

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 444 692**

51 Int. Cl.:

**G05B 13/04** (2006.01)

**G05B 5/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.12.2006 E 06835945 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.11.2013 EP 1966655**

54 Título: **Método y dispositivo para ajuste y control**

30 Prioridad:

**30.12.2005 SE 0502956**

**07.02.2006 SE 0600321**

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

**26.02.2014**

73 Titular/es:

**ABB AB (100.0%)  
Kopparbergsvägen 2  
721 83 Västerås, SE**

72 Inventor/es:

**MODÉN, PER-ERIK;  
BERGSTEN, PONTUS y  
LINDKVIST, RICKARD**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 444 692 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

Método y dispositivo para ajuste y control

## 5 CAMPO TÉCNICO

Esta invención se refiere a un método y a un dispositivo para el ajuste y el control de procesos industriales que tienen al menos un accionador para afectar a la calidad de los productos fabricados y en donde varía la velocidad de producción o el caudal de materiales y por lo tanto, crea condiciones para el control. La invención está destinada preferentemente al ajuste automático y control adaptativo en aplicaciones de trenes de laminación, p.e. para mejorar la planeidad para productos laminados con el uso de cualquier número de accionadores mecánicos u otros accionadores. La invención es también aplicable a otros procesos en donde el material variable es, a modo de ejemplo, una lámina, una banda, una hoja continua o un fluido.

## 15 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

La planeidad de un producto laminado, p.e. una banda, se determina por el perfil de la separación de los rodillos entre los rodillos de trabajo de un tren de laminación y el perfil de espesor de la banda laminada. La planeidad de la banda puede influirse luego por la manipulación de diferentes dispositivos de control, que afecta al tren de laminación y a su perfil de la separación entre rodillos de trabajo. Dichos accionadores pueden ser dispositivos mecánicos tales como dispositivos de curvado de rodillos de trabajo, dispositivos de curvado de rodillos intermedios, dispositivos de sesgado o de inclinación, dispositivos de desplazamiento de rodillos intermedios, accionadores de corona superior, o dispositivos térmicos tales como accionadores de enfriamiento/calentamiento de rodillos de trabajo, etc.

En el control de planeidad para el laminado en frío de metales, se utilizan varios accionadores que incluyen en el perfil de planeidad. En la solución estándar, las desviaciones de la planeidad son objeto de mapeado de correspondencia con el espacio de accionadores con la ayuda de una matriz de laminación, que describe la respuesta de planeidad estática a partir de los accionadores respectivos. Esta descomposición da lugar a varios bucles de control, uno para cada accionador. Estos bucles están provistos de controladores de PI. Actualmente, el ajuste de sintonización de estos controladores está basado en la identificación fuera de línea de modelos para cada bucle. Además, variaciones conocidas en el modelo, debido a velocidad de laminación variable, a modo de ejemplo, se tienen en cuenta en una forma de programación de parámetros. Dos factores que hacen incierta la ganancia del proceso para cada bucle y su dependencia del material laminado y una posible discrepancia entre la matriz de laminación supuesta y el comportamiento real del tren de laminación.

Cuando se efectúa la laminación de una banda, es importante mantener el perfil de planeidad deseado en todo momento. La desviación respecto a la planeidad deseada puede dar lugar a costosas roturas de la banda y desecho de bobinas producidas. La tarea del sistema de control de la planeidad es, por consiguiente, favorecer el perfil de planeidad real lo más próximo posible al perfil de planeidad deseado, lo que establece requisitos existentes sobre el sistema de control, en términos de velocidad de cálculo y de precisión.

Los controladores para procesos industriales necesitan estar bien sintonizados con el fin de reducir las variaciones de la calidad y mantener la calidad obtenida dentro de las especificaciones, a pesar de las condiciones variables. En particular, un deseo para una alta tasa de producción frecuentemente tendrá que mejorar la capacidad para controlar el proceso lo suficiente para evitar la producción de material fuera de las especificaciones e interrupciones en la producción debido a rotura. Las roturas de láminas en una máquina de papel o ruptura de banda en un tren de laminación de acero constituyen ejemplos que pueden causar costosas pérdidas de producción.

El ajuste de sintonización de un controlador suele estar basado en un procedimiento para encontrar un modelo simple a partir de datos de experimentos (de, a modo de ejemplo, un ensayo por etapas) en combinación con un método para encontrar automáticamente un ajuste del controlador adecuado, en el supuesto de que este modelo representa el comportamiento del proceso adecuadamente, a modo de ejemplo, según se describe en "Un estudio de aplicaciones de control adaptativo". Decisión y control 1995, *proceedings of the 34 IEEE conference on New Orleans, LA, Estados Unidos, 13-15 diciembre 1995*, vol. 1, páginas 649-654, XP010152287, ISBN: 978-0-7803-2685-9. Para que este procedimiento sea operativamente satisfactorio, es esencial que la formulación del modelo sea capaz de capturar el comportamiento real del proceso durante el experimento y que el modelo obtenido permanezca válido durante el funcionamiento normal del proceso con las condiciones variables que puedan presentarse. El método de ajuste puede permitir alguna variación con respecto al comportamiento nominal supuesto, estableciendo un grado de énfasis adecuado sobre la solidez. Si se producen variaciones esenciales en la dinámica del proceso – a modo de ejemplo, con una velocidad de producción variable – una vez conocidas dichas variaciones deben gestionarse mediante una programación de parámetros. Si las variaciones ocurren durante el experimento de ajuste, la identificación del modelo estará gravemente perturbada si se aplican métodos estándar.

Un método frecuente es la identificación de la denominada 'caja negra' que consiste en estimar los parámetros en una formulación temporal discreta del modelo, que se expresa para el mismo periodo de muestreo que se utiliza en

el control real. Sin embargo, en los casos en donde alguna dinámica del proceso varía con la velocidad de producción, la estimación será perturbada por variaciones de la velocidad, puesto que variarán los valores de parámetros verdaderos del modelo. Lo que antecede es aplicable si se realiza un muestreo por unidad de tiempo, lo que es el caso más común, puesto que, entonces, las partes de la dinámica que varían con la velocidad proporcionarían parámetros de modelos temporales discretos variables y si el muestreo se realiza por cantidad de flujo de material, lo que a veces se realiza por razones prácticas y también proporciona valores de parámetros de modelos temporales discretos constantes para la dinámica que tienen características temporales proporcionales a la inversa de la velocidad, puesto que, entonces, las partes de la dinámica que no varían con la velocidad de producción proporcionarían parámetros del modelo temporales discretos variables.

Para el ajuste de los bucles de control de PI, en la solución estándar para el control de la planeidad, la velocidad de laminación variable impide el uso de métodos de identificación de 'caja negra' para determinar un modelo. El muestreo se realiza por unidad de longitud. Por ello, el modelo de comportamiento en el transporte sería invariable para datos muestreados, pero la dinámica de accionadores no obtiene un modelo invariable para datos muestreados de esta forma y por lo tanto, variará el modelo temporal discreto completo. Además, el periodo de muestreo puede variar debido a un múltiple muestreo descendente variable y también por un prefiltrado variable en relación con esta solución operativa.

Para obtener un control exacto, los controladores deben estar bien sintonizados, en función de cómo el proceso responde a cambios de variables manipuladas. La ganancia del proceso de laminación depende de varios parámetros que no son bien conocidos. Para el control de la planeidad, las ganancias pertinentes son influidas dependiendo del material que se está laminando, de la concordancia real de la matriz de laminación supuesta con la realidad y de otros factores.

Después de la separación de la tarea de control original, esto es, con la planeidad mantenida a través de la anchura del material producido utilizando varios accionadores, en varios bucles de medición por accionadores, la estrategia de control actual está basada en el ajuste de un bucle de control estándar durante la puesta en servicio. En condiciones normales, lo que antecede se realiza como una estimación única de parámetros de modelos fuera de línea para cada bucle y el ajuste para ese modelo. Para hacer más eficiente esta actividad, los parámetros del modelo pertinentes deben estimarse en línea y presentarse al usuario en tiempo real para decisión cuando finalice la actividad. Además, la estimación debe realizarse en una forma que no sea perturbada por variaciones de la velocidad.

Un problema es que si cambia el proceso del material, el control puede hacerse inexacto, aún cuando haya sido anteriormente exacto, lo que da lugar a una calidad de producto deficiente o a un desecho. El cambio en el material puede, a modo de ejemplo, causar cambios en las propiedades tales como espesor, anchura o dureza del material. Después de un cambio de material, el control ha de adaptarse a las propiedades del nuevo material. Cuanto más rápido se adapta el control a las nuevas propiedades, tanto más rápido será el restablecimiento de la calidad de la producción.

Para evitar el problema de que pudiera aplicarse el control adaptativo, el control adaptativo suele aplicarse en modelos de tipo de 'caja negra'. Sin embargo, modelos temporales discretos con un periodo de muestreo variable, debido a la velocidad variable, tendrán valores de parámetros variables, debido a la dinámica asociada con accionadores invariables en el tiempo. En consecuencia, será inútil un control adaptativo basado en la identificación del tipo 'caja negra' de dichos modelos.

Un problema en relación con el ajuste de sintonización de controladores para procesos industriales con caudal variable de los materiales, tales como la medición de la planeidad durante la laminación, es que la cadencia de muestreo de la medida de la propiedad controlada es dependiente del caudal, tal como la velocidad de laminación, lo que da lugar a intervalos de muestreo variables. Es fácil y conocido estimar un parámetro para un modelo discreto temporal. Sin embargo, no es posible utilizar un modelo discreto temporal para sintonizar controladores para procesos con caudal variable de los materiales debido a los intervalos de muestreo variables.

#### SUMARIO DE LA INVENCION

El objetivo de la presente invención es resolver los problemas relacionados con el ajuste de sintonización de los controladores para procesos industriales con caudal variable de los materiales que causa condiciones de control variables.

Según un aspecto de la idea inventiva, este objetivo se consigue mediante un método según se define en la reivindicación 1.

La presente invención hace uso del conocimiento anterior y de datos conocidos del proceso industrial. Según la invención, se utiliza una estructura de modelo, que describe el efecto del caudal variable de los materiales. Algunos de los parámetros del modelo son ya conocidos. Los restantes parámetros, que son conocidos o se espera que varíen, que suele ser la ganancia del proceso, se determinan en línea por identificación. Esto en combinación con

una regla de ajuste, tal como una regla de ajuste lambda, forma un método de ajuste. Cuando se aplica al control en línea, este último constituye un control adaptativo que asume el cuidado del proceso y las incertidumbres y cambios de materiales. Cuando se aplica un ajuste automático, proporciona una forma rápida y fiable para sincronizar el controlador. La presente invención permite el control de cualquier tipo de accionador.

5 Utilizando una formulación de modelo en tiempo continuo, teniendo en cuenta lo que se conoce sobre el proceso, la estructura de modelo de proceso se selecciona para hacer a los parámetros desconocidos independientes del caudal de los materiales y de otros parámetros variables. Por independiente se entiende que el valor verdadero permanece razonablemente constante a pesar del caudal variable de los materiales u otros parámetros variables. De este modo, el número de parámetros que necesitan determinarse por estimación se reduce al mínimo y en consecuencia, las estimaciones se hacen más fiables. Un método de ajuste, basado en modelo, se aplica luego al modelo total modelo determinado a partir de los parámetros estimados, de los parámetros conocidos y de las relaciones y cualquier procesamiento de señal realmente aplicado.

15 El método de la invención crea un sistema de control mejorado, estable y sólido. Los problemas del control de calidad, relacionados con las condiciones variables debido al caudal variable de los materiales con las soluciones actuales, en particular en combinación con parámetros de materiales variables y parámetros de proceso de cambio lento, se reducen, en gran medida, con la invención propuesta.

20 El método consigue la ventaja sobre un controlador adaptativo sobre la base de la identificación del modelo de tipo 'caja negra' temporal discreto que los parámetros han de encontrar por estimación que permanece constante durante más largos periodos de tiempo, a modo de ejemplo, con independencia de la velocidad de producción, lo que hace mucho más factible la simple aplicación de adaptación. Esto proporciona, a su vez, la base para ser capaces realmente de aumentar el rendimiento de control en comparación con el control no adaptativo. El beneficio del rendimiento incrementado se suele encontrar en la más alta velocidad de producción al mismo nivel de calidad y/o más alta calidad obtenida a la misma velocidad de producción, lo que significa menos desechos o mejor precio o ambas cosas a la vez y/o menos paradas técnicas de la producción. Utilizado como soporte para el ajuste inicial, el método puede acortar también los tiempos de puesta en servicio.

30 Una forma de realización, a modo de ejemplo, en donde la invención es aplicable es el control de la planeidad en la laminación en frío de metales. El perfil de tensión se mide entonces con un rodillo de medición que tiene sensores en cuatro disposiciones matriciales. El sistema de medición toma una muestra de perfil de tensión completa cuatro veces por revolución y la convierte a un perfil de planeidad. De este modo, se dispone de un caso de muestreo por cantidad de flujo de material o más concretamente, por longitud de material laminado. La medición puede ser objeto de mapeado de correspondencia con varios bucles de control que utilizan la respuesta estática supuesta a partir de los dispositivos accionadores. La respuesta dinámica real, en los diferentes bucles de control, consiste principalmente en respuestas e los servomecanismos de accionadores o la respuesta de calentamiento o enfriamiento en caso de accionadores de dispositivos térmicos y de respuesta asociada con el transporte de la banda. La parte relacionada con el accionador se considera invariable en el tiempo y las características temporales (tiempo muerto, constante de tiempo) relacionadas con el transporte son inversamente proporcionales a la velocidad de laminación. La identificación de tipo 'caja negra' de modelos temporales discretos para este tipo de procesos es inútil, puesto que el resultado sería válido solamente para ese punto operativo. El método de la invención, por el contrario, proporciona estimaciones que son válidas a través de todo el margen operativo completo y son, a la vez, fáciles de interpretar por el usuario.

45 Además, la invención permitirá a los operadores utilizar completamente el modo automático, lo que puede mejorar el rendimiento del tren de laminación en términos de menos desechos producidos y/o más alta velocidad de laminación manteniendo la misma calidad.

50 Según una forma de realización de la invención, el método comprende seleccionar una estructura de modelo de proceso, que es continua en el tiempo y comprende parámetros que son independientes del caudal de materiales variable. Esta forma de realización hace posible estimar parámetros para el modelo a pesar de los intervalos de muestreo variables.

55 Según otro aspecto de la idea inventiva, el objetivo se consigue mediante un producto de programa informático directamente cargable en la memoria interna de un ordenador o un procesador, que comprende partes de códigos de software para realizar las etapas del método según el conjunto adjunto de reivindicaciones del método, cuando el programa se ejecuta en un ordenador. El programa informático se proporciona en un medio de soporte legible por ordenador o por intermedio de una red, tal como la de Internet.

60 Según otro aspecto de la idea inventiva, el objetivo se consigue mediante un medio de soporte legible por ordenador que tiene un programa grabado, cuando el programa consiste en hacer que un ordenador realice las etapas del método según el conjunto adjunto de reivindicaciones del método y el programa se ejecuta en el propio ordenador.

65 Según otro aspecto de la idea inventiva, este objetivo se consigue por un dispositivo según se define en la reivindicación 18.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para un mejor conocimiento de la presente invención, se hará referencia a los dibujos/figuras que se adjuntan.

5 La Figura 1 ilustra una vista general de un tren de laminación con una sola caja de laminación y dispositivo de control, accionadores, un dispositivo de medición de la planeidad y el sistema de control de la planeidad.

La Figura 2 ilustra la invención de forma esquemática.

10 La Figura 3 ilustra principalmente un diagrama de bloques de control adaptativo de la planeidad.

La Figura 4 ilustra un diagrama de flujo de las etapas del método diferentes en un sistema de control adaptativo de la planeidad.

15 La Figura 5 ilustra, en más detalle, la función de la etapa del método denominada "Actualización de una estimación en línea de parámetros de modelos requeridos" de la Figura 4.

La Figura 6 ilustra, en un diagrama, el denominado factor de creencia como función de la relación entre el error de predicción y la desviación estándar estimada de errores de predicción.

20

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN PREFERIDA

25 La invención se refiere a un método para el ajuste de un controlador automático que puede utilizarse para el ajuste de una sola vez y también para el control adaptativo. En una aplicación típica de la invención, un proceso industrial tiene, en alguna medida, una dinámica invariable en el tiempo y en otra medida, características temporales, tales como tiempo muerto y constantes de tiempo, inversamente proporcionales a la velocidad de producción del caudal de material. La parametrización puede seleccionarse en conformidad con el conocimiento real sobre el comportamiento del proceso y la influencia de la velocidad de producción, de modo que los valores verdaderos, pero desconocidos, de los parámetros estimados serán constantes, con independencia de la velocidad y de otros parámetros variables. De este modo, la estimación no será perturbada por variaciones de la velocidad y existirán pocos parámetros a estimar. En consecuencia, se obtienen estimaciones más exactas en un periodo de tiempo más corto y no son perturbadas por la ejecución del proceso con producción normal según los programas planificados durante una sesión de ajuste automático o cualquier duración de control adaptativo. El ajuste del controlador real utiliza un modelo que combina el conocimiento previo del comportamiento del proceso, incluyendo la influencia de la velocidad del proceso y el conocimiento obtenido a través de los parámetros estimados.

35

40 El efecto de qué mapeado/transformación/procesamiento de señal se realiza en el sistema de control está también incorporado en el modelo utilizado para el ajuste. De este modo, la invención proporciona la adaptación para variaciones desconocidas que han de captarse por estimación, además de la programación de parámetros para variaciones conocidas. El resultado es un mejor control, y se obtiene con mayor rapidez y mejor precisión en comparación con los métodos anteriormente conocidos. Lo que antecede da lugar a menos producción fuera de las especificaciones y permite una más alta velocidad de producción con la calidad preservada.

45

45 En la forma de realización, a modo de ejemplo, del control de la planeidad en la laminación en frío de metales, es conocido que la dinámica de los dispositivos accionadores así como cualquier retraso debido a la comunicación y procesamiento son independientes de la velocidad de laminación. La velocidad puede variar y entonces, influirá sobre el tiempo muerto y/o constante de tiempo que se requieren en la descripción del comportamiento del transporte. Además, el sistema de medición puede aplicar un filtro a la medición básica y puede efectuar un muestreo descendente de las medidas, de modo que el periodo de muestreo real se haga un múltiplo entero del básico. La función de transferencia de filtrado y el múltiplo muestreo descendente pueden variarse de forma intencionada en relación con la velocidad de laminación. Estas variaciones en la velocidad, filtrado y múltiplo muestreo son conocidas en este ámbito.

50

55 Los parámetros para estimar cada bucle de control pueden seleccionarse para ser:

55

una constante de tiempo  $T_a$  que describe la respuesta del dispositivo accionador,

un tiempo muerto  $D_0$  (la parte del tiempo muerto total que es independiente de la velocidad de laminación),

60

una ganancia  $K$  y

un factor  $\xi$  que describe en qué grado el comportamiento de transporte es un tiempo muerto o una constante de tiempo pura.

65

Los valores verdaderos de estos parámetros son independientes de la velocidad y del procesamiento de señal variable, según se requiera. Expresado como longitudes, el tiempo muerto de transporte puro es la distancia  $L_d$

desde la separación de rodillos de laminación al rodillo de medición y la constante de tiempo pura, para respuesta del transporte, es la longitud  $L_m$  desde la separación de rodillos al bobinador. Estas distancias podrían, con el fin de expresarlas en el tiempo, simplemente dividirse por la velocidad. Las distancias con constantes y conocidas.

5 Puesto que la respuesta del transporte para diferentes accionadores difiere y no es conocida por anticipado, se supone para cada accionador individual que es un tiempo muerto puro para el grado  $\xi$  y una constante de tiempo pura para el grado  $(1-\xi)$ . Lo que antecede define el parámetro del comportamiento de transporte  $\xi$ . El tiempo muerto independiente de la velocidad,  $D_0$  representa el retardo puro desde la medición al inicio real de cambio en la separación entre rodillos debido al movimiento del dispositivo accionador, esto es, la suma media de tiempo de  
10 procesamiento, comunicación y retardo del procesamiento y cualquier retardo puro en el sistema de accionadores.

Una vez que se han determinado estos parámetros ( $K$ ,  $T_a$ ,  $D_0$ ,  $\xi$ ), según la invención, mediante estimación en una sesión de ajuste automático durante la puesta en servicio o reajuste, están todos ellos previstos que permanezcan constantes, con la excepción de la ganancia,  $K$ . Puesto que la ganancia variará con el material variable, y también  
15 con una posible desviación de la matriz de laminación supuesta respecto a la real, se aplica un control adaptativo, en donde la ganancia es el único parámetro a estimar, mientras que, al mismo tiempo, las variaciones de parámetros conocidas se tienen en cuenta en una forma de programación de parámetros.

Según se indicó con anterioridad, el control de la planeidad adaptativo, según la invención, hace uso del conocimiento previo de los modelos, por bucle, y determina sus ganancias en línea mediante identificación recursiva. Esto en combinación con una regla de ajuste  $\lambda$  (o alguna otra regla de ajuste) forma un control adaptativo para  
20 cada bucle, aplicado durante la laminación inicial de cada nueva bobina. La estructura del modelo, la dinámica de los accionadores, el comportamiento del transporte dependiente de la velocidad y el tiempo muerto independiente de la velocidad se utilizan como conocimiento previo para el control adaptativo.

Los parámetros allí incluidos ( $T_a$ ,  $D_0$ ,  $\xi$ ) se determinan preferentemente en un experimento de identificación recursiva, realizándose una vez para la totalidad para cada grupo, con señales de excitación suministradas a los dispositivos accionadores en bucle abierto o añadidas a las salidas del controlador en bucle cerrado. Factores conocidos, implicados en el comportamiento del transporte, son la velocidad de laminación y las distancias físicas en  
25 el tren de laminación. Otros factores tomados en consideración, como el conocimiento previo en el ajuste, son las tasas de muestreo y el filtrado aplicado. Estos factores pueden variar también durante la laminación de una bobina única. El periodo de muestreo es un múltiplo del utilizado en el muestreo de medición básico. Este múltiplo puede variar y el periodo de muestreo básico es inversamente proporcional a la velocidad de laminación. Se aplica un filtro de promedio móvil, cuya longitud puede variar. Se aplica a la tasa de muestreo básica.

La identificación recursiva para la determinación inicial de valores de parámetros y la utilizada durante el control adaptativo son bastante similares, a parte del número de parámetros que gestionan como de libre estimación. Utilizan el conocimiento de la estructura del modelo y el muestreo y filtrado variables, y estiman los parámetros en una formación temporal continua del modelo. De este modo, los parámetros estimados son independientes de la  
35 velocidad realmente utilizada, del muestreo y del filtrado. Para algunas situaciones, la identificación recursiva se suministra también con varias mejoras de la solidez operativa – en comparación con los métodos clásicos estándar – tales como una protección de contra observaciones aberrantes, zonas muertas de adaptación y restricciones para valores de parámetros estimados.

45 Las Figuras 1 a 4 ilustran la invención mostrando cómo puede aplicarse el control de la planeidad. Lo que se ilustra en la Figura 2 es genérico.

Según se da a conocer en la Figura 1, un sistema de control de la planeidad 1 está integrado en un sistema que comprende una caja de laminación 2 que tiene varios dispositivos accionadores 3 y rodillos 4. Un desbobinador, no  
50 ilustrado, alimenta una banda 5 a y a través de la caja de laminación 2 en donde la banda 5 pasa por un sistema de medición de la planeidad 6, a modo de ejemplo, un sistema denominado "Stressometer" y se lámina en un bobinador 7. La caja de laminación 2 puede controlar las características de sesgado, curvado y/o desplazamiento de los rodillos 4. De este modo, cambian la forma de la separación entre rodillos, que es en donde la banda 5 es afectada a medida que pasa entre los rodillos 4. Pueden ser también accionadores de calentamiento o enfriamiento o cualquier otro tipo de accionadores que influyen sobre la separación entre rodillos. El producto resultante del proceso de laminación es una banda laminada 5 con la planeidad deseada. En un tren de laminación tándem, no ilustrado, la banda entrante procedería de una caja de laminación precedente, en un lugar de un desbobinador. Dichas variaciones entre trenes de laminación carecen de importancia desde el punto de vista de la planeidad y el sistema de control de la planeidad sería idéntico. El sistema de control de la planeidad 1 está diseñado incluyendo varios bloques funcionales avanzados, según puede observarse en la Figura 3, que tienen todas las funcionalidades  
60 requeridas.

Según se da a conocer en la Figura 2, que ilustra principalmente un diagrama de flujo de la invención, el método según la invención implica la selección de una estructura de modelo. Las etapas adicionales de la invención se realizan en uno u otro de dos modos, sesión de ajuste 8 o control adaptativo 9. En ambos casos, se puede aplicar una excitación operativa al proceso y la estimación de parámetros proporciona valores para los parámetros de no

ser así desconocidos, en función de los datos procedentes de la operación del proceso. Con la estructura de modelo dada, los parámetros anteriormente desconocidos determinados por estimación y los parámetros conocidos y relaciones introducidas, se diseña el modelo del proceso. A continuación, si existe cualquier procesamiento de señal realizado, su efecto se añade también para formar un modelo completo. Este modelo completo se utiliza para el ajuste del controlador, en donde puede aplicarse cualquier método basado en un modelo adecuado. La determinación del modelo y el ajuste basado en el modelo se repiten a medida que nuevos datos se hacen disponibles con nuevos instantes de muestreo.

Durante una sesión de ajuste, los resultados de la estimación de parámetros y del ajuste se presentan al usuario, permitiendo así la determinación y decisión al finalizar la sesión. El resultado final de la sesión de ajuste se aplicará al controlador si el usuario decide hacerlo así. Una sesión de ajuste puede realizarse bien sea en bucle abierto, bien sea con el controlador en una operación de bucle cerrado. Durante el control adaptativo, el controlador funciona en bucle cerrado y los resultados del ajuste se aplican al controlador a medida que ocurren. Si el control será activo o no, y si será adaptativo, se determina mediante condiciones programadas y/o decisiones del operador.

En la Figura 3, se ilustra un sistema de control de la planeidad adaptativo, basado en el método de ajuste objeto de la invención. El bloque del controlador 10 puede interpretarse como siendo un controlador multivariables o varios controladores en bucles únicos. Este último caso se describe a continuación, en el supuesto de que la tarea de control se divide en varios bucles de control, igual al número de accionadores del tren de laminación, con cada bucle de control disponiendo de su propio controlador de entrada única – salida única.

Las salidas del controlador  $u(t)$  se aplican a los accionadores 3 o a los servomecanismos de accionadores, no ilustrados. Los movimientos de los accionadores afectan a la separación entre rodillos en la caja de laminación 2 y por ello, a las propiedades locales  $p(t)$  que acaba de pasar por la separación entre rodillos. El sistema de medición 6 detecta la distribución de la tensión  $s(t)$  a través de la banda 5 por intermedio del rodillo de medición 11 en una posición entre la separación entre rodillos y el bobinador 7. Con un sistema Stressometer,  $s(t)$  es muestreada cuatro veces por revolución del rodillo de medición. El sistema de medición de la planeidad 6 convierte la medición sin tratamiento en un perfil de planeidad  $z(t)$ . Esto puede implicar operaciones de filtrado y de nuevo muestreo. El vector  $z(t)$  suele tener una dimensión comprendida entre 16 y 64. El vector  $z(t)$  es comparado con la referencia de planeidad  $r(t)$  con el fin de obtener un valor de diferencia, el error de planeidad  $e(t)$ . Este error de planeidad  $e(t)$  se pone en correspondencia con el espacio de los accionadores para obtener el así denominado error parametrizado  $e^p(t)$ . La dimensión de  $u(t)$  y de  $e^p(t)$  es menor o igual al número de accionadores del tren de laminación 3.

El ajuste implica la inyección de señales de excitación añadidas a las salidas del controlador y el uso de valores agrupados de  $u(t)$  y de  $e^p(t)$  para la estimación de parámetros de un modelo del proceso para cada bucle de control. Al hacerlo de esta manera, se utiliza lo que es previamente conocido sobre el proceso, de modo que solamente necesiten estimarse los parámetros desconocidos. Los valores estimados de los parámetros desconocidos se utilizan entonces junto con lo que era conocido antes de formar un modelo completo, que describe la dinámica completa desde la salida del controlador a la entrada del controlador, de modo que pueda utilizarse para ajustar el controlador con una regla de ajuste basada en el modelo. La señal de excitación se genera hasta que la estimación de los parámetros sea suficientemente exacta.

Este ajuste proporciona, como un resultado, los parámetros del controlador que se van a utilizar. La estimación de parámetros, la formación de un modelo completo y el ajuste se realizan para cada bucle de control. La estimación de parámetros y el ajuste se realizan en línea y el resultado del ajuste se aplica también en línea para proporcionar un control adaptativo. Constituye una ventaja tener que estimar pocos parámetros en el control adaptativo. Pueden ser tan pocos como un solo parámetro por bucle de control, la ganancia del proceso. Su valor verdadero puede diferir de una bobina a otra, pero será el mismo a través de la misma bobina. Por lo tanto, el control adaptativo debe aplicarse durante la laminación inicial de una bobina, hasta que se haya encontrado el valor de la ganancia. A continuación, la señal de excitación es objeto de corte (puesta a cero) y no se realizará ninguna nueva estimación para ese bucle de control, pero la regla de ajuste se seguirá utilizando para proporcionar una programación de parámetros, puesto que el modelo será actualizado con el conocimiento previo actualizado, tal como velocidad de laminación, función de transferencia de filtrado y periodo de muestreo.

El mismo diagrama de bloques se aplica a una sesión de ajuste automático durante la puesta en servicio o reajuste, con la excepción de que los parámetros del controlador, proporcionados al controlador, no serán entonces continuamente actualizados para nuevos valores de parámetros estimados. Por el contrario, la progresión de las estimaciones se presentará al usuario para permitir su determinación, cuando se consideren los resultados satisfactorios y para finalizar la sesión y para abandonar la aplicación de señales de excitación. También es posible, en una sesión de ajuste automático, tener el controlador en el modo manual con solamente la señal de excitación que se aplica al accionador del tren de laminación implicado.

El diagrama de flujo de la Figura 4 da a conocer la secuencia de etapas que se ejecutan de forma repetida, a modo de ejemplo, de un sistema de control de la planeidad dado a conocer por la invención. La primera acción, descrita en el bloque 12, es obtener una medición de la planeidad desde el sistema de medición 6. El rodillo de medición 11 proporciona, en este caso, cuatro medidas por revolución y el sistema de medición 6 proporciona una nueva

medición, posiblemente filtrada, en esta tasa o en la tasa de muestreo descendente por un factor de número entero.

5 La siguiente acción 13 es formar o determinar el error de la planeidad como la desviación respecto a la referencia de planeidad. La medición es un vector y se sustrae de un vector de referencia correspondiente para formar el error de la planeidad.

10 La tercera etapa 14 es formar o determinar el error parametrizado, esto es, mapeado en correspondencia con el espacio de bucle de control. El número de bucles de control es menor que la dimensión del vector de medición, por lo que el error está previsto para ser la más pequeña dimensión en correspondencia con el número de bucles de control, utilizando la matriz del tren de laminación, que crea un modelo de la deformación de la banda por salida del controlador.

15 Una cuarta etapa 15 consiste en actualizar una estimación en línea de parámetros de modelos requeridos. Utilizando un modelo temporal continuo, algunas partes del modelo y su estructura se pueden tratar como conocidas, mientras que un pequeño número de parámetros se estima en línea según se ilustra en una figura separada.

20 Una etapa adicional 16 consiste en combinar las estimaciones de parámetros con partes conocidas para crear un modelo completo. Cuando se forma este modelo final, se tiene en cuenta todos los factores, esto es, parámetros estimados, parámetros constantes tratados como conocidos y también parámetros que pueden variar en una manera conocida, tales como velocidad de producción, periodo de muestreo y filtrado de medición (como programación de parámetros).

25 Otra etapa 17 es aplicar una regla de ajuste para obtener un ajuste del controlador actualizado. Cualquier modelo apropiado, basado en el método de ajuste, puede aplicarse a este respecto. Para los controladores de PI, el ajuste lambda, en combinación con la reducción del modelo a su forma de modelo requerida, primer orden más tiempo muerto, puede utilizarse a este respecto. Las entradas al sistema de ajuste son el modelo final y un parámetro ajustable que especifica la solución de compromiso requerida entre rendimiento y solidez operativa.

30 La séptima etapa 18 consiste en aplicar el control, esto es, calcular la salida del controlador con el accionamiento del controlador reajustado sobre el error parametrizado para este bucle. El controlador (presente invención un controlador de PI) mantiene el funcionamiento como el de cualquier controlador normal. Solamente obtiene sus parámetros de ajuste actualizados de forma aleatoria (ganancia y tiempo de reposición en el caso de un controlador de PI).

35 Las etapas del método 15 a 18 se repiten para cada bucle de control y las etapas del método 16 y 17 se pueden omitir si no existe ningún cambio en uno de entre los parámetros estimados para el bucle o los parámetros utilizados para la programación (velocidad, periodo de muestreo, filtro de medición).

40 La siguiente etapa 19 es efectuar un nuevo mapeado de correspondencia desde el espacio del bucle de control al espacio del accionador, si fueren diferentes. Si los accionadores están en correspondencia con un menor número de bucles de control, las salidas del controlador son también objeto de nueva correspondencia con el número real de accionadores.

45 La siguiente etapa 20 consiste en aplicar las salidas del controlador a los accionadores o a los puntos de ajuste de los servomecanismos de los accionadores. Suelen existir servomecanismos para cada accionador y en tales casos, las salidas del controlador se aplican a estos servomecanismos en lugar de aplicarse directamente a los dispositivos accionadores.

50 El diagrama de bloques de la Figura 5 ilustra las acciones o etapas esenciales de una forma de realización, a modo de ejemplo, para la estimación recursiva de parámetros físicos en un modelo dinámico temporal continuo según la invención. El proceso modelado tiene entradas que le influyen y están disponibles para su control y tiene las salidas correspondientes. Puede ser parte de un mayor proceso, en donde esta parte ha sido seleccionada para formar un bucle de control junto con el controlador que le está asignado, un solo bucle de entre posiblemente muchos.

55 El diagrama de bloques de la Figura 5 ilustra las actividades realizadas cuando una nueva medición se hace disponible. No necesita necesariamente ejecutarse con cada muestra, pero pueden realizarse posiblemente de forma más aleatoria en conformidad con un criterio determinado. Uno de dichos criterios se indica dentro del diagrama, una zona muerta de adaptación 21, lo que significa que cuando existe demasiada poca información en los datos, no se realizará ninguna actualización de los parámetros.

60 Las mediciones 22 se obtienen en instantes de muestreo, que pueden ocurrir a cualquier tasa de muestreo y los cambios de la entrada del proceso  $u$  se asocian con estos instantes de muestreo. De este modo, pares de  $y$  y de  $u$  son conocidos en la referencia 23 para un número de instantes atrás en el tiempo. Algunas de estas muestras de  $y$  y de  $u$  son agrupadas en un vector de regresión  $\phi(t)$  a utilizarse en un modelo temporal discreto para predecir la medición actual  $y(t)$ . El modelo actual se formula en tiempo continuo y algunos de parámetros pueden tratarse como conocidos, mientras que otros han de estimarse. En el instante  $t$ , la estimación previa de estos parámetros es el

vector  $\theta(t-1)$ . El modelo del proceso temporal continuo completo se forma en una etapa 24 que supone que estas estimaciones son los modelos verdaderos y este modelo se convierte en el modelo de predicción temporal discreto requerido en una etapa 25, que utiliza el periodo de muestreo adecuado. Al hacerlo así, también se tiene en cuenta el efecto de cualquier filtro de medición 26.

5 El error de predicción  $\varepsilon(t)$  se forma como la diferencia entre la medición real y la predicción en una etapa 27. Para la actualización de la estimación, el gradiente  $\Psi^T(t)$  de la predicción con respecto a los parámetros estimados es también necesario. Puede derivarse de forma analítica o puede obtenerse mediante diferenciación numérica en una etapa 28. El último método significa que las predicciones se calculan para un conjunto de modelos en donde los parámetros estimados son objeto de alguna perturbación. La diferencia en la predicción dividida por la perturbación en el parámetro es una aproximación de la derivada parcial requerida con respecto a ese parámetro.

10 En este momento operativo, con el error de predicción  $\varepsilon(t)$  y el gradiente de predicción transpuesto  $\Psi(t)$  derivado, el resto de la actualización de parámetros podría ser una cuestión de identificación recursiva estándar. Sin embargo, dos extensiones prácticas importantes se indican en el diagrama de bloques, la protección contra observaciones aberrantes 29 y la restricción de estimaciones de parámetros 30.

15 La protección contra observaciones aberrantes compara la magnitud del error de predicción presente con el que ha sido determinado de forma estadística y calcula un factor que reduce el efecto de grandes errores prácticamente como en la referencia 29. Véase la Figura 6, que presenta un ejemplo de este factor de creencia,  $f_b$ . La función implica la estimación en línea de la varianza de los errores de predicción, para comparar con la magnitud presente.

20 En un caso simple, esta estimación de la varianza se realiza simplemente mediante un filtrado de paso bajo de los errores de predicción cuadráticos.

25 Cuando la actualización de parámetros prevista alcanza un valor fuera del margen admitido para cualquier parámetro, se requiere una contramedida para hacer que la estimación quede dentro de dicho margen. Esto puede conseguirse de varias formas diferentes. La aquí indicada supone que el valor del parámetro verdadero radica dentro de los límites especificados. Una actualización que queda fuera de dicho margen se trata, por analogía con las observaciones aberrantes, mediante un escalamiento descendente del error de predicción y del gradiente de predicción con un factor común como en la etapa 30. El valor del factor puede seleccionarse para colocar la estimación actualizada exactamente en el límite del margen permitido o en alguna fracción o distancia dentro de dicho margen. Un método alternativo que no requiere que el valor verdadero de un parámetro esté dentro del margen permitido, es establecer la estimación de parámetro inadmisibles para el límite y volver a estimar los parámetros restantes. Esta operación se realiza eficientemente como una estimación de Markov de los parámetros restantes, tratando la estimación original como una medición que fue perturbada con un ruido blanco con una covarianza igual a la matriz de covarianza  $P$  asociada con la estimación recursiva.

30 El gradiente de predicción  $\Psi_r(t)^T$  y el error de predicción  $\varepsilon_r(t)$ , después de una posible reducción debida a la detección de observaciones aberrantes o estimaciones que tienden a estar fuera de la zona permitida, se utilizan para determinar la dirección y magnitud de la acción de actualización de estimación de parámetros 31. La ganancia del estimador  $K(t)$  multiplica el error de predicción  $\varepsilon_r(t)$  y esta ganancia se determina en la etapa 32 por el gradiente de predicción y la matriz de covarianza  $P$  en el instante anterior. En caso de que se utilice un factor de olvido,  $\lambda$  se calcula como  $K(t) = P(t-1)\Psi_r(t)[\lambda + \Psi_r(t)^T P(t-1) \Psi_r(t)]^{-1}$ .

35 En la acción de actualización 33 de la matriz de covarianza  $P$ , existen varios aspectos prácticos a considerar. El del factor de olvido es ampliamente conocido. Si se pone en práctica como un olvido uniforme o un olvido direccional o se basa en un método de filtro de Kalman o se dirige a un objetivo en la traza de  $P$ , puede ser una cuestión optativa. En relación con el olvido está también el riesgo de disolución de la covarianza. Puede efectuarse una contramedida absteniéndose de actualizar en absoluto, cuando existe demasiada poca información, como será el caso de cuando se aplique una zona muerta de adaptación adecuada. La matriz de covarianza suele actualizarse en forma factorizada, a modo de ejemplo, por escrito como  $P = LDL^T$  y la actualización  $L$  (matriz triangular más baja con diagonal unitaria) y  $D$  (matriz diagonal) en lugar de la propia matriz  $P$ .

40 El algoritmo básico para la identificación recursiva, basada en errores de predicción, se presenta a continuación, véase capítulo 9.5 de Soderstrom and Stoica, "Identificación de sistema" (Prentice Hall, 1989).

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= y(t) - \hat{y}(t|t-1; \hat{\theta}(t-1)) \\ \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \\ K(t) &= P(t)\psi(t) = P(t-1)\psi(t)[1 + \psi^T(t)P(t-1)\psi(t)]^{-1} \\ P(t) &= P(t-1) - K(t)\psi^T(t)P(t-1)\end{aligned}\tag{1}$$

Las expresiones para la predicción  $\hat{y}(t|t-1; \hat{\theta}(t-1))$  y su gradiente  $\psi^T(t)$  con respecto al vector de parámetro dependerán de la formulación del modelo y de los supuestos con respecto al carácter de las perturbaciones. Para el caso de identificación de un modelo temporal continuo en donde la predicción y respuesta actuales implican datos muestreados de forma equidistante, el siguiente método es posible. Un vector  $\theta_s(\hat{\theta}(t-1))$  que mantiene los correspondientes parámetros del modelo de predicción temporal discreto se calcula a partir del modelo obtenido con la estimación  $\hat{\theta}(t-1)$  utilizando el periodo de muestreo real y los valores implicados de muestras de medición y variables manipuladas (las que se requieren para la predicción) se agrupan en un vector  $\varphi(t-1)$ . En tal caso, la predicción se forma como

$$\hat{y}(t|t-1; \hat{\theta}(t-1)) = \varphi^T(t-1)\theta_s(\hat{\theta}(t-1))\tag{2}$$

Existe, en este caso, un supuesto subyacente de que las perturbaciones pueden modelarse en función de lo que se conoce como una estructura 'arx' para el modelo temporal discreto. (arx = auto-regresiva con control). Un modelo 'arx' se suele escribir (con e(t) indicando la presencia de ruido blanco):

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) = b_1u(t-k) + \dots + b_{n_b}u(t-k-n_b+1) + e(t)\tag{3}$$

El factor de predicción hacia delante para este modelo es del tipo anteriormente indicado en la expresión (2), con

$$\begin{aligned}\varphi^T(t-1) &= [-y(t-1) \quad \dots \quad -y(t-n_a) \quad u(t-k) \quad \dots \quad u(t-k-n_b+1)] \\ \theta_s^T &= [a_1 \quad \dots \quad a_{n_a} \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n_b}]\end{aligned}\tag{4}$$

Con este método, las medidas a tomar para poder formar el vector de parámetro temporal discreto requerido implican la formación del modelo temporal continuo – basado en los parámetros estimados y en cualquier otro factor conocido – y a continuación, se convierten en un tiempo discreto, en una manera bien conocida, y expresando el modelo resultante en la forma de función de transferencia, de modo que los parámetros  $a_1 \dots a_{n_a} \quad b_1 \dots b_{n_b}$  y k se obtengan a este respecto. Lo que antecede se ilustra por la forma de realización, a modo de ejemplo, siguiente. Un proceso de primer orden con un tiempo muerto que depende, en parte, del caudal de transporte,  $v$ , el modelo temporal continuo es, en esta realización, a modo de ejemplo:

$$\frac{K}{1 + \tau s} e^{-D_0 s} e^{-L/v s}\tag{5}$$

En un caso real  $L$  probablemente se consideraría como un parámetro conocido así como el caudal o la velocidad,  $v$ . los parámetros restantes, la ganancia  $K$ , la constante de tiempo  $\tau$  y la parte independiente de la velocidad  $D_0$  del tiempo muerto – se consideran conocidos o constituyen parte del vector de parámetro estimado  $\theta$ , lo que significa que son los que obtienen sus valores mediante estimación recursiva. De este modo, se forma el modelo (5). El modelo temporal discreto correspondiente para el periodo de muestreo  $h$  es:

$$K \frac{1 - \beta + (\beta - \alpha)q^{-1}}{1 - \alpha q^{-1}} q^{-k}\tag{6}$$

en donde  $\alpha = e^{-h/\tau}$ ,  $\beta = e^{-(kh-D)/\tau}$ ,  $D = D_0 + L/v$ , y  $k$  es  $\frac{D}{h}$  redondeado al número entero superior más próximo. De este modo, el modelo arx correspondiente es de la forma (3), con  $k$  como se indicó anteriormente y

$$a_1 = -\alpha \quad b_1 = K(1 - \beta) \quad b_2 = K(\beta - \alpha) \quad n_a = 1 \quad n_b = 2 \quad (7)$$

5 En un caso general, el modelo temporal continuo sería más adecuadamente formulado como un modelo de espacio de estado, que se convierte primero a un modelo de espacio de estado temporal discreto y luego, a una forma de función de transferencia, todavía en conformidad con la realización, a modo de ejemplo, anterior ilustrada. El método permite cualquier combinación de parámetros conocidos y desconocidos en el modelo completo. Si, a modo de ejemplo, existe un filtro aplicado a las mediciones sin tratamiento para obtener los valores muestreados disponibles para uso en la identificación, entonces ese filtro conocido se consideraría en la derivación de las expresiones para los parámetros  $a_1 \dots a_{n_a} \quad b_1 \dots b_{n_b}$ .

10 El gradiente de predicción requerido  $\psi^T(t)$  puede derivarse de forma analítica, en particular para estructuras de modelos simples. Como alternativa, puede obtenerse mediante diferenciación numérica en la forma siguiente. Una pequeña desviación se introduce en cada uno de los parámetros estimados (elementos de  $\theta$ ), uno a uno, y la predicción se calcula para cada caso. La desviación resultante en la predicción se divide luego por la desviación del parámetro, para cada uno de los parámetros estimados, para formar el elemento correspondiente del gradiente.

15 Si hubieran de estimarse los parámetros del modelo temporal discreto, tales como  $a_1 \dots a_{n_a} \quad b_1 \dots b_{n_b}$  del tipo de modelo (3), se puede derivar desde (6) y desde (7) para la realización de primer orden, a modo de ejemplo, que las variaciones en cualquiera de los parámetros reales de ganancia ( $K$ ), constante de tiempo ( $\tau$ ) o tiempo muerto independiente de la velocidad ( $D_0$ ) afectarán a por lo menos dos de los parámetros estimados  $a_1$ ,  $b_1$  y  $b_2$ . Puesto que cualquier variación en los parámetros básicos verdaderos de ganancia ( $K$ ), constante de tiempo ( $\tau$ ) o tiempo muerto independiente de la velocidad ( $D_0$ ) están previstos que sean independientes entre sí, y también debido a que es posible, para cualquier usuario, interpretar el significado de sus valores, su estimación directa es mejor que la estimación de  $a_1$ ,  $b_1$  y  $b_2$ . El usuario será capaz de determinar si los valores estimados son admisibles. Los cálculos implicados para estimar los parámetros del modelo temporal continuo son más complejos, pero ese problema se puede resolver con el hardware actual fácilmente disponible, una vez que se realice la puesta en práctica del software requerido de los algoritmos desarrollados.

20 El ajuste del controlador está basado en un modelo del proceso. También se tiene en cuenta el efecto de muestreado y en particular, de los filtros aplicados a la medición. Cualquier método de ajuste basado en el modelo, adecuado para los tipos de modelos y controladores utilizados, podría aplicarse a este respecto. Para el control de PI, un ajuste muy simple es conocido como ajuste lambda, que tiene como objetivo un sistema de bucle cerrado con un valor lambda ( $\lambda$ ) de constante de tiempo especificada. Con frecuencia, el usuario especifica el factor lambda, o factor de desaceleración,  $\lambda_f$ , en lugar del propio factor lambda. En su forma básica bien conocida, el ajuste lambda solamente es aplicable al sistema de primer orden con o sin tiempo muerto. Puede aplicarse también a un modelo de más alto orden, después de la simplificación del modelo al orden uno. A modo de ejemplo de una reducción de orden de modelo simple, un modelo de tercer orden, con tres constantes de tiempo y un tiempo muerto

$$\frac{Ke^{-Ds}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)(1 + \tau_3 s)} \quad T_1 \geq T_2 \geq T_3 \quad (8)$$

30 puede, para esta finalidad, aproximarse con el modelo de primer orden más el valor del tiempo muerto

$$\frac{Ke^{-D_r s}}{1 + \tau_1 s} \quad D_r = D + \frac{\tau_2 + \tau_3}{2} \quad (9)$$

35 En tal caso, el ajuste lambda aplicado a este modelo proporciona la ganancia  $k$  y el tiempo de reposición  $T_1$  del controlador PI como

$$T_1 = \tau_1 \quad k = \frac{T_1}{K(\lambda + D_r + T_s)} = \frac{T_1}{K\left(\lambda + D + \frac{\tau_2 + \tau_3}{2} + T_s\right)} \quad (10)$$

50

si el periodo de muestreo del controlador es  $T_s$ . Esto resume una variante del ajuste lambda para modelos con una, dos o tres constantes de tiempo y un tiempo muerto ( $T_3$  y  $T_2$  se permiten que sean cero en la fórmula (10)). El factor lambda  $\lambda$  en (10) sería determinado a partir del factor lambda  $\lambda_f$  como

$$\lambda = \lambda_f \left( \tau_1 + D + \frac{\tau_2 + \tau_3}{2} \right) \quad (11)$$

Si existe un filtro de medición, no incluido en el modelo del proceso, se tiene en cuenta incluyéndolo en el modelo dinámico a reducirse al primer orden. El caso de un filtro FIR (respuesta de un pulso finito) con  $n_f$  coeficientes iguales, a modo de ejemplo, pueden, para esta finalidad aproximarse con una constante de tiempo de primer orden  $\tau_f = (n_f - 1)T_b/2$ , en donde  $T_b$  es el periodo de muestreo del filtro.

Existen otras variantes de la formulación precisa del ajuste lambda, con respecto, a modo de ejemplo, a la inclusión del periodo de muestreo  $T_s$  en la fórmula, la relación entre la aplicación de  $\lambda$  y  $\lambda_f$  para integrar los procesos y para la aplicación a modelos de más alto orden también en la forma de reducir el orden del modelo. Dichas variantes no se detallan en esta descripción. Además, el ajuste lambda solamente se menciona a modo de ejemplo y el método descrito de la invención es igualmente bien aplicable con otras variantes de ajuste basado en modelos.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método para ajustar un controlador (10) que controla una propiedad ( $p(t)$ ) de un proceso industrial que tiene un caudal de materiales variable, pero conocido, cuyo método comprende:
- 5
- la inyección de señales de excitación añadidas a la señal de salida del controlador ( $U(t)$ ),
  - la recepción de medidas ( $z(t)$ ) de dicha propiedad en respuesta a dichas señales de excitación,
- 10
- la selección de una primera estructura de modelo de proceso que comprende uno o varios parámetros desconocidos,
  - la estimación del valor de dichos uno o más parámetros desconocidos, basándose en dichas medidas ( $z(t)$ ) de dicha propiedad y en una señal de salida ( $u(t)$ ) procedente del controlador, caracterizado por cuanto que dicho
- 15
- primer modelo de proceso es continuo en el tiempo y describe el efecto del caudal variable de materiales y dichos uno o más parámetros desconocidos son independientes del caudal variable de materiales y el método comprende, además:
- calcular un segundo modelo que describe la dinámica, desde la salida del controlador a la entrada del controlador, basada en el primer modelo de proceso, los valores estimados de dichos uno o varios parámetros desconocidos y parámetros conocidos, incluyendo el caudal conocido de los materiales y
  - realizar el ajuste basado en el modelo del controlador en conformidad con el segundo modelo.
- 20
2. Un método según la reivindicación 1, en donde el método comprende:
- la selección de una estructura de modelo de proceso que comprende, como máximo, un parámetro de modelo por par de entrada/salida que es afectado por la variación de la ganancia real del proceso.
- 25
3. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:
- la selección de una estructura de modelo de proceso que comprende, como máximo, un parámetro de modelo por accionador que es afectado por la variación de los tiempos de respuesta reales de los accionadores.
- 30
4. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:
- la inclusión, en el modelo de proceso, de todos los retardos debidos al procesamiento de datos y a la comunicación,
  - la selección de dicha estructura de modelo de proceso de tal modo que las variaciones de dichos retardos no influyan en más de un parámetro de modelo por entrada de modelo.
- 35
5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:
- la composición de dicha estructura de modelo de proceso en dos partes, una parte que describe el comportamiento del transporte en donde los posibles tiempos muertos y las posibles constantes de tiempo son inversamente proporcionales al caudal de materiales y otra parte que es independiente del caudal de materiales.
- 40
6. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:
- la deducción de un modelo de primer orden más tiempo muerto para cada parte de dicho modelo,
  - la introducción de un parámetro del comportamiento de transporte  $\xi$  que define el grado de tiempo muerto puro en relación con la respuesta de primer orden pura del comportamiento del transporte,
  - teniendo, en el caso del comportamiento de transporte de tiempo muerto puro, el tiempo muerto descrito por la distancia conocida  $L_d$ ,
  - teniendo, en el caso de comportamiento de transporte de primer orden puro, la constante de tiempo asociada descrita por la distancia conocida  $L_m$  y
  - la estimación de al menos uno de los parámetros de entre la ganancia ( $K$ ), la constante de tiempo independiente del caudal ( $T$ ), el tiempo muerto independiente del caudal ( $D_0$ ) y el parámetro del comportamiento de transporte ( $\xi$ ).
- 45
- 50
- 55
- 60
- 65

7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la selección de la estructura de modelo de proceso

$$\frac{Ke^{-D_0s}}{1 + \tau s} \frac{e^{-\frac{L_d}{v}s}}{1 + \frac{L_m}{v}(1 - \xi)s}$$

5

8. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la estimación de al menos un parámetro utilizando un método de error de predicción.

10

9. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la reducción de la magnitud de actualización de los parámetros, cuando la actualización sin restricciones alcanza el exterior de una zona de gamas de parámetros permitidos definidas, pero realizando la actualización de parámetros en la misma dirección en el espacio de los parámetros,

15

- la aplicación del mismo factor de reducción a los regresores y al error de predicción, a utilizarse, a la vez, en la actualización de los parámetros y en la actualización de una matriz que contiene la información necesaria en la estimación recursiva y

20

- manteniendo así las estimaciones de los parámetros dentro de los límites de las gamas permitidas.

10. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la reducción, para el caso de grandes errores de predicción, del efecto de las medidas y regresores según un factor de creencia calculado a partir de la relación entre la magnitud del error de predicción y de la desviación estándar estimada de errores de predicción anteriores,

25

- obteniendo así una protección contra las observaciones aberrantes.

30

11. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- el muestreo de las salidas de procesos a una cadencia de muestreo de básica, la aplicación de un filtro con la misma cadencia de muestreo y el re-muestreo a una cadencia de muestreo más lenta, utilizándose esta cadencia para dicho registro de valores procedente de la utilización del proceso e incluyendo el efecto de este muestreo, filtrado y re-muestreo en los cálculos de previsión y actualizaciones de estimaciones de parámetros.

35

12. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la realización de un experimento de identificación que implica la utilización del proceso con una excitación intencionada que influye al menos en una variable manipulada,

40

- la estimación de al menos un parámetro en línea durante dicho experimento de identificación.

45

13. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- el cálculo de dicho ajuste basado en el modelo del controlador en línea.

14. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la presentación de resultados a un usuario en tiempo real,

50

- permitiendo así la decisión del usuario de finalizar el experimento de identificación tan pronto como se hayan obtenido resultados operativamente satisfactorios.

55

15. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:

- la estimación de al menos un parámetro en línea durante la utilización del proceso y mientras se le controla con dicho controlador,

60

- la realización de dichos cálculos de ajuste en conformidad con el modelo para el controlador en línea,

- la aplicación del resultado del ajuste a dicho controlador en línea,
  - obteniendo así un control adaptativo real.
- 5
16. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:
- la estimación de menos parámetros, durante la utilización con la actualización en línea del controlador, que durante el experimento de identificación,
- 10
- la admisión del resultado de la estimación de los parámetros, procedentes del experimento de identificación, para definir el valor de al menos un parámetro y tratando este parámetro, o estos parámetros, como conocidos durante la utilización del proceso con una actualización en línea del controlador.
- 15
17. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el método comprende:
- la utilización del ajuste lambda o del ajuste IMC como método de ajuste sobre la base de modelo para dicho controlador.
- 20
18. Un dispositivo para ajustar un controlador (10) que controla una propiedad (p(t)) de un proceso industrial que tiene un caudal de materiales variable, pero conocido, que comprende:
- un sumador (10b) para añadir señales de excitación a la señal de salida del controlador (U(t)),
- 25
- un sistema de medición (6) para medir dicha propiedad en respuesta a dichas señales de excitación y
  - una unidad de ajuste basada en modelo (10c) adaptada para estimar el valor de uno o varios parámetros desconocidos de una estructura de modelo de proceso sobre la base de las medidas (z(t)) de dicha propiedad y en la señal de salida (u(t)) procedente del controlador, caracterizada por cuanto que la unidad de ajuste basado en modelo está adaptada
- 30
- para estimar el valor de uno o varios parámetros, con valores desconocidos, de una primera estructura de modelo de proceso, que es continua en el tiempo y que describe el efecto del caudal variable de los materiales y siendo dichos uno o varios parámetros desconocidos independientes del caudal variable de los materiales y para calcular un modelo que describe la dinámica desde la salida del controlador a la entrada del controlador sobre la base del primer modelo de proceso, de los valores estimados de dichos uno o varios parámetros desconocidos y parámetros conocidos incluyendo el caudal conocido de los materiales y para realizar el ajuste basado en un modelo del controlador sobre la base del segundo modelo.
- 35
- 40
19. Un producto de programa informático directamente cargable en la memoria interna de un ordenador, que comprende un programa informático para realizar las etapas de un método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 17.
- 45
20. Un medio de soporte legible por ordenador, que tiene un programa registrado en dicho soporte, en donde este programa tiene por función hacer ejecutar, por un ordenador, las etapas de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 17, cuando dicho programa se ejecuta en el ordenador.

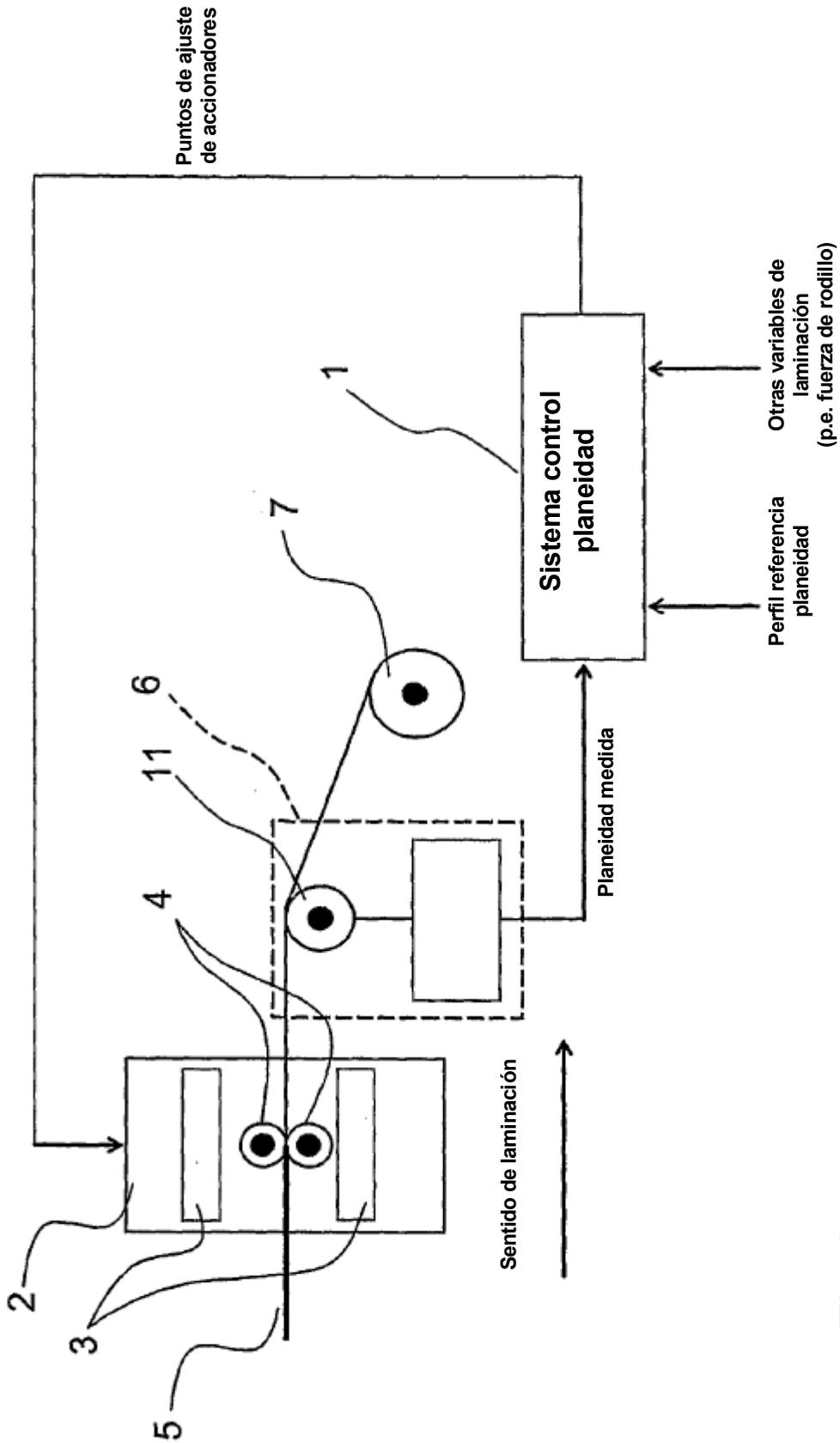


Fig.1

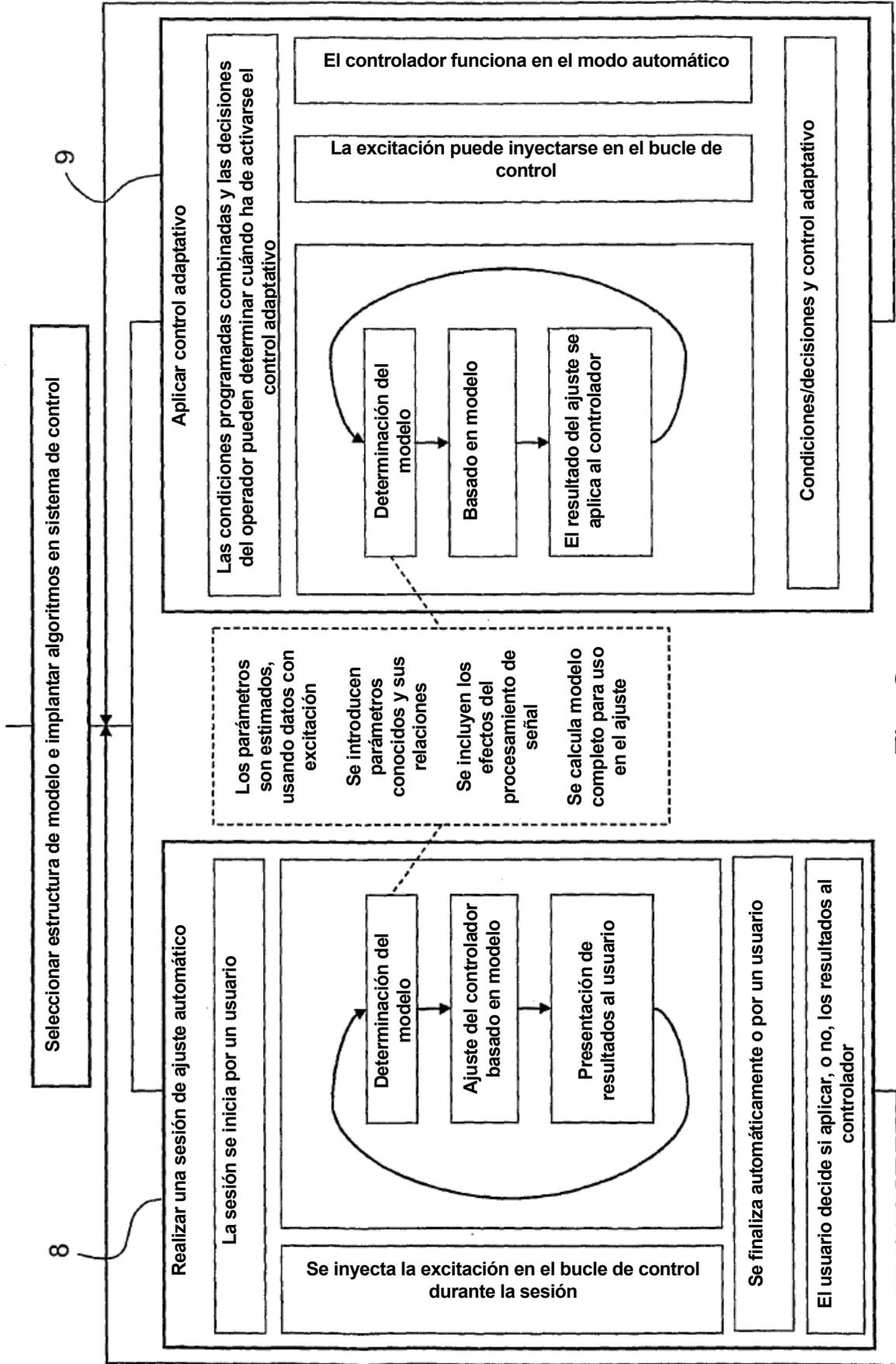


Fig. 2

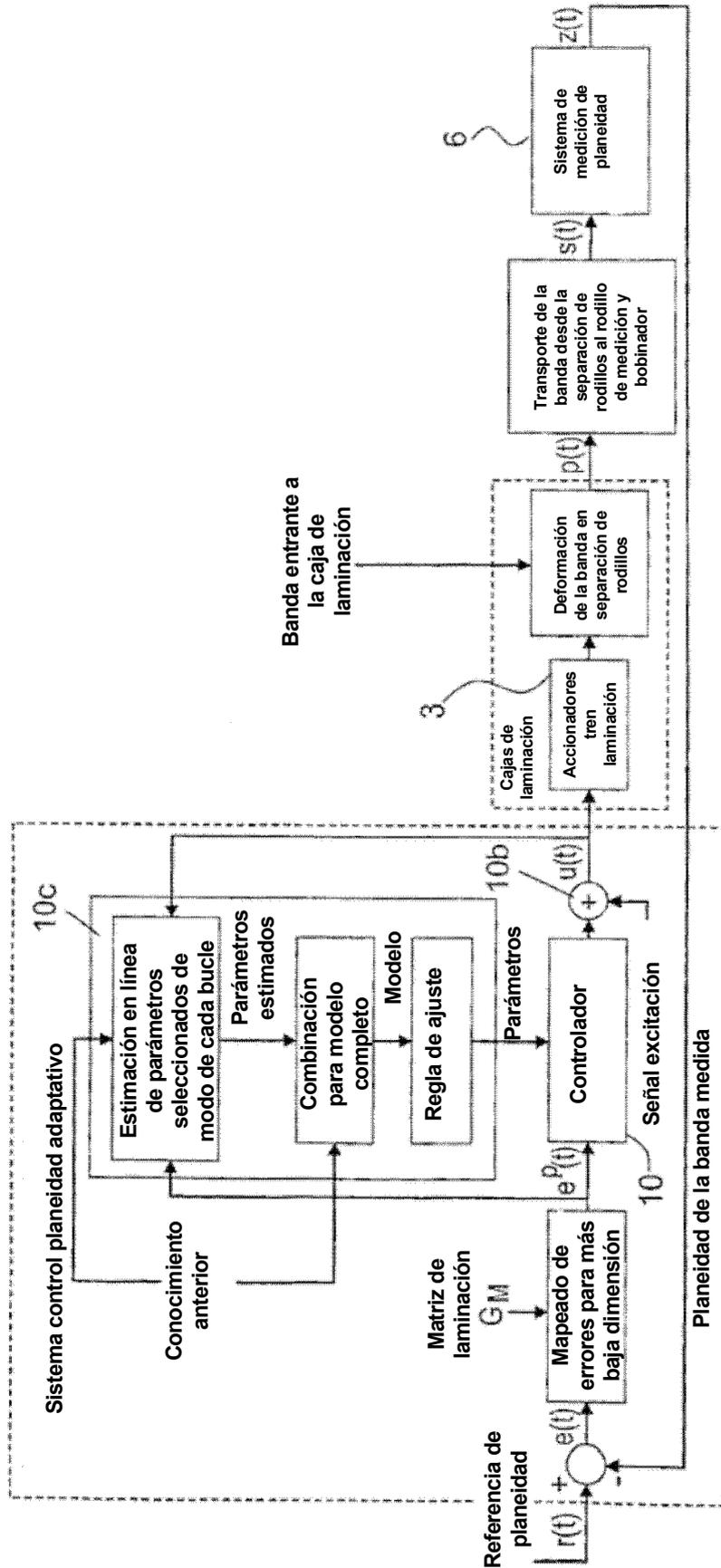


Fig. 3

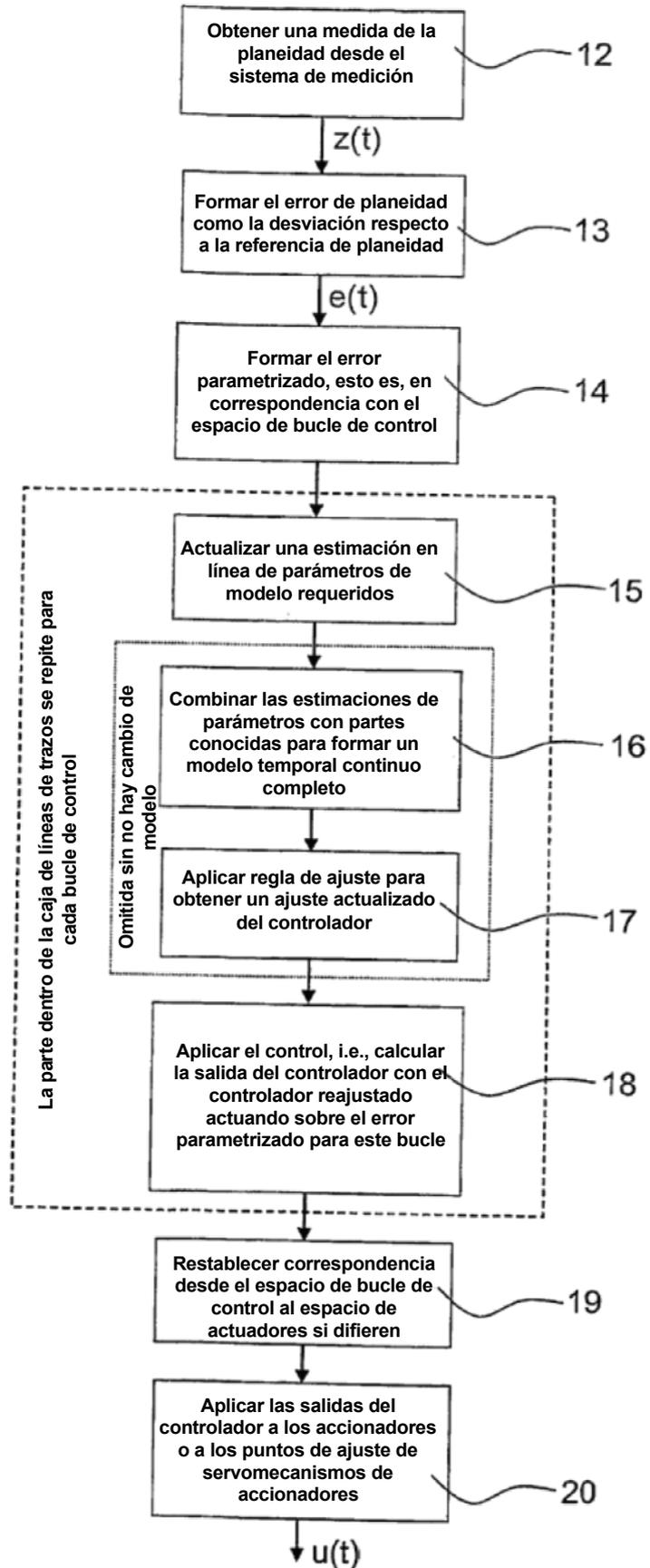


Fig. 4

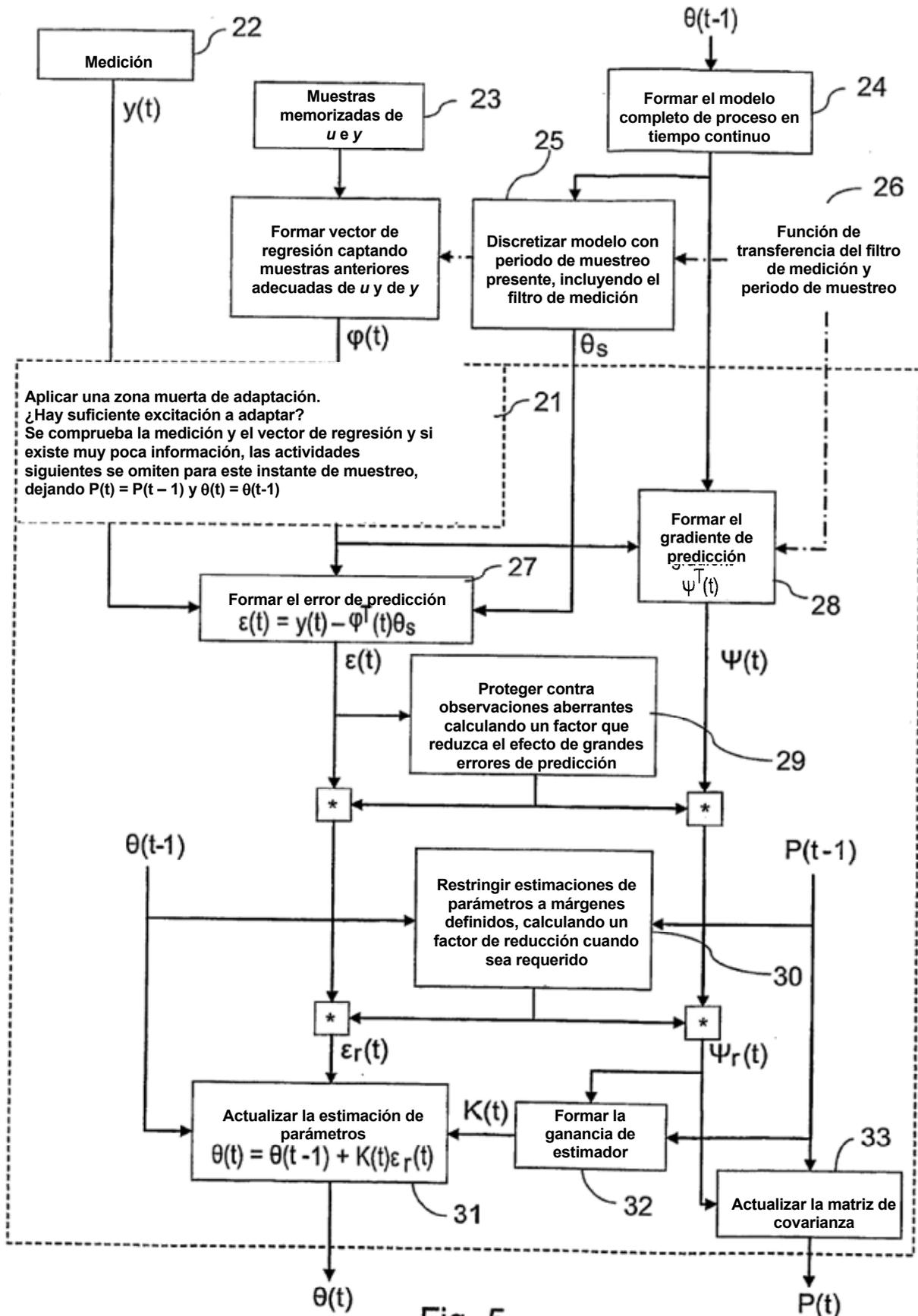


Fig. 5

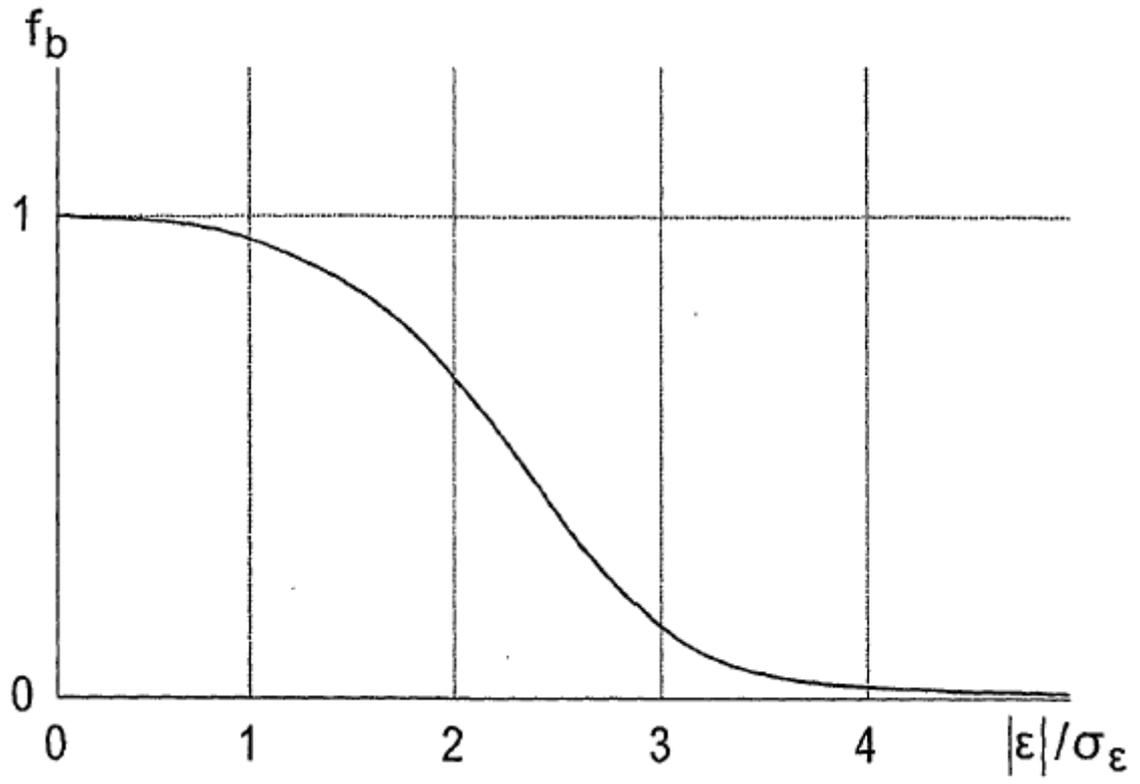


Fig. 6