

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 375 837**

51 Int. Cl.:

G06F 7/60 (2006.01)

G05B 15/00 (2006.01)

G05B 13/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06802076 .7**

96 Fecha de presentación: **23.08.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1917563**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **07.05.2008**

54 Título: **CONTROLADOR MPC MULTIVARIABLE ADAPTATIVO.**

30 Prioridad:
26.08.2005 US 212252

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
06.03.2012

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
06.03.2012

73 Titular/es:
**CHARLES R. CUTLER
101 LONGSFORD
SAN ANTONIO, TX 78209, US**

72 Inventor/es:
Cutler, Charles R.

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 375 837 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

Controlador MPC multivariable adaptativo

Antecedentes de la invención

5 El Control Predictivo de Modelo (MPC) se refiere a una clase de algoritmos que calculan una secuencia de ajustes variables manipulados con el fin de optimizar el comportamiento futuro de los procesos multivariables complejos. Originalmente desarrollado para satisfacer las necesidades de las refinerías de petróleo y de los procesos químicos, MPC se pueden encontrar ahora en una amplia variedad de áreas de aplicación incluyendo productos químicos, procesamiento de alimentos, automotriz, aeroespacial, metalurgia, celulosa y papel. Una implementación bien conocida de MPC en aplicaciones químicas y refinerías es el control de matriz dinámica o DMC.

10 El controlador MPC emplea un modelo de software del proceso para predecir el efecto de cambios pasados de variables manipuladas y perturbaciones mensurables en las variables de salida de interés. Las variables independientes se calculan con el fin de optimizar el comportamiento futuro del sistema en un intervalo de tiempo conocido como el horizonte de predicción. En el caso general, cualquier función objetivo deseada se puede utilizar para la optimización. La dinámica del sistema se describe mediante un modelo de proceso explícito, lo que puede
15 tomar, en principio, un número de diferentes formas matemáticas. Las limitaciones de entrada y de salida del proceso se incluyen directamente en la formulación del problema de manera que se anticipan y se previenen las violaciones de restricciones futuras.

20 En la práctica una serie de enfoques diferentes se han desarrollado y comercializado en la implementación de controladores MPC. Las implementaciones más exitosas han hecho uso de un modelo lineal para la dinámica de la planta. El modelo lineal se desarrolla en una primera etapa mediante la recopilación de datos sobre el proceso mediante la introducción de alteraciones de prueba en variables independientes (manipuladas) y midiendo los efectos de las perturbaciones sobre las variables dependientes (controladas). Esta etapa inicial se conoce como identificación.

25 Las patentes US 4.349.869 y 4.616.308 describen una implementación de control MPC llamado Control Dinámico de Matriz (DMC). Estas patentes describen los algoritmos MPC sobre la base de los modelos lineales de una planta y describe cómo las limitaciones del proceso están incluidas en la formulación del problema. La identificación inicial del controlador MPC usando datos de proceso también se describe.

30 A modo de antecedente adicional, esta identificación de la dinámica del proceso requiere de una prueba previa en la que las variables manipuladas del proceso se mueven en algún patrón para determinar el efecto sobre las variables dependientes (controladas). En un proceso químico o de refinería las variables independientes incluyen puntos de referencia del controlador PID (proporcional-integral-derivativo) para seleccionar las variables dependientes, las posiciones del elemento de control final de los controladores PID en manual, y temperaturas, flujos de materiales, presiones y composiciones que se determinan fuera del alcance del dominio del controlador. Para cualquier prueba de identificación del proceso, las variables independientes se fijan para el análisis de los datos. Además, la
35 sintonización de alguno de los controladores PID en el dominio del controlador MPC es fija. El controlador MPC que se construye para utilizar los modelos de procesos dinámicos de la identificación debe tener exactamente la misma configuración de las variables independientes que existían cuando se realizó la identificación. Por lo tanto, la configuración del controlador PID que está presente durante la identificación integra la dinámica del regulador PID en el modelo dinámico. Como la dinámica PID es una parte del comportamiento de la planta, hay una relación inherente de variables que sucede a medida que se producen perturbaciones no medidas en el proceso. Los
40 diferentes bucles de control PID responden a las perturbaciones no medidas y mueven muchas de las variables controladas en respuesta. Esto ha impedido históricamente siempre que los profesionales creen controladores MPC libres de la dinámica PID utilizando pruebas estándar de identificación.

45 La publicación de la patente US 2007/050053 y la solicitud PCT WO 03/060614 por el inventor aborda el tema mencionado y describe una metodología para la eliminación de la dinámica PID del modelo dinámico mediante el uso de un nuevo algoritmo matemático de matriz que intercambia las variables controladas de la posición del elemento de control final seleccionado (usualmente posiciones de la válvula) con sus correspondientes variables del punto de ajuste del controlador PID manipuladas independientemente controlables seleccionadas en el modelo lineal usando matemáticas de eliminación de filas de matriz para generar un segundo modelo lineal que tiene un nuevo
50 conjunto de variables manipuladas controlables de manera independiente, teniendo el segundo modelo la dinámica de las variables del punto de ajuste del controlador PID manipuladas independientemente controlables seleccionadas eliminadas del modelo. Este segundo modelo lineal es un modelo de bucle abierto, basado en el las posiciones del elemento de control final solamente. Como es un modelo de respuesta de impulso finito de bucle abierto, se ha demostrado que puede funcionar 50 a 100 veces más rápido que en tiempo real. El documento US
55 2007/050053 10/047,473 describe y reivindica el uso de este tipo de modelo, tanto en el control como en el desarrollo de simuladores de entrenamiento fuera de línea.

Una necesidad muy deseada pero no satisfecha en el control de procesos multivariables complejos, tales como la fabricación de productos químicos y el refinado de petróleo es el uso de un controlador adaptativo. En el pasado, la

adición de un mecanismo de adaptación al MPC ha sido abordada de diversas maneras. Los investigadores se han centrado principalmente en la actualización del modelo de proceso interno que se utiliza en el algoritmo de control. Varios artículos revisan diversos mecanismos de control adaptativos para el control de procesos no lineales (Seborg, Edgar, y Shah, 1986; Bequette, 1991; Di Marco, Semino, y Brambilla, 1997). Además, Qin y Badgwell (2000) proporcionan una buena visión general de las aplicaciones MPC no lineales que están disponibles actualmente en la industria. Como se ilustra en estos trabajos, los mecanismos de control adaptativos consideran el uso de un modelo de análisis no lineal, combinaciones de modelos empíricos lineales o una mezcla de ambos.

El documento US 2005/0149209A se refiere a un sistema de control de procesos multivariable adaptativo que utiliza dos o más modelos de entrada única y salida única (SISO) y un sistema de supervisión que detecta cambios en las entradas del proceso suficientes para iniciar un ciclo de adaptación. El supervisor determina un subconjunto de los modelos SISO a adaptarse sobre la base de qué entradas del proceso son las más correlacionadas con un error entre la salida medida y la salida del modelo. El documento US 5.740.033 se refiere a un controlador de modelo predictivo para un sistema de control de procesos, que incluye un modelador interactivo que tiene un modelo de proceso y un modelo de perturbación independiente. Un secuenciador ejecutivo proyecta un conjunto de valores de proceso futuros que se controlan y el modelador optimiza los cambios de control.

MPC utilizando modelos no lineales es probable que sea más común, ya que los usuarios exigen un mayor rendimiento y nuevas herramientas de software para que los modelos no lineales sean disponibles más fácilmente. Sin embargo, el desarrollo de adecuados modelos empíricos no lineales es muy difícil. No hay ninguna forma de modelo que sea claramente adecuada para representar los procesos generales no lineales. Desde el punto de vista teórico, el uso de un modelo no lineal cambia el problema de control desde un QP convexo a un programa no lineal (PNL) no convexo, cuya solución es mucho más difícil. No hay garantía, por ejemplo, que se pueda encontrar el óptimo global. Es importante señalar que debido a estos factores, ninguno de estos enfoques no lineales se ha implementado con éxito comercial en controladores a gran escala.

Un enfoque alternativo sería utilizar modelos de primeros principios desarrollados a partir de leyes de masa, inercia y conservación de la energía conocidas. Sin embargo, el coste de desarrollar un modelo de primeros principios razonablemente preciso es probable que sea prohibitivo hasta que nuevas herramientas de software y procedimientos de validación estén disponibles.

Una solución deseable sería un controlador adaptativo basado en modelos lineales tipo MPC, tal como modelos de control de matriz dinámica (DMC). Este enfoque sería muy conveniente para un profesional del control que ya está familiarizado con el uso de control de tipo DMC.

El reconocimiento de esta necesidad no satisfecha y un procedimiento para abordar la necesidad mediante el uso de un modelo de respuesta de impulso finito de bucle abierto con los puntos de ajuste PID y reemplazado con posiciones de elemento de control final acoplado con una metodología de control adaptativo es un aspecto de esta invención.

Breve descripción de la invención

La invención se define en la reivindicación independiente. Las características preferidas u opcionales se indican en las reivindicaciones dependientes. El concepto inventivo se puede describir de la siguiente manera: en primer lugar un procedimiento se emplea para eliminar la dinámica de los controladores PID del controlador MPC que fue creado mediante una prueba de identificación de planta. Esto permite la creación de un elemento de control final basado en un modelo FIR de bucle abierto del proceso. Este modelo se utiliza entonces para crear un controlador multivariable adaptativo.

Es un aspecto adicional de esta invención proporcionar un procedimiento que puede ser utilizado en varias implementaciones de controladores MPC.

El procedimiento se utiliza para crear este tipo de controlador adaptativo para procesos multivariable complejos que se pueden modificar con nuevas configuraciones de control normativo o ajustarse de nuevo y de hacerlo sin tener que realizar nuevas pruebas de identificación del proceso.

Un objeto de la invención se logra mediante un procedimiento para controlar un proceso que tiene una pluralidad de variables manipuladas controlables de manera independiente y al menos una variable controlada dependiente de las variables manipuladas controlables de manera independiente, que comprende las etapas de: recoger datos sobre el proceso introduciendo por separado perturbaciones de prueba en cada una de las variables manipuladas y midiendo el efecto de las perturbaciones sobre la variable controlada; utilizar los efectos de las perturbaciones en la variable controlada para generar un primer modelo lineal dinámico que relaciona la por lo menos una variable controlada con variables manipuladas controlables de manera independiente; intercambiar las variables controladas del elemento de control final con sus correspondientes variables seleccionadas del punto de ajuste del controlador PID manipuladas controlables independientemente en el primer modelo lineal dinámico utilizando las matemáticas de eliminación de filas de la matriz para generar un segundo modelo lineal dinámico que tiene un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables de forma independiente, teniendo el segundo modelo lineal dinámico la dinámica de las variables seleccionadas del punto de ajuste del controlador PID manipuladas controlables de manera

independiente a partir del segundo modelo dinámico lineal; medir el valor actual de las variables manipuladas y controladas; preestablecer limitaciones de operación para la por lo menos una variable controlada; preestablecer límites de prueba para la por lo menos una variable controlada que cae dentro de las limitaciones de operación; usar el segundo modelo dinámico lineal para calcular un primer conjunto de vectores de predicción de la por lo menos una variable controlable; colocar el segundo modelo lineal dinámico en un modo de prueba de adaptación en el que todos los controladores PID se cambian a manuales; perturbar las variables manipuladas del elemento de control final con señales de excitación al azar; calcular los intervalos discretos de tiempo a partir de los datos recogidos sobre el proceso, los valores actuales medidos y las limitaciones de operación preseleccionadas de un conjunto de movimientos para los tiempos actuales y futuros para al menos las variables manipuladas para obtener nuevos valores de las variables manipuladas y mover la al menos una variable dependiente controlable hacia por lo menos una de las limitaciones de operación; y cuando el vector de predicción se encuentra fuera de los límites de prueba para la por lo menos una variable controlada, cambiar el proceso mediante el ajuste de las variables manipuladas para el conjunto de movimientos para los tiempos actuales y futuros para hacer que el proceso se mueva a la por lo menos una variable dependiente controlable hacia por lo menos una de las limitaciones de operación.

Otro aspecto que no forma parte de la presente invención es un procedimiento para crear un simulador de procesos fuera de línea para su uso en la simulación de procesos y en simuladores de entrenamiento para un proceso mediante el uso del modelo de controlador adaptativo multivariable creado por los procedimientos acabados de describir que comprende las etapas de: portar el modelo de adaptación del controlador multivariable a cualquier ordenador; acoplar los esquemas de regulación de control para el modelo de controlador multivariable de adaptación a través de emuladores matemáticos para emular los controladores PID en modos manual, en cascada, o automático; iniciar el modelo completo con las condiciones iniciales; y resolver matemáticamente el modelo completado para predecir los estados variables futuros.

Otro aspecto que no forma parte de la presente invención es un procedimiento para la creación de un asesor de operador en línea para su uso en la simulación de procesos y para entrenar simuladores para un proceso mediante el uso del modelo de controlador adaptativo multivariable creado mediante los procedimientos descritos anteriormente, que comprende las etapas de: acoplar esquemas de regulación de control al modelo de controlador multivariable de adaptación a través de emuladores matemáticos para emular los controladores PID en modos manual, en cascada, o automático; acceder a datos en tiempo real del proceso para inicializar el modelo terminado con el estado de las variables manipuladas y controladas; inicializar la configuración y el ajuste del sistema de control reglamentario; inicializar con el estado del elemento de control final de bucle abierto los vectores de predicción; y solucionar matemáticamente el modelo completado para predecir la trayectoria futura de la por lo menos una variable controlada.

El procedimiento más común de identificación que se utiliza actualmente en los procesos de refinado de petróleo y químicos es la identificación de matriz dinámica (DMI). DMI se utilizará para ilustrar la metodología de esta invención, pero debe entenderse que la invención no se limita a una técnica de identificación específica.

Descripción de los dibujos

- La figura 1 es un esquema de flujo de un fraccionador.
- La figura 2 es una simulación del modelo de fraccionamiento sobre la base de posiciones de la válvula.
- La figura 3 demuestra los resultados de una prueba de planta del fraccionador.
- La figura 4 es una simulación del fraccionador con los controladores PID.
- La figura 5 es una demostración del fraccionador con los valores originales y recuperados.
- La figura 6 es una representación de un diagrama de flujo de las etapas de un aspecto del procedimiento de la invención.
- La figura 7 es una representación de un diagrama de flujo de las etapas de un aspecto del procedimiento de la invención.
- La figura 8 es una representación de un diagrama de flujo de las etapas de un aspecto del procedimiento de la invención.
- La figura 9 es una representación de un diagrama de flujo de las etapas de un aspecto del procedimiento de la invención.
- La figura 10 es una representación de los límites de la prueba de adaptación para una variable controlada.

Descripción detallada de la invención

La invención es un procedimiento utilizado en conjunción con el control de modelo predictivo para la eliminación de la dinámica de los controladores PID de un controlador MPC de un proceso con el fin de crear posteriormente un

$\delta O = A\Delta I$	- Usado más a menudo para los cálculos de control.
$\Delta O = B\Delta I$	- Utilizado para la identificación de las variables de estado estacionarias.
$\Delta\Delta O = B\Delta\Delta I$	- Utilizado para la identificación de las variables de rampa.
$\delta O = B\delta I$	- No es de uso común. Antigua formulación de control IDCOM.
$\Delta S = A\Delta\Delta I$	- No es de uso común.

5 C.R. Cutler y C.R. Johnston discuten las propiedades de estas formas de la matriz en un documento, "Analysis of the Forms of the Dynamic Matrix", en las Actas de la Sociedad de Instrumentos de América ISA 85 Avances en la instrumentación Volumen 40, Número 1 - 10 1985.

El uso de estas técnicas de modelado lineales, incluyendo la identificación del modelo y el uso del modelo de control y el uso en el control con restricciones se describen en dos patentes US 4.349.869 y 4.616.308.

10 Ahora vamos a derivar el algoritmo de esta invención para demostrar la eliminación de la dinámica PID (proporcional-integral-derivativa) del controlador. La derivación es a partir del modelo FIR de la ecuación 2. Para derivar el algoritmo, asumimos que la variable independiente j-ésima es el punto de ajuste de un controlador PID y la dependiente $\wedge i$ -ésima es la respuesta del elemento de control final PID a ese cambio del punto ajuste. El elemento final de control en muchos procesos es una válvula, pero puede haber otras cosas, tales como el ajuste de la velocidad en un motor. El término elemento final de control anticipa cualquiera de esos elementos que responden a un bucle de control PID. Queremos volver a constituir el modelo de manera que el elemento final de control es la variable independiente en el modelo de proceso; es decir, se desea eliminar la dinámica de este controlador PID de todas las respuestas de modelo afectadas. Esto puede lograrse mediante el intercambio de la variable dependiente $\wedge j$ -ésima con la variable dependiente $\wedge i$ -ésima, de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} B_{1,1} & \dots & B_{1,(j-1)} & B_{1,j} & B_{1,(j+1)} & \dots & B_{1,ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{(i-1),1} & \dots & B_{(i-1),(j-1)} & B_{(i-1),j} & B_{(i-1),(j+1)} & \dots & B_{(i-1),ndep} \\ B_{i,1} & \dots & B_{i,(j-1)} & B_{i,j} & B_{i,(j+1)} & \dots & B_{i,ndep} \\ B_{(i+1),1} & \dots & B_{(i+1),(j-1)} & B_{(i+1),j} & B_{(i+1),(j+1)} & \dots & B_{(i+1),ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{ndep,1} & \dots & B_{ndep,(j-1)} & B_{ndep,j} & B_{ndep,(j+1)} & \dots & B_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\bar{I}_1 \\ \vdots \\ \Delta\bar{I}_{(j-1)} \\ \Delta\bar{I}_j \\ \Delta\bar{I}_{(j+1)} \\ \vdots \\ \Delta\bar{I}_{ndep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & I & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & I & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\bar{O}_1 \\ \vdots \\ \Delta\bar{O}_{(i-1)} \\ \Delta\bar{O}_i \\ \Delta\bar{O}_{(i+1)} \\ \vdots \\ \Delta\bar{O}_{ndep} \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

en la matriz de identidad.

20 Debe tenerse en cuenta que esto no es más que la ecuación 2 anterior con una matriz de identidad multiplicando ΔO s.

Mediante la realización de las operaciones de eliminación de filas (pivote), obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} & \dots & \hat{B}_{1,(j-1)} & 0 & \hat{B}_{1,(j+1)} & \dots & \hat{B}_{1,ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),1} & \dots & \hat{B}_{(i-1),(j-1)} & 0 & \hat{B}_{(i-1),(j+1)} & \dots & \hat{B}_{(i-1),ndep} \\ \hat{B}_{i,1} & \dots & \hat{B}_{i,(j-1)} & -I & \hat{B}_{i,(j+1)} & \dots & \hat{B}_{i,ndep} \\ \hat{B}_{(i+1),1} & \dots & \hat{B}_{(i+1),(j-1)} & 0 & \hat{B}_{(i+1),(j+1)} & \dots & \hat{B}_{(i+1),ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} & \dots & \hat{B}_{ndep,(j-1)} & 0 & \hat{B}_{ndep,(j+1)} & \dots & \hat{B}_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{(j-1)} \\ \Delta \bar{I}_j \\ \Delta \bar{I}_{(j+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{ndep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \dots & 0 & -\hat{B}_{1,j} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & I & -\hat{B}_{(i-1),j} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\hat{B}_{i,j} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\hat{B}_{(i+1),j} & I & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -\hat{B}_{ndep,j} & 0 & \dots & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{O}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{(i-1)} \\ \Delta \bar{O}_i \\ \Delta \bar{O}_{(i+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{ndep} \end{bmatrix}$$

Que se puede re-escribirse como:

$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),1} \\ \hat{B}_{i,1} \\ \hat{B}_{(i+1),1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_1 + \dots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(j-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),(j-1)} \\ \hat{B}_{i,(j-1)} \\ \hat{B}_{(i+1),(j-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(j-1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(j-1)} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -I \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_j + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(j+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),(j+1)} \\ \hat{B}_{i,(j+1)} \\ \hat{B}_{(i+1),(j+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(j+1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(j+1)} + \dots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,ndep} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(i-1),ndep} \\ \hat{B}_{i,ndep} \\ \hat{B}_{(i+1),ndep} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{ndep}$$

$$= \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_1 + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(i-1)} + \begin{bmatrix} -\hat{B}_{1,j} \\ \vdots \\ -\hat{B}_{(i-1),j} \\ -\hat{B}_{i,j} \\ -\hat{B}_{(i+1),j} \\ \vdots \\ -\hat{B}_{ndep,j} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_i + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ I \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(i+1)} + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{ndep}$$

Que se puede reordenar en,

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(\hat{i}-1),1} \\ \hat{B}_{i,1} \\ \hat{B}_{(\hat{i}+1),1} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_1 + \dots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(\hat{j}-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(\hat{i}-1),(\hat{j}-1)} \\ \hat{B}_{i,(\hat{j}-1)} \\ \hat{B}_{(\hat{i}+1),(\hat{j}-1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(\hat{j}-1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(\hat{j}-1)} + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,\hat{j}} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(\hat{i}-1),\hat{j}} \\ \hat{B}_{i,\hat{j}} \\ \hat{B}_{(\hat{i}+1),\hat{j}} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,\hat{j}} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_i + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,(\hat{j}+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(\hat{i}-1),(\hat{j}+1)} \\ \hat{B}_{i,(\hat{j}+1)} \\ \hat{B}_{(\hat{i}+1),(\hat{j}+1)} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,(\hat{j}+1)} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{(\hat{j}+1)} \dots + \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,ndep} \\ \vdots \\ \hat{B}_{(\hat{i}-1),ndep} \\ \hat{B}_{i,ndep} \\ \hat{B}_{(\hat{i}+1),ndep} \\ \vdots \\ \hat{B}_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_{ndep} \\
 & = \begin{bmatrix} I \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_1 + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(\hat{i}-1)} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \times \Delta \bar{I}_j + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{(\hat{i}+1)} + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ I \end{bmatrix} \times \Delta \bar{O}_{ndep}
 \end{aligned}$$

o el montaje de la ecuación de la matriz se obtiene;

$$\begin{bmatrix} \hat{B}_{1,1} & \dots & \hat{B}_{1,(\hat{j}-1)} & \hat{B}_{1,\hat{j}} & \hat{B}_{1,(\hat{j}+1)} & \dots & \hat{B}_{1,ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{(\hat{i}-1),1} & \dots & \hat{B}_{(\hat{i}-1),(\hat{j}-1)} & \hat{B}_{(\hat{i}-1),\hat{j}} & \hat{B}_{(\hat{i}-1),(\hat{j}+1)} & \dots & \hat{B}_{(\hat{i}-1),ndep} \\ \hat{B}_{i,1} & \dots & \hat{B}_{i,(\hat{j}-1)} & \hat{B}_{i,\hat{j}} & \hat{B}_{i,(\hat{j}+1)} & \dots & \hat{B}_{i,ndep} \\ \hat{B}_{(\hat{i}+1),1} & \dots & \hat{B}_{(\hat{i}+1),(\hat{j}-1)} & \hat{B}_{(\hat{i}+1),\hat{j}} & \hat{B}_{(\hat{i}+1),(\hat{j}+1)} & \dots & \hat{B}_{(\hat{i}+1),ndep} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{B}_{ndep,1} & \dots & \hat{B}_{ndep,(\hat{j}-1)} & \hat{B}_{ndep,\hat{j}} & \hat{B}_{ndep,(\hat{j}+1)} & \dots & \hat{B}_{ndep,ndep} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{(\hat{j}-1)} \\ \Delta \bar{O}_i \\ \Delta \bar{I}_{(\hat{j}+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{I}_{ndep} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & I & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & I & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & I & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \bar{O}_1 \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{(\hat{i}-1)} \\ \Delta \bar{I}_j \\ \Delta \bar{O}_{(\hat{i}+1)} \\ \vdots \\ \Delta \bar{O}_{ndep} \end{bmatrix}$$

Se debe tener en cuenta que $\Delta \bar{O}_i$ y $\Delta \bar{I}_j$ se han intercambiado de manera que la posición del elemento de control final es ahora una variable independiente y el punto de ajuste PID es ahora una variable dependiente. Esto ilustra la eliminación de la dinámica PID de sólo un controlador PID, pero el algoritmo es claramente general en el que múltiples parejas variables independientes/dependientes se pueden intercambiar para eliminar la dinámica de múltiples controladores.

A modo de ilustración adicional, un problema ejemplo numérico se ilustrará a continuación para mostrar cómo este enfoque se aplica a un controlador de modelo predictivo para eliminar la dinámica de un controlador PID particular.

Dado un modelo FIR con dos (2) variables independientes, dos (2) variables dependientes y cuatro (4) coeficientes del modelo, donde la segunda variable independiente es el punto de ajuste de un controlador PID y la segunda variable dependiente es la posición del elemento de control final del controlador PID, se desea volver a constituir el modelo con la posición del elemento de control final PID como una variable independiente, en lugar del punto de ajuste PID. Esto requiere que la dinámica del controlador PID sea eliminada de todas las respuestas del sistema según el algoritmo descrito anteriormente. Este ejemplo también es válido para las formas $\Delta O = B\Delta I$, $\delta O = B\delta I$, y $\Delta\Delta O = B\Delta\Delta I$ formas de la ecuación.

ES 2 375 837 T3

Var-1 dependiente

Var-1 independiente Var-2 independiente

$b_{1,1,1} = 1,5$	$b_{1,2,1} = 0,5$
$b_{1,1,2} = 0,6$	$b_{1,2,2} = 0,4$
$b_{1,1,3} = 0,2$	$b_{1,2,3} = 0,2$
$b_{1,1,4} = 0,1$	$b_{1,2,4} = 0,1$

Var-2 dependiente

Var-1 independiente Var-2 independiente

$b_{2,1,1} = -0,3$	$b_{2,2,1} = 0,75$
$b_{2,1,2} = -0,4$	$b_{2,2,2} = 0,25$
$b_{2,1,3} = -0,1$	$b_{2,2,3} = 0,15$
$b_{2,1,4} = 0,05$	$b_{2,2,4} = 0,05$

5 El problema se especifica en la tabla siguiente.

Indica el elemento de pivote

1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,2	0,6	1,5	0,1	0,2	0,4	0,5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-0,05	-0,1	-0,4	-0,3	0,05	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Se multiplicar la ecuación-5 por (-1/0,75)

1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,2	0,6	1,5	0,1	0,2	0,4	0,5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0	0
-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-0,05	-0,1	-0,4	-0,3	0,05	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

ES 2 375 837 T3

Se multiplica la ecuación-5 por 0,5, se añade a la ecuación-1 y se sustituye la ecuación-1
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,4, se añade a la ecuación-2 y se sustituye la ecuación-2
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,2, se añade a la ecuación-3 y se sustituye la ecuación-3
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,1, se añade a la ecuación-4 y se sustituye la ecuación-4
 5 Se multiplica la ecuación-5 por 0,25, se añade a la ecuación-6 y se sustituye la ecuación-6
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,15, se añade a la ecuación-7 y se sustituye la ecuación-7
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,05, se añade a la ecuación-8 y se sustituye la ecuación-8

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	-0,533	0	0	0
0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	0	-0,267	0	0	0
0,14	0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	-0,133	0	0	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	0	-0,333	1	0	0
-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	-0,2	0	1	0
-0,03	-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	-0,067	0	0	1

Se multiplica la ecuación-6 por (-1/0,75)

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	0	0	-0,533	0	0	0
0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	0	-0,267	0	0	0	
0,14	0,2	0,6	1,5	0	0,2	0,4	0,5	0	0	0	1	-0,133	0	0	0	
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0	
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0	
-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	-0,2	0	1	0	
-0,03	-0,1	-0,4	-0,3	0	0,15	0,25	0,75	0	0	0	0	-0,067	0	0	1	

10

Se multiplica la ecuación-5 por 0,5, se añade a la ecuación-2 y se sustituye la ecuación-2
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,4, se añade a la ecuación-3 y se sustituye la ecuación-3
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,2, se añade a la ecuación-4 y se sustituye la ecuación-4
 Se multiplica la ecuación-5 por 0,25, se añade a la ecuación-7 y se sustituye la ecuación-7
 15 Se multiplica la ecuación-5 por 0,15, se añade a la ecuación-8 y se sustituye la ecuación-8

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	-0,089	-0,533	0	0
0,22	0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	-0,044	-0,267	0	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
0,06	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0	-0,089	-0,333	1	0
0,03	-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	-0,2	0	1

ES 2 375 837 T3

Se multiplica la ecuación-7 por $(-1/0,75)$

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0	-0,089	-0,533	0	0
0,22	0,28	0,6	1,5	0	0	0,4	0,5	0	0	0	1	-0,044	-0,267	0	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,4444	-1,333	0
0,03	-0,04	-0,4	-0,3	0	0	0,25	0,75	0	0	0	0	0	-0,2	0	1

Se multiplica la ecuación-5 por 0,5, se añade a la ecuación-3 y se sustituye la ecuación-3

Se multiplica la ecuación-5 por 0,4, se añade a la ecuación-4 y se sustituye la ecuación-4

5 Se multiplica la ecuación-5 por 0,25, se añade a la ecuación-8 y se sustituye la ecuación-8

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
0,188	0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,003	-0,089	-0,533	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,444	-1,333	0
0,01	0,06	-0,3	-0,3	0	0	0	0,75	0	0	0	0	0,030	-0,089	-0,333	1

Se multiplica la ecuación-8 por $(-1/0,75)$

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
0,188	0,44	0,76	1,5	0	0	0	0,5	0	0	0	1	0,003	-0,089	-0,533	0
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,444	-1,333	0
-0,013	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0,040	0,119	0,444	-1,333

ES 2 375 837 T3

Se multiplica la ecuación-5 por 0,5, se añade a la ecuación-4 y se sustituye la ecuación-4

1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-0,667	0	0	0
0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-0,311	-0,667	0	0
0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-0,030	-0,311	-0,667	0
0,181	0,4	0,96	1,7	0	0	0	0	0	0	0	1	-0,017	-0,030	-0,311	-0,667
0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1,333	0	0	0
0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0,444	-1,333	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0,119	0,444	-1,333	0
-0,013	-0,08	0,4	0,4	0	0	0	-1	0	0	0	0	-0,040	0,119	0,444	-1,333

Reorganizando las ecuaciones

1,7	0	0	0	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0,96	1,7	0	0	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0,4	0,96	1,7	0	0,030	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0,181	0,4	0,96	1,7	0,017	0,030	0,311	0,667	0	0	0	1	0	0	0	0
0,4	0	0	0	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0,4	0,4	0	0	-0,444	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-0,08	0,4	0,4	0	-0,119	-0,444	1,333	0	0	0	0	0	0	0	1	0

5

Los coeficientes del nuevo modelo con la dinámica de PID retirada son los siguientes:

Var-1 dependiente

Var-1 independiente	Var-2 independiente
$b^{1,1,1} = 1,7$	$b^{1,2,1} = 0,667$
$b^{1,1,2} = 0,96$	$b^{1,2,2} = 0,311$
$b^{1,1,3} = 0,4$	$b^{1,2,3} = 0,030$
$b^{1,1,4} = 0,181$	$b^{1,2,4} = 0,017$

Var-2 dependiente

Var-1 independiente	Var-2 independiente
$b^{2,1,1} = 0,4$	$b^{2,2,1} = 1,333$
$b^{2,1,2} = 0,4$	$b^{2,2,2} = -0,444$
$b^{2,1,3} = -0,08$	$b^{2,2,3} = -0,119$
$b^{2,1,4} = -0,0133$	$b^{2,2,4} = 0,040$

10

Debe tenerse en cuenta que todos los valores de los coeficientes cambiaron. Este nuevo controlador tiene ahora la dinámica de la segunda variable independiente (punto de ajuste PID) eliminada. Este controlador se puede utilizar

ahora para controlar el proceso y el desarrollo de este controlador se ha hecho fuera de línea sin tener que hacer pruebas de identificación adicionales que son caras y consumen tiempo en el proceso.

La misma metodología se ha derivado para eliminar la dinámica PID de la forma de respuesta de la etapa de bucle abierto de la ecuación. Se muestra en el documento US 2007/050053 del inventor y no se repetirá aquí.

5 Ejemplo de simulación de columna

Un ejemplo de uso del algoritmo se demuestra en el siguiente ejemplo. Estos ejemplos ilustrarán lo siguiente:

El uso de un modelo de respuesta de impulso finito (1 = IR) basado en el elemento final de control como un simulador de procesos para su uso como un asesor en línea o un simulador de entrenamiento fuera de línea.

10 La prueba de etapa de la planta y la identificación de un modelo FIR se basa en una configuración de control reglamentario específico.

El uso del algoritmo propuesto elimina la dinámica del controlador PID y recupera el modelo basado en el elemento de control final subyacente.

15 En este ejemplo, un modelo FIR sobre la base de las posiciones de la válvula se utiliza como modelo de proceso para simular el comportamiento de un fraccionador complejo. El control reglamentario del fraccionador consiste en tres controladores de retroalimentación PI (proporcional/integral). Una prueba de etapa de la planta se realiza en simulación utilizando los puntos de control reglamentarios establecidos. Un modelo FIR se obtiene entonces para el fraccionador sobre la base de los puntos de ajuste de los controladores PI. Este modelo basado en el esquema de control reglamentario después se introduce en el algoritmo para eliminar la dinámica del regulador PI y recuperar el modelo original del proceso FIR.

20 Cabe señalar que el modelo de plazo de respuesta de impulso finito (FIR) se utiliza para referirse a la forma de respuesta de etapa de bucle abierto de los modelos, ya que la forma de la etapa puede calcularse directamente a partir de los coeficientes de impulso.

Descripción del esquema fraccionador complejo

25 El esquema para el fraccionador complejo se muestra en la figura 1. El caudal de alimentación 5 está controlado por la unidad anterior y se precalienta en un horno 6. El fraccionador 7 tiene un producto superior, medio e inferior. La temperatura superior del fraccionador se controla con un controlador PI 8 que mueve el reflujo superior. La temperatura de retirada del producto medio se controla con un controlador PI 9 que mueve el índice de retirada del producto medio. Un tercer controlador PI 10 mueve el índice del producto final para controlar el nivel de fondo del fraccionador. La composición del fondo (componente de luz) se mide con un analizador 11.

30 Descripción del modelo de respuesta de impulso finito (FIR)

El modelo de proceso que se utiliza en este ejemplo es un modelo de respuesta de etapa de bucle abierto sobre la base de las posiciones de la válvula, que se resumen como sigue:

Variables independientes del modelo

- 35 TIC-2001.OP - Válvula de flujo de reflujo superior
 TIC-2002.OP - Válvula de flujo de producto medio
 LIC-2007.OP - Válvula de flujo de producto inferior
 FIC-2004.SP - Caudal de reflujo medio
 FI-2005.PV - Índice de alimentación del fraccionador

Variables dependientes del modelo

- 40 TIC-2001.PV - Temperatura superior del fraccionador
 TIC-2002.PV - Temperatura de retirada del producto medio
 LIC-2007.PV - Nivel inferior del fraccionador
 AI-2022.PV - Composición inferior del fraccionador (componente de luz)

45 El modelo de respuesta de etapa de bucle abierto se puede ver en un sentido idealizado como que se genera de la siguiente manera. Con el sistema en estado estacionario, las primeras variables independientes se incrementan en una unidad de ingeniería en el tiempo = 0, mientras que se mantienen todas las otras variables independientes constantes. Los valores de todas las variables dependientes se miden entonces en intervalos de tiempo equidistantes hasta que el sistema alcanza el estado estacionario de nuevo. Las curvas de respuesta del modelo para cada variable dependiente respecto a la primera variable independiente se calculan entonces restando el valor de la variable dependiente en el tiempo = 0 de cada uno de los valores medidos en cada intervalo de tiempo futuro para esas variables dependientes. En esencia, una curva de respuesta al de etapa representa el efecto sobre la variable dependiente de un cambio en la variable independiente. Este proceso se repite sucesivamente para todas

las variables independientes para generar el modelo completo. El tiempo en estado estacionario para el modelo se define por el tiempo de estado estacionario de la curva de respuesta más lenta en el sistema.

5 Es evidente que en el mundo real el modelo no se puede generar de esta manera, ya que muchas veces el proceso no está en estado estacionario. Además, es imposible evitar que las perturbaciones medidas y no medidas afecten el sistema durante una etapa variable independiente. La generación del modelo requiere de varias etapas se realicen en cada variable independiente (prueba de etapa de la planta). Los datos así recogidos se analizan con un paquete de software, tal como el programa DMCplus Model de AspenTech para calcular el modelo de respuesta de etapa de bucle abierto.

10 Una vez que este modelo ha sido identificado, puede ser utilizado para predecir la respuesta del sistema futuro basado en los cambios pasados en las variables independientes. Es decir, si sabemos cómo todas las variables independientes han cambiado a un estado de tiempo estacionario en el pasado, podemos utilizar el modelo para predecir cómo las variables dependientes van a cambiar a un estado de tiempo estacionario en el futuro, suponiendo que no haya más cambios de variables independientes. Esto ilustra el uso del modelo de predicción. (Esta es la base para el uso de un modelo FIR como un simulador de procesos).

15 Dada la respuesta del sistema futura prevista basada en no más cambios de variables independientes y dadas las restricciones en todas las variables dependientes e independientes, el modelo se puede utilizar para planificar una estrategia de movimiento de la variable independiente para mantener todas las variables independientes y dependientes dentro de las limitaciones. Esto ilustra el uso del modelo de control. El uso de un modelo de respuesta de impulso finito (FIR) como modelo de un simulador de procesos.

20 El modelo de este ejemplo tiene un tiempo de estado estacionario de noventa (90) minutos. Se utiliza un intervalo de tiempo de tres (3) minutos. Las curvas de respuesta resultantes están cada una definida por un vector de treinta (30) números que representa el cambio acumulativo en esa variable dependiente a través del tiempo respecto a un cambio en la variable independiente en el tiempo = 0, mientras que se mantienen todas las otras variables independientes constantes.

25 Los coeficientes del modelo se muestran en la Tabla 1 y los trazados del modelo se muestran en la figura 2. Este modelo, basado en las posiciones de la válvula, se utiliza para predecir el comportamiento del sistema en el futuro de las variables en función del modelo basado en los cambios pasados y presentes de las variables independientes del modelo.

Tabla 1: Coeficientes del modelo basados en la válvula de simulación del fraccionador

30

Coeficientes de respuesta de etapa de la variable dependiente-1: TIC-2001.PV $\text{ }^{\circ}\text{F}$					
Minutos	TIC-2001.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	LIG-2007.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	FIC-2004.SP+1 MBBLD movimiento en el tiempo = 0	FI-2005.PV +1 MBBLD movimiento en el tiempo = 0
0	0,000	0,000	0,0	0,00	0,0
3	-0,101	-0,048	0,0	-2,05	2,9
6	-0,175	-0,076	0,0	-3,58	6,1
9	-0,206	-0,088	0,0	-4,43	7,5
12	-0,227	-0,068	0,0	-5,03	7,8
15	-0,245	-0,040	0,0	-5,58	8,2
18	-0,262	-0,015	0,0	-6,16	8,5
21	-0,277	0,010	0,0	-6,65	8,6
24	-0,292	0,033	0,0	-7,04	8,9
27	-0,306	0,054	0,0	-7,37	9,0
30	-0,323	0,069	0,0	-7,67	9,3
33	-0,340	0,084	0,0	-7,95	9,5

ES 2 375 837 T3

(Continuación)

36	-0,356	0,096	0,0	-8,18	9,6
39	-0,372	0,105	0,0	-8,37	9,8
42	-0,386	0,113	0,0	-8,52	9,8
45	-0,399	0,121	0,0	-8,65	9,8
48	-0,410	0,128	0,0	-8,75	9,9
51	-0,420	0,135	0,0	-8,84	10,0
54	-0,428	0,140	0,0	-8,92	10,1
57	-0,435	0,145	0,0	-8,98	10,3
60	-0,440	0,149	0,0	-9,04	10,4
63	-0,445	0,153	0,0	-9,09	10,5
66	-0,450	0,156	0,0	-9,13	10,5
69	-0,453	0,159	0,0	-9,17	10,5
72	-0,457	0,161	0,0	-9,21	10,5
75	-0,460	0,163	0,0	-9,24	10,4
78	-0,462	0,165	0,0	-9,26	10,4
81	-0,464	0,166	0,0	-9,28	10,4
84	-0,465	0,167	0,0	-9,29	10,4
87	-0,466	0,167	0,0	-9,29	10,4
90	-0,466	0,167	0,0	-9,29	10,5
Coeficientes de respuesta de etapa de variable dependiente-2: TIC-2002.PV F					
Minutos	TIC-2001.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	FIC-2007.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	FIC-2004.SP+1 MBBUD movimiento en el tiempo = 0	FI-2005.PV+1 MBb/O Movimiento en el tiempo = 0
0	0,000	0,000	0,0	0,00	0,00
3	-0,002	0,020	0,0	-0,28	0,46
6	-0,008	0,052	0,0	-0,73	1,06
9	-0,012	0,081	0,0	-1,26	1,62
12	-0,021	0,118	0,0	-1,77	2,63
15	-0,032	0,157	0,0	-2,23	3,12
18	-0,046	0,201	0,0	-2,64	3,34
21	-0,061	0,242	0,0	-3,06	3,50
24	-0,077	0,277	0,0	-3,40	3,69
27	-0,097	0,308	0,0	-3,67	4,05
30	-0,117	0,335	0,0	-3,93	4,18
33	-0,136	0,360	0,0	-4,19	4,22

ES 2 375 837 T3

(Continuación)

36	-0,153	0,380	0,0	-4,42	4,26
39	-0,170	0,396	0,0	-4,62	4,33
42	-0,186	0,407	0,0	-4,78	4,46
45	-0,201	0,416	0,0	-4,90	4,55
48	-0,214	0,423	0,0	-4,99	4,61
51	-0,225	0,430	0,0	-5,07	4,64
54	-0,236	0,436	0,0	-5,13	4,70
57	-0,245	0,440	0,0	-5,19	4,77
60	-0,253	0,445	0,0	-5,23	4,85
63	-0,260	0,449	0,0	-5,27	4,90
66	-0,266	0,452	0,0	-5,30	4,94
69	-0,272	0,455	0,0	-5,33	4,96
72	-0,276	0,458	0,0	-5,36	4,98
75	-0,279	0,460	0,0	-5,38	4,98
78	-0,282	0,462	0,0	-5,40	4,99
81	-0,284	0,463	0,0	-5,42	5,00
84	-0,285	0,464	0,0	-5,44	5,01
87	-0,285	0,465	0,0	-5,45	5,02
90	-0,285	0,465	0,0	-5,46	5,04
Coeficientes de respuesta de etapa de variable dependiente-3: LIC-2001.PV%					
Minutos	TIC-2001.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	LIC-2007.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	FIG-2004.SP +1 MBbl/D movimiento en el tiempo = 0	FI-2005.PV +1 MBbl/D movimiento en el tiempo = 0
0	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0
3	0,00	0,00	-0,8	0,0	2,3
6	0,00	0,00	-1,5	0,0	4,5
9	0,11	-0,23	-2,3	1,1	6,8
12	0,23	-0,45	-3,0	2,3	9,0
15	0,34	-0,68	-3,8	3,4	11,3
18	0,45	-0,90	-4,5	4,5	13,5
21	0,56	-1,13	-5,3	5,6	15,8
24	0,68	-1,35	-6,0	6,8	18,0
27	0,79	-1,58	-6,8	7,9	20,3
30	0,90	-1,80	7,5	9,0	22,5
33	1,01	-2,03	-8,3	10,1	24,8

ES 2 375 837 T3

(continuación)

36	1,13	-225	-9,0	11,3	27,0
39	1,24	-2,48	-9,8	12,4	29,3
42	1,35	-270	-10,5	13,5	31,5
45	1,46	-2,93	-11,3	14,6	33,8
48	1,58	-3,15	-120	15,8	36,0
51	1,69	-3,38	-12,8	16,9	38,3
54	1,80	-3,60	-13,5	18,0	40,5
57	1,91	-3,83	-14,3	19,1	42,8
60	203	-4,05	-15,0	20,3	45,0
63	214	-4,28	-15,8	21,4	47,3
66	2,25	-4,50	-16,5	22,5	49,5
69	236	-4,73	-17,3	23,6	51,8
72	248	-4,95	-18,0	24,8	54,0
75	2,59	-5,18	-18,8	25,9	56,3
78	2,70	-5,40	-19,5	27,0	58,5
81	2,81	-5,63	-20,3	28,1	60,8
84	2,93	-5,85	-21,0	29,3	63,0
87	3,04	-6,08	-21,8	30,4	65,3
90	3,15	-6,30	-22,5	31,5	67,5
Coeficientes de respuesta de etapa variable dependiente-4: AI-2022.PV MOLE%					
Minutos	TIC-2001.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	TIC-2002.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	LIC-2007.OP +1% movimiento en el tiempo = 0	FIC-2004.SP +1 MBbl/D movimiento en el tiempo = 0	FI-2005.PV +1 MBbl/D movimiento en el tiempo = 0
0	0,00000	0,0000	0,0	0,000	0,000
3	0,00004	0,0004	0,0	0,004	-0,010
6	0,00010	0,0005	0,0	0,008	-0,073
9	-0,00014	0,0008	0,0	0,017	-0,076
12	-0,00006	-0,0007	0,0	0,037	-0,105
15	-0,00003	-0,0034	0,0	0,060	-0,112
18	0,00013	-0,0062	0,0	0,090	-0,104
21	0,00033	-0,0087	0,0	0,114	-0,113
24	0,00075	-0,0109	0,0	0,134	-0,126
27	0,00125	-0,0125	0,0	0,152	-0,124
30	0,00193	-0,0137	0,0	0,165	-0,130
33	0,00277	-0,0145	0,0	0,175	-0,134
36	0,00368	-0,0151	0,0	0,183	-0,137
39	0,00459	-0,0157	0,0	0,189	-0,144

(continuación)

42	0,00542	-0,0161	0,0	0,194	-0,154
45	0,00615	-0,0164	0,0	0,199	-0,161
48	0,00679	-0,0167	0,0	0,203	-0,162
51	0,00733	-0,0170	0,0	0,206	-0,162
54	0,00778	-0,0172	0,0	0,208	-0,163
57	0,00815	-0,0174	0,0	0,211	-0,165
60	0,00846	-0,0175	0,0	0,213	-0,168
63	0,00872	-0,0177	0,0	0,214	-0,171
66	0,00893	-0,0178	0,0	0,216	-0,173
69	0,00911	-0,0179	0,0	0,217	-0,175
72	0,00926	-0,0180	0,0	0,218	-0,176
75	0,00938	-0,0181	0,0	0,219	-0,176
78	0,00948	-0,0182	0,0	0,220	-0,175
81	0,00956	-0,0182	0,0	0,221	-0,175
84	0,00962	-0,0183	0,0	0,222	-0,175
87	0,00966	-0,0184	0,0	0,222	-0,175
90	0,00967	-0,0185	0,0	0,223	-0,175

Tal como se mencionó anteriormente, existen tres controladores PI (Proporcional/Integral) en el sistema. Estos controladores PI se configuran de la siguiente manera:

5 Tabla 2: Los controladores PID fraccionador

Nombre Bucle PID	Punto de Ajuste	Variable de proceso	Salida	K _p	K _i
Temperatura superior	TIC-2009.SP	TIC-2001.PV	TIC-2001.OP	-2,0	3,0
Temperatura de retirada del producto medio	TIC-2002.SP	TIC-2002.PV	TIC-2002.OP	3,0	8,0
Nivel inferior	LIC-2001.SP	LIC-2001.PV	LIC-2007.OP	-1,0	4,0

Se realizó una prueba de la planta (trazados de datos en la figura 3) con estos controladores PI que regulan el proceso. Las variables dependientes e independientes para el sistema son las siguientes:

Modelo de variables independientes

- 10 TIC-2001.SP - Flujo de reflujo superior válvula SP
- TIC-2002.SP – Flujo de producto medio válvula SP
- LIC-2007.SP – Flujo de producto inferior válvula SP
- FIC-2004.SP - Caudal de reflujo medio
- FI-2005.PV - Velocidad de alimentación del fraccionador

15 Modelo de variables dependientes

- TIC-2001.PV - Temperatura superior del fraccionador
- TIC-2002.PV - Temperatura de retirada del producto media
- LIC-2007.PV – Nivel inferior del fraccionador
- 20 TIC-2001.OP - Flujo de reflujo superior de la válvula
- TIC-2002.OP - Flujo de producto medio de la válvula

LIC-2007.OP – Flujo de producto inferior de la válvula
 AI-2022.PV - Composición inferior del fraccionador (componente de luz)

5 Este ejemplo ilustra el uso de un modelo FIR basado en el elemento final de control como un simulador de procesos. Tal como se describió anteriormente, los cálculos de control PID se llevaron a cabo externos a la simulación del proceso.

Los datos obtenidos fueron analizados y un modelo basado en esta configuración PID fue identificado, tal como se muestra en la figura 4.

10 El nuevo algoritmo para eliminar la dinámica de PID se aplicó al modelo mostrado en la figura 4, y este modelo con la dinámica PID eliminada se comparó con el modelo de simulación original. Tal como se puede observar en la figura 5, el algoritmo recupera con éxito el modelo basado en el elemento final de control. Debe tenerse en cuenta que el tiempo de estado estacionario del modelo recuperado es más largo que el tiempo de estado estacionario del modelo original. Este es un resultado de un tiempo de estado estacionario más largo para el modelo con los controladores PID. El modelo de simulación basado en elemento final de control original tenía un tiempo el estado estacionario de 90 minutos.

15 Cuando los controladores PID fueron configurados y se realizó la prueba de etapa de planta, tomó 180 minutos para que el proceso alcanzara el estado estacionario, debido a tener que esperar a que el control de retroalimentación PID se estabilizara. El tiempo de estado estacionario del modelo basado en el elemento de control final tiene el mismo tiempo de estado estacionario que el modelo que contiene la dinámica PID a partir del cual se generó. Se puede observar, sin embargo, que el modelo recuperado ha alcanzado el estado estacionario en 90 minutos, y si se trunca en ese punto, se correspondería exactamente con el modelo basado en el elemento final de control original.

Controlador multivariable adaptativo (AMC)

25 La capacidad para crear un controlador multivariable con un modelo rápido de bucle abierto que sustituye a los controladores PID y sus puntos de ajuste con sus elementos finales de control permite el desarrollo adicional de un controlador adaptativo multivariable, tal como se describe ahora. Estos dos elementos, la velocidad del modelo, y la eliminación de los puntos de ajuste PID como variables independientes, son cruciales para permitir el desarrollo de un AMC.

30 La velocidad del modelo abierto FIR permite que la frecuencia del control del controlador multivariable sea suficiente para manejar las perturbaciones en el proceso, que normalmente son manejadas por los controladores PID. Cuando el controlador multivariable se enciende, los controladores PID se colocan en manual y el controlador multivariable mueve las válvulas.

35 El factor crítico en el desarrollo de un AMC es la integración de los componentes de una manera específica para crear la sinergia necesaria. El concepto inventivo integrado se puede ver esquemáticamente en la figura 6, mostrado en general por el número 50. Una prueba de identificación de planta se puede realizar (etapa 60) con cualquier configuración regulatoria estable y ajuste PID y un modelo correspondiente se puede obtener. Durante esta prueba, las posiciones individuales de los elementos finales de control (por ejemplo, posiciones de las válvulas) se miden como variables. Durante este proceso, la gran respuesta no lineal de los elementos finales de control se hace efectivamente lineal mediante el uso de enfoques tales como transformadas lineales a modo de pieza (que se describen más adelante). El algoritmo para eliminar la dinámica PID se aplica entonces (etapa 70) al modelo resultante para eliminar la dinámica de todos los controladores PID y convertir las entradas del modelo de puntos de ajuste PID a válvulas o elementos de control final. Este es ahora un modelo de bucle abierto FIR en el que las posiciones de los elementos de control final son variables independientes. La tercera etapa consiste entonces en utilizar este modelo para construir un controlador multivariable basado en este modelo y su integración en el sistema de control distribuido (DCS) de la consola del proceso. Estas primeras tres etapas representan la fase de inicialización del controlador multivariable de adaptación. En este momento todavía no existe un control adaptativo.

45 La identificación de la planta de la etapa 60 de la figura 6 se muestra con más detalle en la figura 7 en las etapas mostradas en general como el número 100. En la etapa 105, cada variable independiente es perturbada. A pesar de que perturbar una variable a la vez podría hacer esto, en la práctica varias variables se perturban a la vez. Además, para evitar la correlación de las variables, diferentes combinaciones de variables son perturbadas cada vez. En la etapa 110, como las variables independientes se cambian, los valores de las variables dependientes se miden y se registran en intervalos de tiempo equidistantes. A partir de las curvas de respuesta de la etapa, se obtienen los coeficientes de una matriz dinámica lineal de bucle abierto (etapa 115) de una manera directa. Tal como se mencionó anteriormente, esto puede tomar la forma de un modelo de respuesta de etapa (SRM) o tomando derivadas numéricas de cada curva se producirán coeficientes de un modelo de respuesta de impulso finito (FIR). La invención prevé que cualquiera de estas formas se pueda utilizar.

55 Un problema fundamental que se aborda durante esta etapa de identificación es que los elementos de control final, particularmente las válvulas de control, son muy lineales. La transformación de la relación no lineal en una relación lineal, que puede ser adecuadamente modelada facilita la creación del modelo de bucle abierto, manteniendo la linealidad del modelo FIR que se invierte usando la eliminación de las filas de la matriz. Las válvulas de control se

pueden caracterizar de acuerdo a sus características de flujo inherentes, que describen la velocidad de flujo a través de la válvula en función de la posición de la válvula, con una caída de presión constante a través de la válvula. Estas características se describen como sensibilidad decreciente, constante o creciente. Cuando las válvulas de control se combinan con otros equipos (tubos, placas de orificio, curvas, etc.), las características de caudal instalado difieren de las características inherentes de cualquier elemento en el sistema. Los efectos de las resistencias resultantes de los tubos, placas de orificio, u otros equipos en serie con la válvula de control y la variación de la cabeza disponible con una velocidad de flujo afectan a la relación entre el flujo y el vástago. Las características de la válvula de control instalada se puede aproximar mediante curvas lineales o parabólicas o con bastante frecuencia un enfoque más simple es usar una transformada lineal a modo de pieza (PWL), ya que es más fácil de prescribir exactamente la forma deseada de la transformación - las aproximaciones lineales y parabólicas a menudo no se ajustan a todo el rango operativo deseado. El software de identificación comercial disponible para los profesionales contiene muchas transformaciones estándar, incluyendo las transformadas de válvula lineales y parabólicas, así como la transformada PWL de manera que los datos de proceso se puede linealizar antes de identificar los modelos FIR.

Los detalles de la etapa 70 de la figura 6 se muestran ahora en la figura 8 en las etapas mostradas en general como el número 150. Comenzando con el modelo lineal desarrollado en la etapa 115 de la figura 7, la etapa 160 describe el algoritmo matemático que intercambia las variables controladas de la posición del elemento de control final seleccionado con sus correspondientes variables del punto de ajuste del controlador PID manipulado controlable de manera independiente seleccionadas en el primer modelo lineal dinámico utilizando las matemáticas de eliminación de las filas de la matriz para generar un segundo modelo lineal dinámico que tiene un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables de manera independiente, teniendo el segundo modelo lineal dinámico la dinámica de las variables del punto de ajuste del controlador PID manipuladas controlables independientemente seleccionadas, eliminadas del segundo modelo dinámico. Ese segundo modelo lineal se puede utilizar ahora para construir un controlador multivariable basado en este modelo e integrarlo en la consola del sistema de control distribuido (DCS) del proceso. Este modelo es un modelo de transformación completa de la válvula.

La fase de adaptación se muestra a partir de la figura 9, que se muestra en general con el número 180. En la etapa 182 con el proceso funcionado bajo el control de los controladores PID de todo el modelo de transformación de las válvulas desarrollado tal como se ha descrito anteriormente se utiliza para desarrollar vectores de la predicción en el futuro. La etapa de adaptación 184 empieza entonces colocando el controlador en un modo de prueba de adaptación en la que todos los controladores PID se cambian a manual. En el modo de prueba de adaptación, los elementos variables de control final y los límites de prueba variables controlados se modifican en la etapa 186 mediante la generación de señales aleatorias de excitación que perturban esas variables. Debe tenerse en cuenta que estas variables manipuladas son principalmente las posiciones del elemento de control final. Además, los límites de control variable de la prueba se cambian de manera aleatoria. Para esta prueba de adaptación, los límites de la prueba están dentro de los límites reales variables controlados de la planta y sólo se consideran durante la prueba. Los cambios aleatorios en las variables manipuladas y límites de prueba variables controlados se imponen en el controlador multivariable en la etapa 188. El cálculo del controlador se hace entonces con los límites de prueba ajustados a su movimiento aleatorio. Cuando el vector de predicción para cada una de las variables controladas se encuentra dentro de los límites de prueba, etapa 190, los factores ponderados de las ecuaciones que representan el vector de predicción se ajustan a cero de tal manera que el controlador considera la amplitud de los límites de las pruebas como puntos de referencia para el controlador. Cuando la predicción está fuera de los límites de prueba, será aplicada la ponderación que normalmente se suministra para la región. A continuación, las variables manipuladas son ajustadas, etapa 192, para hacer que el proceso mueva las variables controladas hacia sus limitaciones predefinidas. En efecto, el controlador sólo reaccionará cuando el valor esperado de una variable controlada está fuera de los límites de la prueba. Como la adaptación continúa, se obtienen nuevos datos del proceso respecto a los elementos de control final (por ejemplo, nuevos datos sobre las posiciones de válvula de control en comparación con las velocidades de flujo). Estos datos pueden ser utilizados para actualizar periódicamente las transformaciones lineales a modo de pieza en cada uno de los elementos finales de control para que representen el comportamiento real del proceso. Todo esto es posible porque el modelo de bucle abierto FIR descrito anteriormente es muy rápido y es totalmente capaz de mantenerse a la vanguardia de la dinámica del proceso.

La figura 10, que se muestra generalmente como el número 200, muestra gráficamente el concepto de límites de prueba de adaptación 202 establecidos entre los límites exteriores superiores e inferiores 204 de una variable controlada (CV) particular. Los límites exteriores superiores e inferiores 204 también pueden representar las restricciones de la variable controlada. Los límites de la prueba de adaptación 202 también pueden ser perturbados, como parte de la estrategia de adaptación.

Como procedimiento alternativo a veces puede ser deseable excitar de manera aleatoria no los elementos de control final, sino las variables que realizan. Por ejemplo, puede ser deseable excitar la velocidad de flujo a través de una válvula de control como la variable manipulada, en vez de la propia válvula de control. Como la relación matemática entre el flujo y la posición de la válvula se conoce a partir de las transformaciones lineales a modo de pieza que se han descrito anteriormente, esto también se puede hacer y es otro aspecto de la invención.

Con el controlador multivariable funcionando con todo el modelo de válvula de transformación, se eliminan los principales obstáculos para la implementación exitosa del control adaptativo multivariable.

El primer impedimento eliminado es el alto ruido inherente a los controladores MPC tradicionales. La eliminación de los controladores PID como subcontroladores a partir del controlador multivariable resulta en una reducción significativa en la medición del ruido creado por la interacción de los controladores PID. La reducción del ruido aumenta la relación entre la señal y el ruido, que es un parámetro clave en la obtención de un buen modelo.

5 El segundo impedimento eliminado con el concepto de la invención es la alta correlación de datos que normalmente existe entre el comportamiento del controlador multivariable con su modelo dinámico existente y las señales de excitación. Para asegurar que este impedimento es eliminado, parte del AMC debe mover los puntos de ajuste y los límites en el controlador multivariable de adaptación de manera aleatoria. Con el tradicional controlador multivariable cerrado, la eliminación de la correlación moviendo de forma aleatoria los puntos de ajuste y los límites resulta en que
10 muchas de las salidas de los controladores PID estén en sus límites superiores o inferiores en un alto porcentaje de tiempo. Cuando una señal de salida de un controlador PID llega a un límite tal que la válvula está completamente abierta o cerrada, el efecto sobre el modelo dinámico de la planta es el mismo que un cambio del controlador a manual. El cambio en la configuración del controlador PID provoca una discontinuidad en las matemáticas para identificar el modelo dinámico. El resultado del cambio en la configuración es que los datos se pierden durante el
15 tiempo que la válvula está abierta o cerrada, más el tiempo para el estado estacionario para el proceso después de que la válvula del controlador PID vuelve a su rango normal de operación. Pero con todas las válvulas del controlador adaptativo multivariable en manual, la pérdida de datos de las válvulas de saturación no se produce.

El tercer impedimento eliminado con este concepto de la invención es la invalidación frecuente del modelo que a menudo ocurre con los tradicionales controladores multivariables. Con el controlador multivariable tradicional cerrado (puntos de ajuste como variables manipuladas), la saturación de las válvulas durante el modo de prueba del AMC no sólo crea problemas para las matemáticas de identificación, sino que también crea problemas para el controlador multivariable mediante la invalidación de su modelo. El modelo abierto en un AMC nunca será invalidado mediante la saturación de las válvulas, porque tal como se ha mencionado, las válvulas están en modo manual y por diseño nunca se saturan.
20

El cuarto impedimento eliminado por el concepto de la invención se debe a la relativa facilidad de actualización de las transformaciones de la válvula debido a que las válvulas son variables independientes. La actualización de las transformaciones de la válvula es tan crítica como la actualización de los modelos de respuesta de etapa. La actualización de las transformaciones de la válvula utilizando un procedimiento lineal a modo de pieza es mucho más simple y menos propensa a errores cuando las válvulas son las variables independientes. La acción del controlador PID en la respuesta a su interacción con otros controladores PID hace que la medición de proceso del controlador (PV) y la salida del controlador (OP) sean inciertas o ruidosas. La base de la transformación no lineal es la correlación entre los PVs y las OPs, lo que conduce a transformaciones más pobres cuando los controladores PID están activos.
25
30

Es importante hacer hincapié en la importancia de tener ahora un modelo de bucle proceso abierto que se basa en un elemento final de control. Un controlador de modelo predictivo de modelo tradicional usa las mediciones del proceso para la actualización de la predicción del futuro estado del proceso, pero en los casos donde las válvulas están saturadas, la predicción se invalida y los datos tienen que ser ignorados. Con un modelo de bucle abierto que se basa en los elementos de control final en lugar de los puntos de ajuste PID, la predicción se mantiene en todo momento, independientemente de lo que está sucediendo a los controladores PID en el fondo. Así, el modelo de adaptación aquí descrito puede ser utilizado para la creación de vectores de predicción para los controladores multivariables predictivos sin preocuparse por la saturación de la válvula o cambios en la configuración del control reglamentario o de ajuste. Esta capacidad no ha estado previamente disponible.
35
40

Con el modelo de adaptación rápida que acabamos de describir a disposición, dos realizaciones son posibles ahora. En primer lugar, el modelo de controlador multivariable adaptativo puede ser acoplado a una emulación del sistema de control PID y portado a cualquier ordenador y se utiliza como un simulador fuera de línea para la formación del operador o la evaluación de ingeniería. Estos emuladores matemáticos de control reglamentario se encuentran fácilmente disponibles en paquetes comerciales de control de procesos. En segundo lugar, el modelo de adaptación puede ser acoplado a una emulación del sistema de control PID y unido a través de una consola sistema de control distribuido (DCS) para crear un rápido y auténtico asesor del operador en línea para guiar a los operadores durante la operación del proceso. El modelo puede ser inicializado con datos históricos o con datos en tiempo real del proceso. Cuando el operador está en modo de fondo a partir de datos históricos, puede ejecutar los escenarios que han sido previamente diseñados o crear otros nuevos. En el modo de tiempo real de fondo, el operador puede elegir la opción "qué pasaría si" y la simulación inicializar el estado actual de las variables dependientes e independientes, la configuración y el ajuste de los controladores PID, y el estado actualizado de los vectores de predicción de bucle abierto a donde irá el proceso en función de todos los datos relevantes del pasado. Es importante señalar también que a medida que el operador ejecuta un escenario "qué pasaría si" y los resultados no son satisfactorios, el operador puede detener la ejecución, modificar el escenario, y reiniciar el asesor múltiples veces hasta que se alcanza un resultado deseado. Cada vez que se realiza, el asesor del operador también puede volver a acceder a los datos en tiempo real del proceso para inicializar las variables dependientes e independientes, volver a iniciar la configuración del control, restablecer el estado de los vectores de predicción del elemento de control final, y luego resolver el modelo. Esto se puede hacer hasta que se encuentra un cambio satisfactorio. La alta velocidad del modelo consejero del operador basado en el controlador de adaptación hace posible este aspecto de la invención.
45
50
55
60

Aunque una forma preferida de la invención ha sido divulgada y se describe en la memoria y en los dibujos, como que variaciones en la forma preferida serán evidente para los expertos en la materia, la invención no debe interpretarse como limitada a las formas específicas que se muestran y se describen, sino que es tal como se establece en las siguientes reivindicaciones cuando se leen a la luz de la descripción anterior.

5

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para controlar un proceso que tiene una pluralidad de variables manipuladas controlables de manera independiente y al menos una variable controlada dependiente de dichas variables manipuladas controlables de manera independiente, comprendiendo el procedimiento las etapas de:

- 5 a. recopilar datos sobre dicho proceso (etapa 60) mediante la introducción por separado de perturbaciones de prueba en cada una de dichas variables manipuladas (etapa 105) y medir el efecto de las perturbaciones en dicha por lo menos variable controlada (etapa 110);
- 10 b. utilizar dichos efectos de las perturbaciones en dicha por lo menos variable controlada para generar un primer modelo lineal dinámico sobre dicha al menos una variable controlada en dichas variables manipuladas controlables de manera independiente (etapa 115);
- 15 c. intercambiar las variables controladas del elemento de control final con sus correspondientes variables de punto de ajuste del controlador PID manipulado controlable de manera independiente seleccionado (8, 9, 10) en dicho primer modelo lineal dinámico utilizando las matemáticas de eliminación de filas de la matriz para generar un segundo modelo lineal dinámico que tiene un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables de manera independiente (etapa 70, etapa 160), teniendo dicho segundo modelo lineal dinámico la dinámica de dichas variables de punto de ajuste del controlador PID manipulado controlable seleccionado independientemente (8, 9, 10) eliminadas de dicho segundo modelo lineal dinámico;
- 20 d. medir el valor presente de dichas variables controlables manipuladas de forma independiente (etapa 110);
- e. calcular intervalos discretos de tiempo a partir de dichos datos obtenidos sobre dicho proceso, dichos valores presentes medidos y restricciones operativas preseleccionadas un conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros para al menos dichas variables manipuladas para obtener nuevos valores para dichas variables manipuladas y mover dicha al menos una variable controlada hacia por lo menos una de dichas restricciones operativas (etapa 188); y se caracteriza por las etapas de, antes de llevar a cabo la etapa e del procedimiento;
- 25 f. preestablecer las limitaciones operativas para dicha al menos una variable controlada;
- g. preestablecer los límites de prueba para dicha al menos una variable controlada que cae dentro de dichas restricciones operativas;
- usar el segundo modelo dinámico lineal para calcular un primer conjunto de vectores de predicción para dicha al menos una variable controlable (etapa 182);
- 30 colocar dicho segundo modelo lineal dinámico en un modo de prueba de adaptación (etapa 184) donde todos los controladores PID (8, 9, 10) se cambió a manual;
- perturbar las variables controladas del elemento de control final con señales de excitación aleatorias (etapa 186); y siguiendo la etapa e del procedimiento, llevar a cabo la etapa de;
- 35 h. cuando el vector de predicción se encuentra fuera de los límites de prueba para dicha al menos una variable controlada (etapa 192), cambiar dicho proceso mediante el ajuste de dichas variables manipuladas para dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros para causar que dicho proceso mueva dicha al menos una variable controlable dependiente hacia al menos una de dichas restricciones operativas.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de perturbación (etapa 186) también comprende perturbar dichos límites de prueba para dicha al menos una variable controlada con señales de excitación aleatorias.

- 40 3. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicho proceso comprende al menos una variable no controlada que depende de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que dicha al menos una variable no controlada se limita a una restricción operativa predeterminada.

- 45 4. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que dicho proceso comprende al menos una variable no controlada que es dependiente de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para los tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que dicha al menos una variable no controlada se limita a una restricción operativa predeterminada.

- 50 5. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que por lo menos una de dichas variables manipuladas está limitada a una restricción operativa predeterminada.

- 55 6. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que por lo menos una de dichas variables manipuladas está limitada a una restricción operativa predeterminada.

7. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa del cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos empleando técnicas de programación cuadráticas.

8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que al menos una de dichas variables manipuladas está limitada a una restricción operativa predeterminada.
- 5 9. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que donde dicho proceso comprende al menos una variable no controlada que depende de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que dicha variable no controlada está limitada a una restricción operativa predeterminada.
- 10 10. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos empleando técnicas de programación lineal.
11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que dicha etapa del cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que al menos una de dichas variables manipuladas está limitada a una restricción operativa predeterminada.
- 15 12. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que dicho proceso comprende al menos una variable no controlada que depende de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que dicha variable no controlada está limitada a una restricción operativa predeterminada.
- 20 13. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que al menos una de dichas variables manipuladas está limitada a una restricción operativa predeterminada.
- 25 14. Procedimiento según la reivindicación 13, en el que dicho proceso comprende al menos una variable no controlada que depende de dichas variables manipuladas y en el que dicha etapa de cálculo de dicho conjunto de movimientos para tiempos presentes y futuros (etapa 188) también comprende el cálculo de dicho conjunto de movimientos de tal manera que dicha variable no controlada está limitada a una restricción operativa predeterminada.

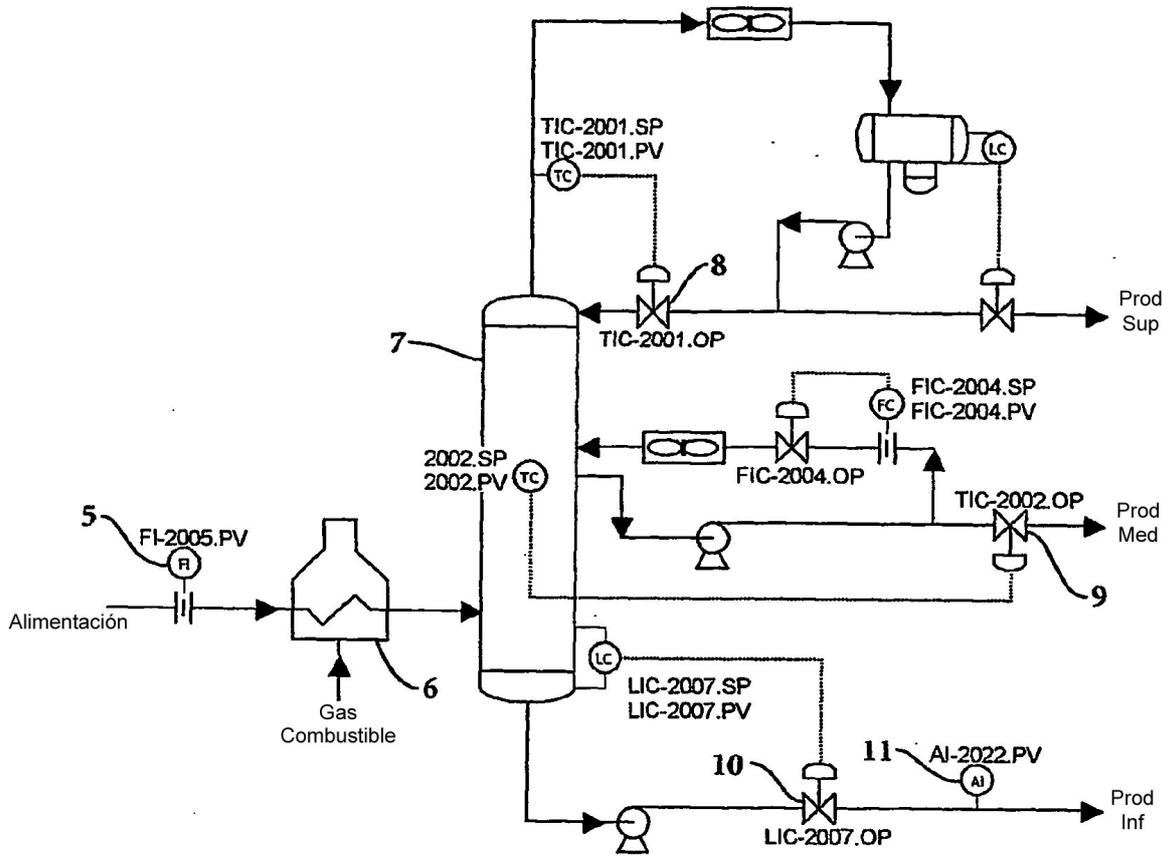


FIG 1

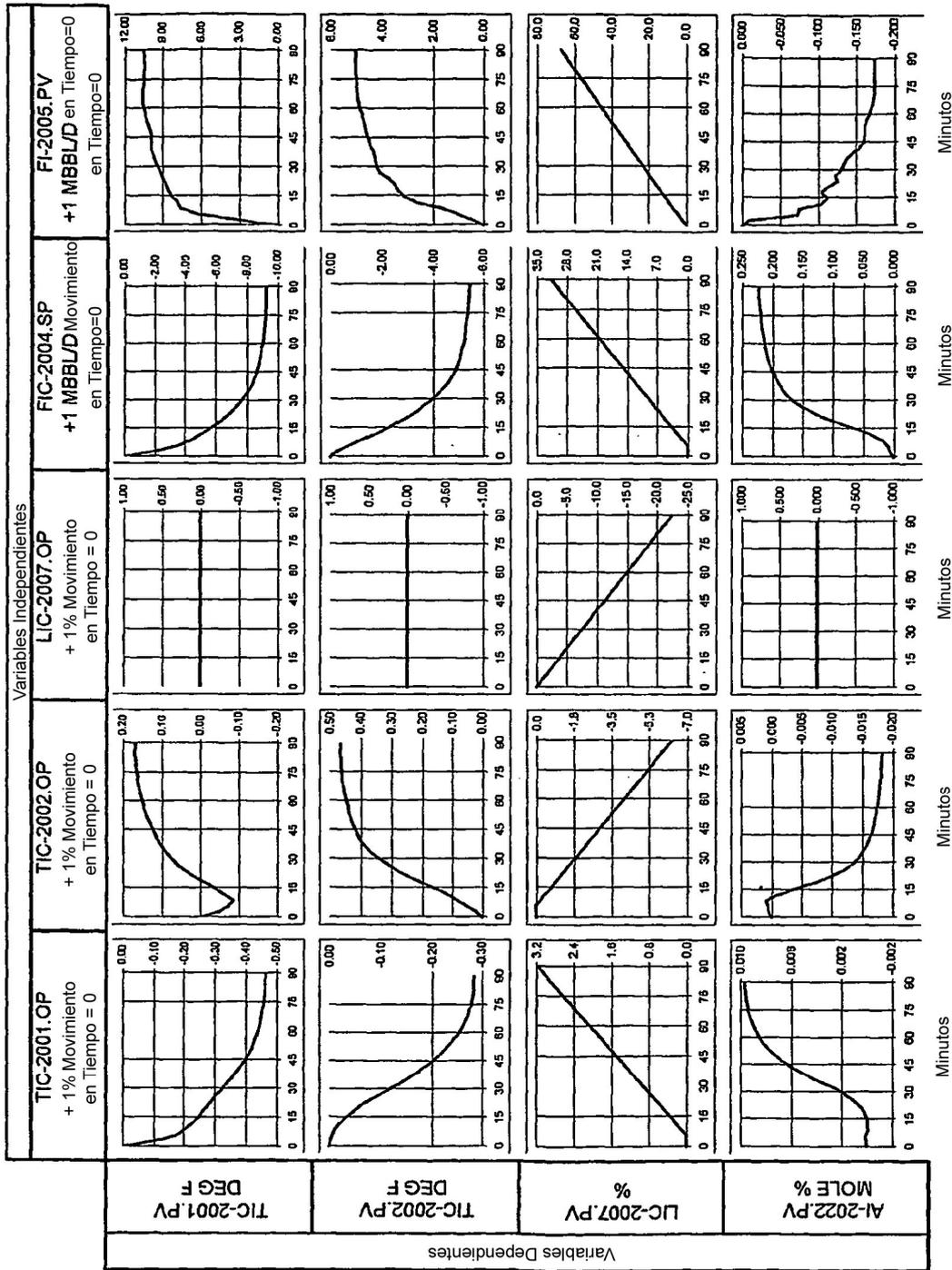


FIG 2

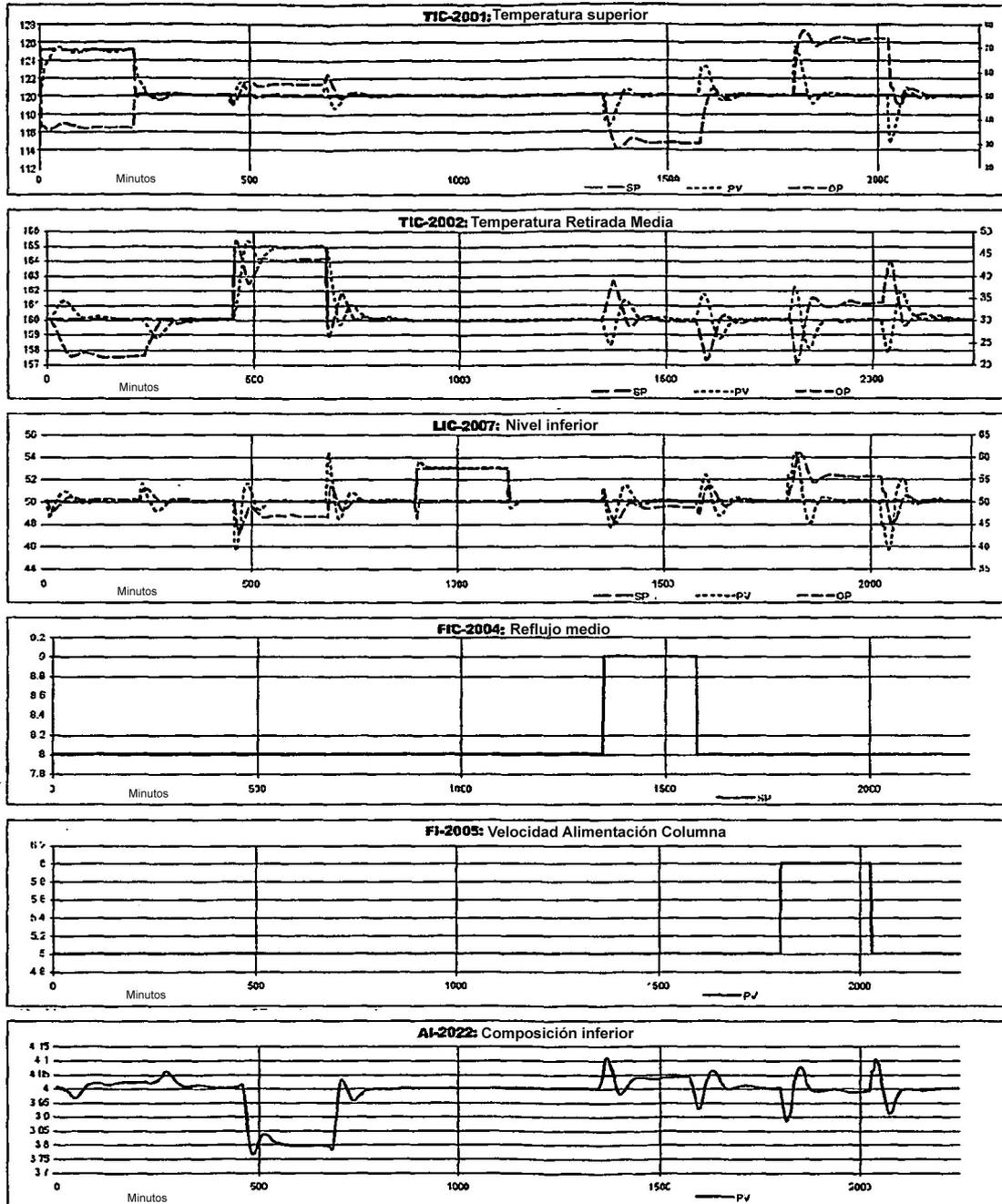


FIG 3

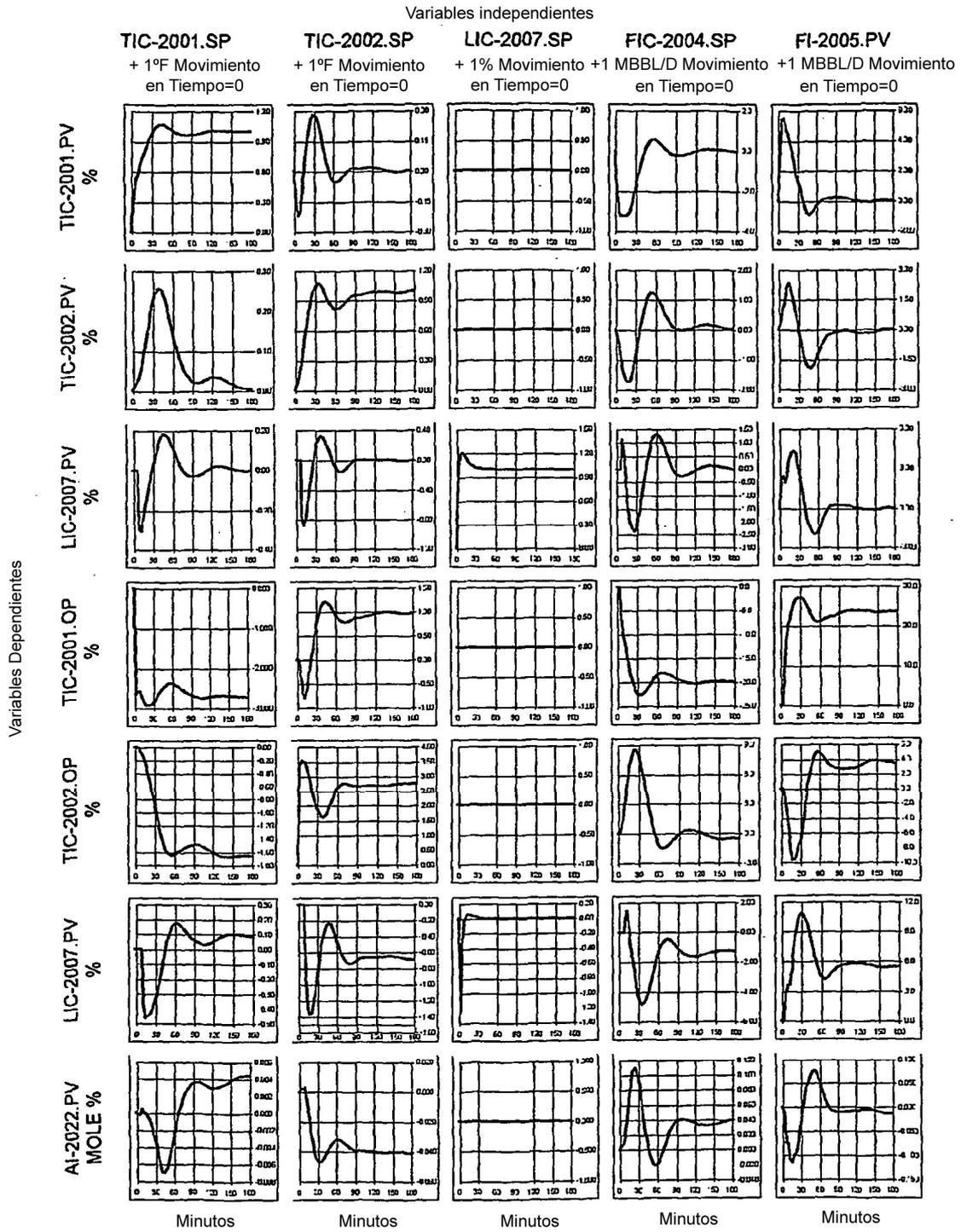


FIG 4

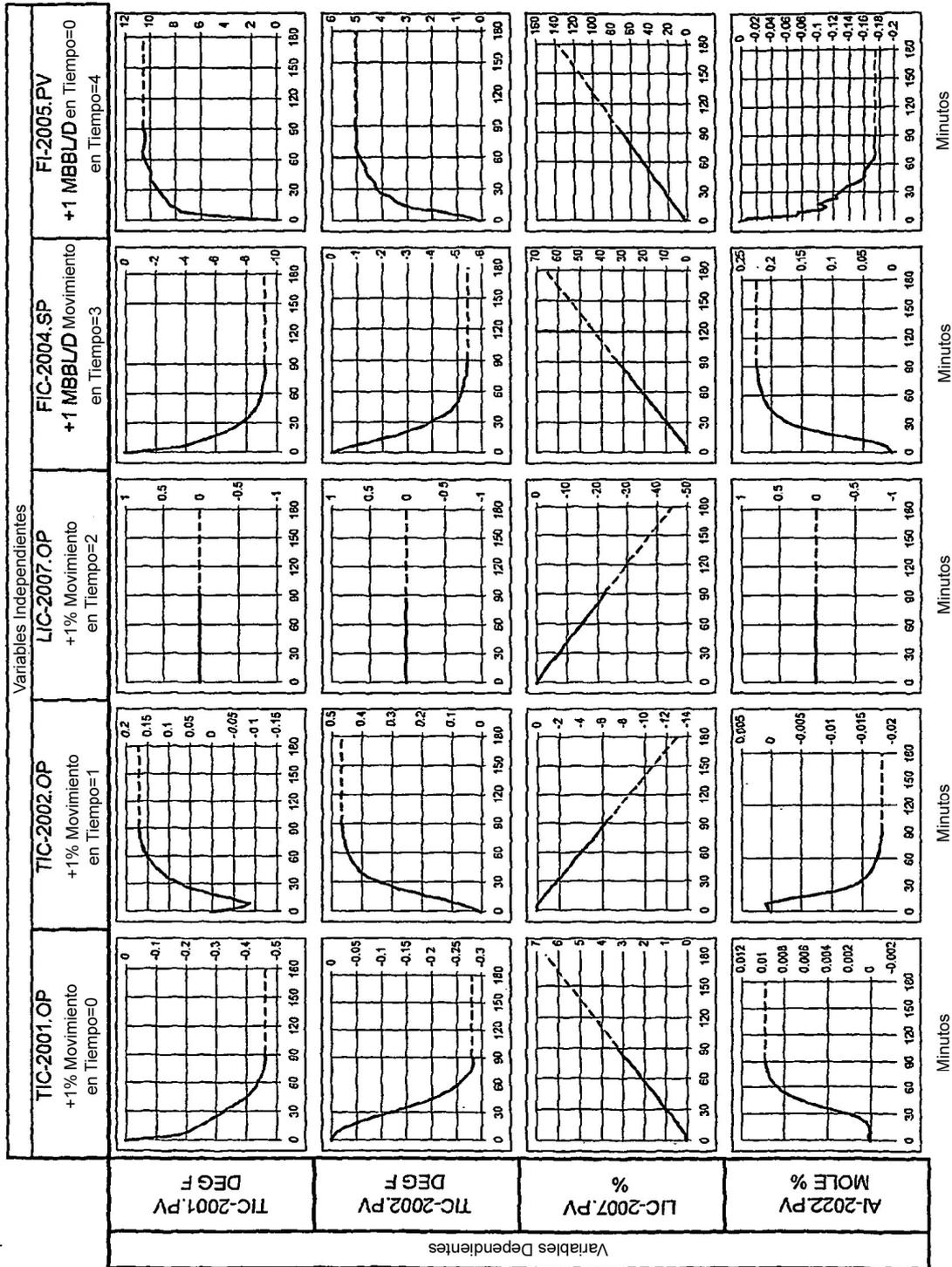


FIG 5

50

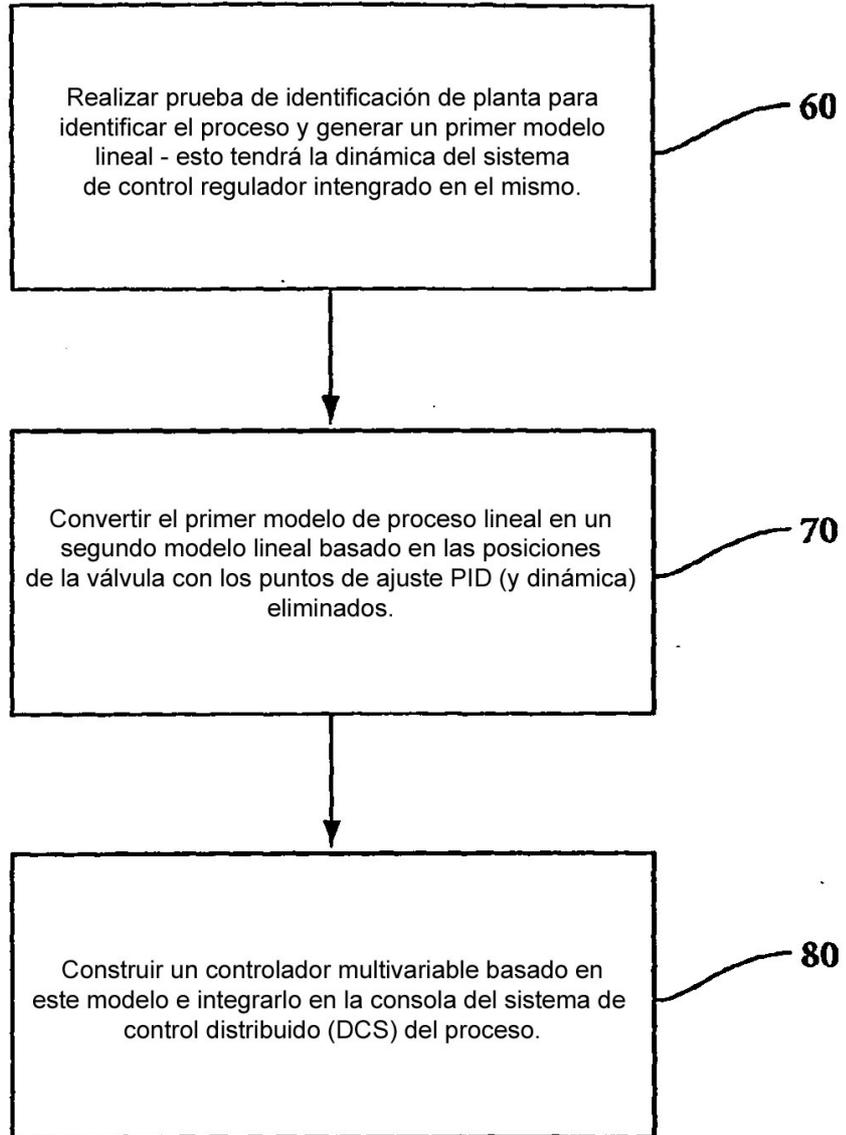
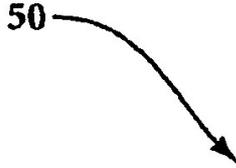


FIG 6

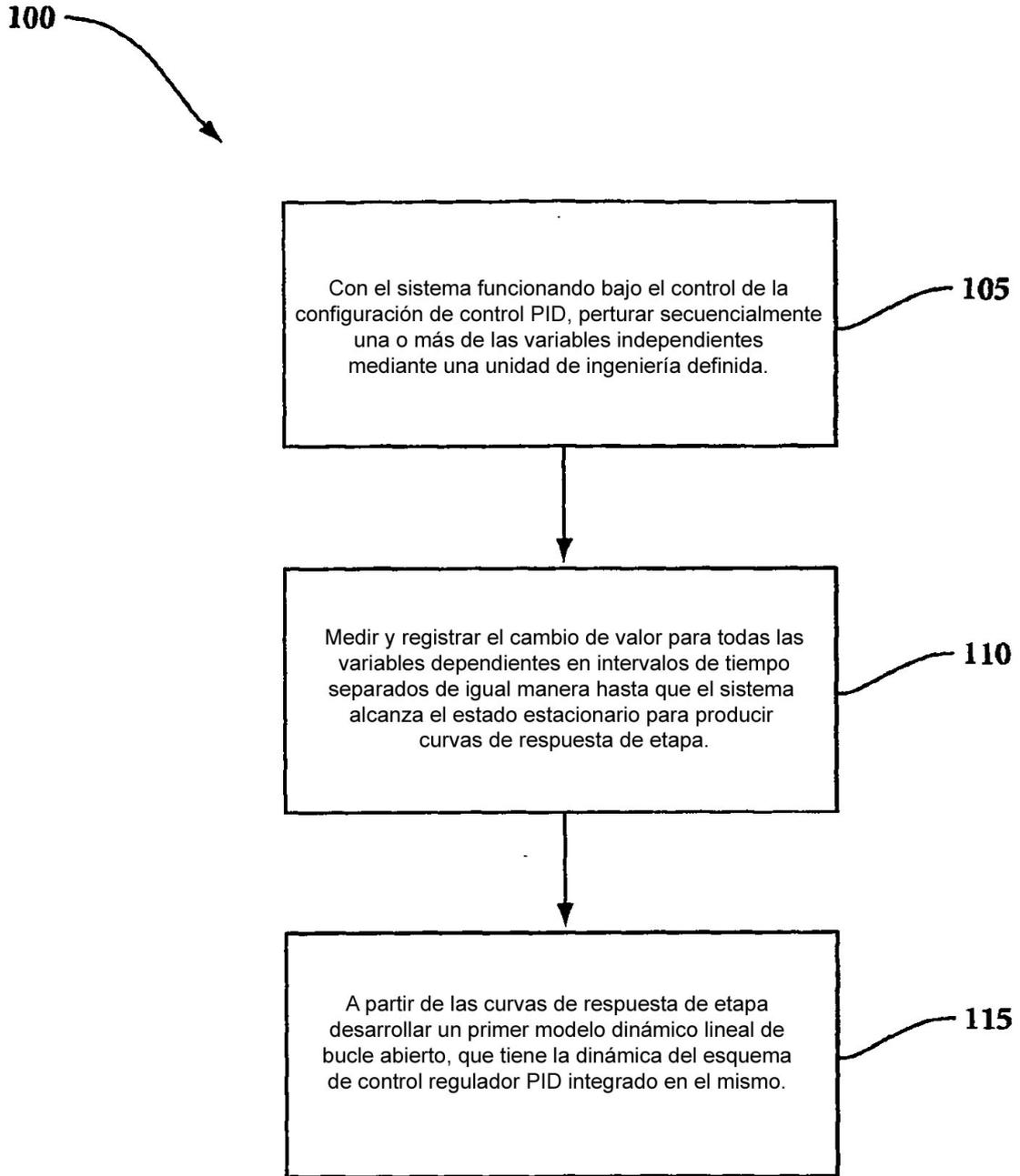


FIG 7

150



Usando el primer modelo dinámico lineal tal como se describe en la figura 7, que tiene la dinámica del esquema de control regulador PID integrado en el mismo...

155



Intercambiando las variables controladas de la posición de la válvula seleccionada con sus variables del punto de ajuste del controlador PID manipulado controlable independientemente en el primer modelo dinámico lineal usando las matemáticas de eliminación de las filas de la matriz para generar un segundo modelo lineal dinámico que tiene un nuevo conjunto de variables manipuladas controlables independientemente, teniendo el segundo modelo dinámico lineal la dinámica de las variables del punto de ajuste del controlador PID manipulado controlable independientemente eliminadas del segundo modelo dinámico.

160



Construir un controlador multivariable basado en este modelo e integrarlo en la consola del sistema de control distribuido (DCS) del proceso.

165

FIG 8

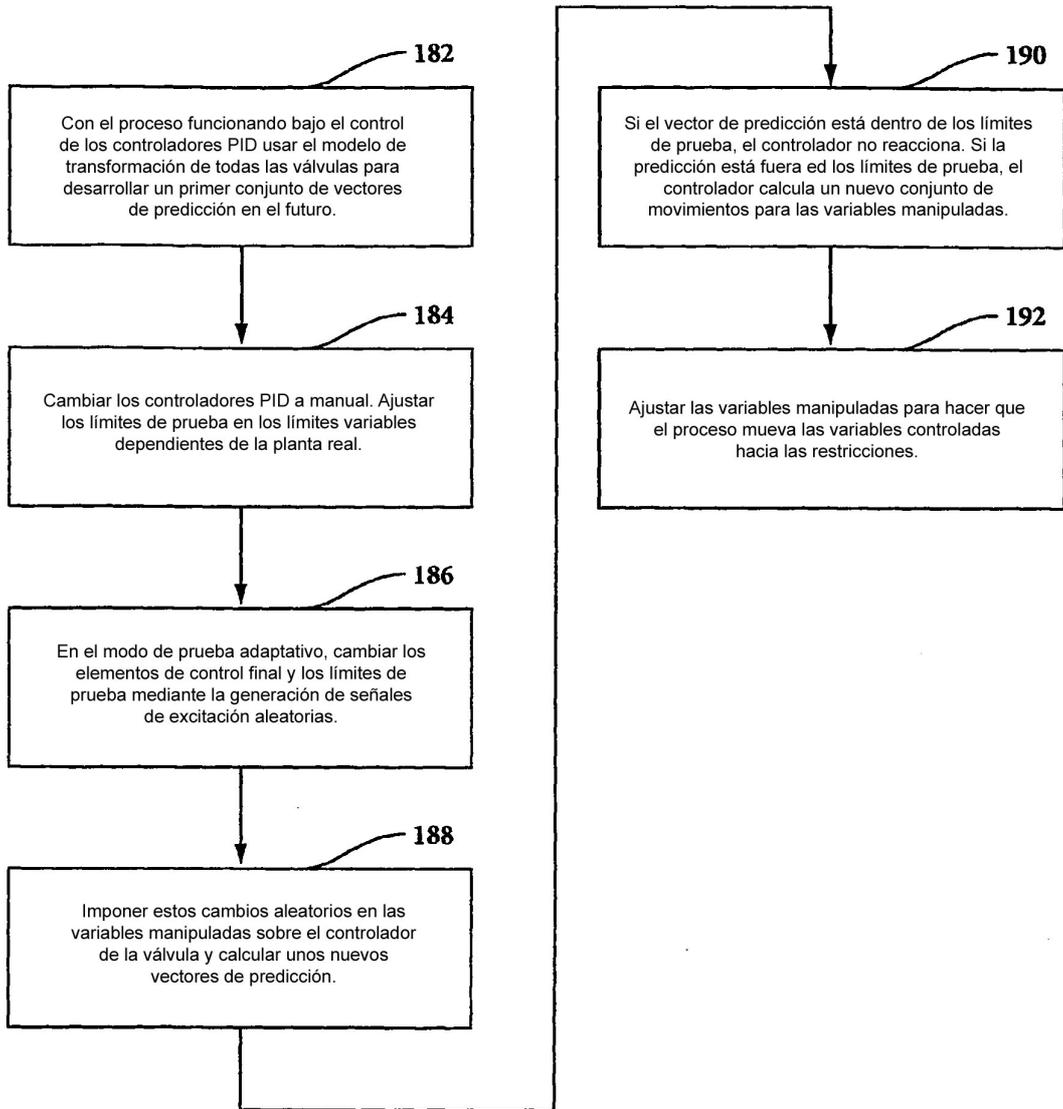


FIG 9

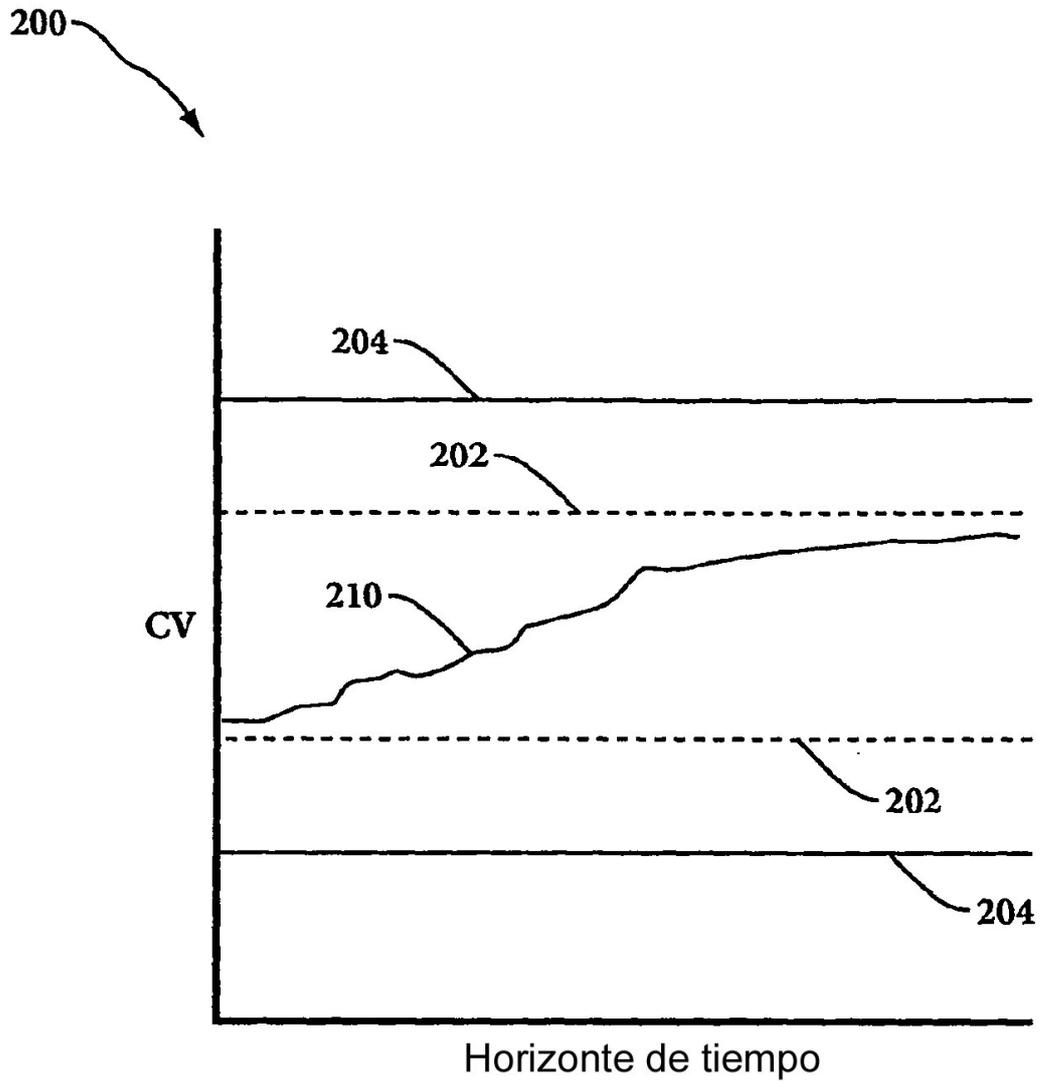


FIG 10