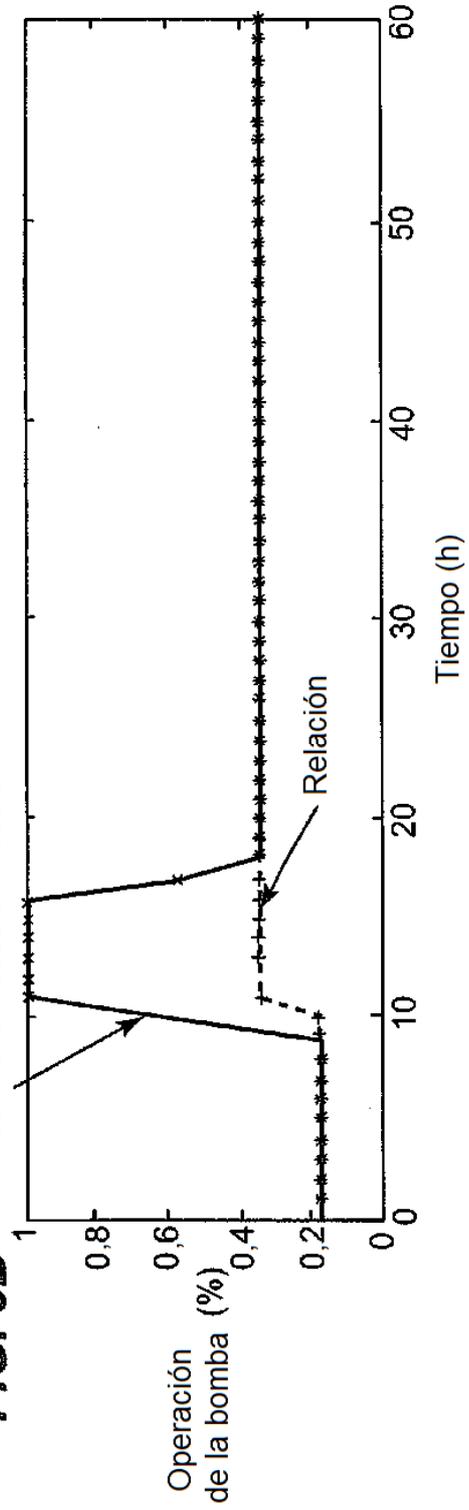


FIG. 6A

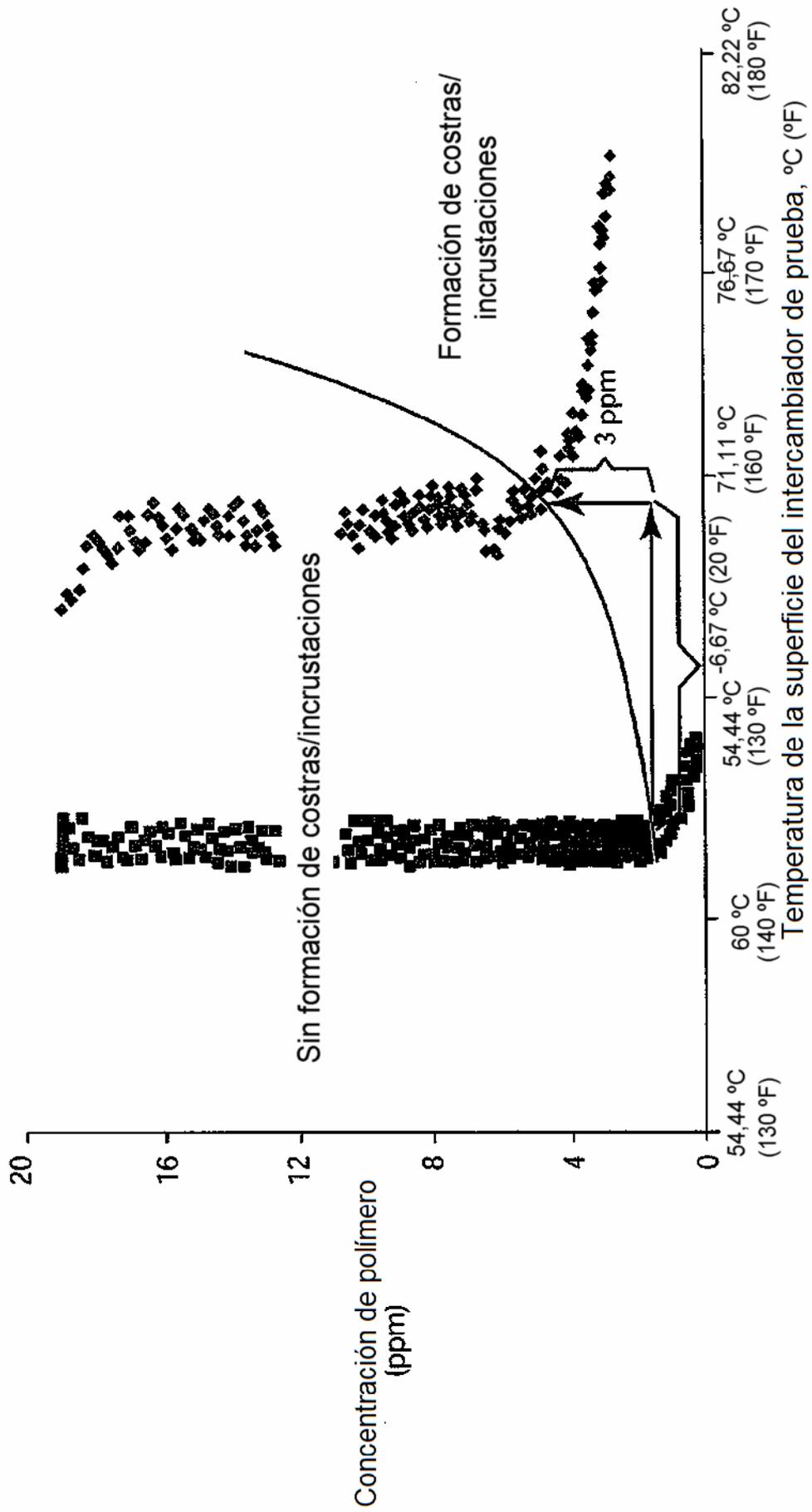


FIG. 6B

