

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 575 529**

51 Int. Cl.:

**G05B 13/02** (2006.01)

**G05B 23/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.01.2002 E 02717347 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.03.2016 EP 1360557**

54 Título: **Modelización adaptativa de estados cambiados en la monitorización de condición predictiva**

30 Prioridad:

**19.01.2001 US 262747 P**  
**27.02.2001 US 795509**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**29.06.2016**

73 Titular/es:

**GE INTELLIGENT PLATFORMS, INC. (100.0%)**  
**2500 Austin Drive**  
**Charlottesville, VA 22911, US**

72 Inventor/es:

**WEGERICH, STEPHAN, W.;**  
**BELL, DAVID, R. y**  
**XU, XIAO**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 575 529 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**

Modelización adaptativa de estados cambiados en la monitorización de condición predictiva

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere a la monitorización de máquinas y procesos físicos para la detección precoz de un fallo inminente del equipo o perturbación del proceso y, en línea, la validación continua de la operación del sensor. Más particularmente, la invención se refiere a sistemas y procedimientos que rigen la adaptación de modelos empíricos a las condiciones modificadas en los sistemas citados, y la resolución de cambio de proceso desde un cambio de sensor.

**Antecedentes de la invención**

10 Una variedad de nuevas y avanzadas técnicas han surgido en el control de procesos industriales, el control de la máquina, la monitorización del sistema, y la monitorización basadas en la condición para hacer frente a los inconvenientes de control y alarmas tradicionales basados en el umbral del sensor. Las técnicas tradicionales hicieron poco más que ofrecer respuestas a los cambios en las cifras brutas individuales de un proceso o máquina, a menudo no proporcionando una advertencia adecuada para evitar los cierres inesperados, daños en los equipos, la  
15 pérdida de la calidad del producto o de los riesgos de seguridad catastróficos.

De acuerdo con una rama de las nuevas técnicas, modelos empíricos del proceso o máquina monitorizados se usan en la detección y control de fallos. Tales modelos aprovechan de forma efectiva una visión global de los datos del sensor de monitorización para alcanzar mucho antes detección de fallos incipientes y un control de procesos más fino. Al modelar los muchos sensores en un proceso o máquina al mismo tiempo y en vista de los otros, el sistema  
20 de monitorización puede dar más información acerca de cómo cada sensor (y su parámetro medido) debería comportarse. Un ejemplo de dicho sistema de monitorización empírica se describe en la patente U.S. n.º 5.764.509 de Gross et al. En ella se describe un modelo empírico utilizando un operador de similitud en contra de una biblioteca de referencia de los estados conocidos del proceso monitorizado, y un motor de estimación para generar estimaciones de los estados actuales del proceso en base a la semejanza de funcionamiento, junto con una prueba  
25 de hipótesis estadística sensible para determinar si el estado del proceso actual es un estado normal o anormal. Otros sistemas de monitorización basados en modelos empíricos conocidos en la técnica emplean redes neuronales para modelar el proceso o máquina que se monitoriza.

El documento US-A-4 215 412 se refiere a un sistema para analizar el funcionamiento de aplicaciones aeronáuticas de motor a turbina de gas. De acuerdo con este sistema, las señales de parámetros físicos suministrados por el  
30 conjunto de sensores son utilizados por una simulación de parámetros del motor para determinar los valores estimados de un número de parámetros de funcionamiento del motor. Estos valores estimados son comparados en una unidad de diferencia con el valor corriente real de cada uno de los parámetros del motor dependiente suministrados por los sensores. La unidad de diferencia es una disposición que determina la diferencia en valor entre cada parámetro de funcionamiento dependiente monitorizado y el valor estimado correspondiente. Una  
35 disposición lógica de fallos identifica los fallos dentro de los sensores del sistema, el procesador o el motor. Estos fallos se visualizan en una unidad de visualización.

Tales sistemas de monitorización basados en modelos empíricos requieren como parte de la instalación y puesta en práctica algunos datos de referencia que caracterizan el funcionamiento normal del proceso o máquina bajo  
40 monitorización. El modelo empírico incorpora estos datos operacionales normales de línea de base, y sólo es bueno cuando los datos representan el funcionamiento normal. Un gran reto para el éxito del modelo empírico en el sistema de monitorización, por lo tanto, es proporcionar datos suficientemente representativos cuando se construye el modelo empírico. En la práctica, esto es, posiblemente, el mayor obstáculo para la implementación exitosa de los sistemas de monitorización basados en modelos empíricos.

Un primer problema es si utilizar los datos de un mero proceso similar o el proceso idéntico al que se está  
45 supervisando. Esto es especialmente significativo en la monitorización de una máquina de productos básicos, es decir, una máquina que va a ser producida en masa con la monitorización de la condición de a bordo. En tales circunstancias, puede que no sea posible o práctico reunir datos operativos normales de cada máquina para construir modelos empíricos únicos de antemano. Lo que se necesita es una manera de construir un modelo general en las máquinas de nuevo cuño, y permitir que el modelo se adapte a las tolerancias y comportamiento únicos de  
50 cada máquina en particular en el campo.

Un segundo problema se presenta como el proceso o máquina monitorizados se asienta con la edad, a la deriva de la línea de base normal original, pero estando todavía en buenas condiciones de funcionamiento. Es extremadamente difícil capturar dichos datos operacionales normales, a partir de un proceso o máquina para los que  
55 en la actualidad no constituiría un funcionamiento normal. Lo que entonces se necesita es una manera para que el modelo empírico se adapte a los cambios aceptables en el funcionamiento normal del proceso o de la máquina con la edad, sin sacrificar la sensibilidad de monitorización que hizo necesaria el enfoque de modelo empírico en el primer lugar.

Un tercer problema existe en las que no es posible capturar el rango normal de funcionamiento completo de datos de los sensores a partir del proceso debido al valor económico o productivo de no interrumpir el proceso. Por ejemplo, en la adaptación de un proceso industrial existente con monitorización basada en un modelo empírico, puede que no sea económicamente factible sacar efectivamente el proceso fuera de línea y ejecutarlo a través de sus múltiples modos de funcionamiento. Y pueden ser meses o años antes de que se empleen todos los modos de funcionamiento. Por lo tanto, lo que se necesita es una manera de adaptar el modelo empírico cuando los modos de funcionamiento de la máquina o proceso se encuentran por primera vez.

En resumen, para que un sistema de monitorización de proceso basado en modelo empírico para funcionar de forma fiable, los datos utilizados para generar el modelo deben abarcar el rango de funcionamiento del proceso completo. En muchos casos los datos no están disponibles inicialmente. Por lo tanto, es necesaria la adaptación del modelo para mantener el modelo hasta a la fecha y válido. Pero la adaptación impone obstáculos significativos propios. Uno de estos obstáculos es determinar exactamente cuándo comenzar la adaptación del modelo, especialmente para procesos dinámicos no lineales. Aunque en algunos casos la intervención humana puede ser invocada para indicar manualmente cuando adaptarse, en la gran mayoría de las circunstancias es deseable automatizar esta determinación. Otro de estos obstáculos es determinar cuándo debe dejar de adaptar el modelo y reiniciar la monitorización del proceso o de la máquina. Sin embargo, otro problema es distinguir la necesidad de adaptación a partir de una alteración del proceso o un fallo del sensor que debe ser alarmado correctamente. Es altamente deseable evitar "el cebado" en un fallo de deriva lenta en el proceso, por ejemplo. Sin embargo, otro problema es evitar la adaptación durante un período de transición entre un estado estable y otro, durante el cual los datos del sensor pueden no son típicamente representativos tanto cualquiera de cualquier estado o de un nuevo estado operativo normal del proceso o máquina. Sin embargo, otro problema en la adaptación del modelo empírico es que el modelo puede crecer y llegar a ser menos preciso o menos específico debido a la adición de nuevos estados. Por lo tanto, sería beneficioso tener una manera de eliminar los estados menos comúnmente encontrados a partir del modelo, mientras que se añaden los nuevos estados adaptados.

### **Sumario de la invención**

Los problemas y desventajas de la técnica anterior se resuelven mediante la presente invención tal como se reivindica en las reivindicaciones independientes. Las formas de realización ventajosas y preferidas de la invención se definen mediante las reivindicaciones dependientes.

De acuerdo con un ejemplo, se proporciona un sistema basado en modelo empírico mejorado para el control de un proceso o máquina y monitorización basada en la condición.

Esta invención es un procedimiento y aparato para decidir cuándo un modelo empírico de un proceso o máquina debe ser adaptado para abarcar el cambio de los estados en ese proceso o máquina, según lo medido por los sensores, las variables derivadas, medidas estadísticas o similares. La técnica se basa en la información proporcionada por una tecnología de medición de similitud y las herramientas de toma de decisiones estadísticas. Este sistema tiene una segunda característica en que determina cuándo detener el proceso de adaptación del modelo. Este sistema tiene una capacidad de distinguir entre los casos de cambio de instrumento y cambio de procesos.

En un proceso o máquina que esté completamente instrumentado con sensores para todos los parámetros de interés, los datos de sensor se recogen para todos los regímenes posibles de funcionamiento posterior esperado de los mismos o similares procesos o máquinas. Estos datos recogidos forman una historia de la que el sistema de la invención puede "aprender" el funcionamiento deseado o normal del proceso o máquina, usando rutinas de entrenamiento que destilan a un conjunto representativo de datos del sensor. El uso de este conjunto de entrenamiento representativo de datos del sensor, la presente invención es capaz de monitorear el proceso o máquina en funcionamiento en tiempo real (o en modo por lotes, si se prefiere), y generar estimaciones para todos los sensores, incluyendo algunos de los sensores para que se recogieron datos históricos, pero que han fallado o que se quitaron del proceso o máquina. La presente invención puede emplearse como un medio de adaptar el conjunto representativo de datos de sensor para acomodar cambios en el sistema monitorizado que se consideran dentro del rango de funcionamiento aceptable o normal.

El aparato de la presente invención se puede implementar como un dispositivo accionado eléctricamente con memoria y un procesador, ubicado físicamente en o cerca del proceso o máquina monitorizados. Alternativamente, puede estar situado de forma remota desde el proceso o máquina, como un módulo en un ordenador que recibe datos del sensor desde los sensores en vivo en el proceso o máquina mediante una red o instalación de transmisión inalámbrica.

### **Breve descripción de los dibujos**

Las características novedosas características de la invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas. La propia invención, sin embargo, así como el modo preferido de uso, otros objetivos y ventajas de la misma, se entienden mejor mediante la referencia a la siguiente descripción detallada de las formas de realización en conjunción con los dibujos adjuntos, en donde:

La figura 1 ilustra un diagrama de bloques de la invención para la adaptación de un sistema de monitorización basado en un modelo empírico para un proceso instrumentado o máquina;

La figura 2 ilustra un procedimiento para crear una representación de datos de “entrenamiento” establecidos a partir de datos de sensor recogidos para su uso en la invención;

5 La figura 3 ilustra un diagrama de flujo para la creación de una representación de datos de “entrenamiento” establecidos a partir de datos de sensor recogidos para su uso en la invención;

La figura 4 ilustra el cálculo de uno de los operadores de similitud empleados en la presente invención;

La figura 5 ilustra un gráfico de los valores de similitud globales que muestran un movimiento en la transición de un estado operativo mediante el proceso o máquina monitorizados;

10 La figura 6 muestra un gráfico de los valores de similitud global que muestran la finalización de una fase de transición a otro estado potencialmente no modelado de la operación mediante el proceso o máquina monitorizados;

La figura 7 ilustra un gráfico de los valores de similitud global que muestran una transición de un estado modelado a otro estado modelado del proceso o máquina monitorizados;

15 La figura 8 ilustra un gráfico de los valores de similitud global que muestra una transición de un estado modelado a otro estado potencialmente no modelado del proceso o máquina monitorizados;

La figura 9A ilustra simbólicamente un funcionamiento de semejanza entre una instantánea actual y las instantáneas de la biblioteca de referencia; y

20 La figura 9B ilustra un gráfico de puntuaciones de similitud para las comparaciones en la figura 9A, con una mayor similitud indicada.

**Descripción detallada de las realizaciones preferidas**

Volviendo a la figura 1, se muestra un diagrama de bloques del sistema de monitorización basado en el modelo empírico de adaptación de la invención. Un proceso o máquina 105 está equipado con sensores para detectar diversos parámetros físicos, estadísticos, cualitativos o lógicos del proceso o el funcionamiento de la máquina. Estos se proporcionan típicamente al sistema de la invención a través de un bus de entrada 108, ejemplificado por un bus de tipo bus de campo en un sistema de control de proceso en una planta industrial. Los datos que representan el estado actual del proceso o de la máquina 105 se alimentan desde el bus de entrada 108 a un motor de estimación 111, que está acoplado a una biblioteca de referencia 114 de datos pasados representativos de los estados normales o aceptables de funcionamiento del proceso o máquina. En conjunto, el motor de cálculo 111 y la biblioteca de referencia 114 comprenden el modelo empírico 117 que modela el proceso o máquina.

En el modo de monitorización estándar, los datos del sensor de bus de entrada 108 también se proporcionan a un motor de diferenciación 120 que está dispuesto para recibir las estimaciones del estado actual generadas por el modelo empírico 117 en respuesta a la entrada del estado actual real del proceso o máquina. El motor de diferenciación resta para cada sensor involucrado la estimación de lo real, y proporciona estas salidas individuales a un módulo de comprobación estadística 122 que determina si la estimación y los valores reales son iguales o diferentes estadísticamente, en cuyo caso una alerta se muestra o proporciona de otra forma a sistemas de control automatizados adicionales. A modo de ejemplo, el módulo de pruebas estadísticas 122 puede estar dispuesto para realizar una prueba de relación de probabilidad secuencial (SPRT) en cada una de las señales de los sensores diferenciadas procedentes del motor de diferenciación 120, para proporcionar alertas para cada señal que no es “normal” o aceptable. De esta manera, la monitorización del proceso o de la máquina se lleva a cabo sobre la base del modelo empírico, proporcionando una mayor sensibilidad y una mejora del tiempo de aviso de fallos.

Datos actuales del sensor también se pueden proporcionar al módulo de decisión de adaptación 125. Según la presente invención, este módulo realiza una determinación de si la instantánea actual de los datos del sensor del proceso o máquina 105 representa una alteración del proceso o un fallo del sensor, o por el contrario representa el comienzo de una transición a un nuevo estado operativo que requiere la adaptación del modelo, o la detención de una transición a un nuevo estado operativo. Al reconocer el comienzo de una transición, la emisión del tipo de alerta de la monitorización basada en el modelo empírico puede ser suspendida temporalmente para evitar inundando un operador humano o un sistema de control de aguas abajo con información de alerta innecesaria. Al reconocer la detención de la transición, el módulo de decisión de adaptación 125 puede permitir a un módulo de reconversión 128 dispuesto para llevar a cabo los cambios reales en la biblioteca de referencia 114 necesarios para efectuar la adaptación del modelo. Después de la detención de la transición, se espera que el proceso o máquina 105 esté en un nuevo estado estabilizado que no puede ser representado en la biblioteca de referencia 114. Después de que la transición se haya completado, el módulo de decisión de adaptación 125 inicia a través del módulo de reconversión 128 la captura de nuevas instantáneas de datos en tiempo real para aumentar la biblioteca de referencia 114. En el caso de que la biblioteca de referencia sea demasiado grande, o se mantenga deseablemente en un cierto tamaño

(por ejemplo, por consideraciones de rendimiento), el módulo de eliminación de vectores 131 puede eliminar a las instantáneas antiguas de la biblioteca de referencia de acuerdo con ciertos criterios. Una vez completada la adaptación de la biblioteca de referencia, la monitorización en línea se inicia de nuevo.

5 La invención proporciona un modelo de adaptación técnica de la toma de decisiones totalmente automatizado para la monitorización basada en la condición de una máquina o proceso. El módulo de decisión de adaptación puede emplear las mismas técnicas de operador de similitud que se pueden emplear en el modelo empírico para las estimaciones de generación, como veremos a continuación. De acuerdo con ello, la instantánea del sensor actual desde el bus de entrada 108 se compara usando el operador de similitud con la estimación generada en respuesta al mismo por el motor de estimación 111 para generar una puntuación de similitud llamada similitud global para los propósitos de este documento. Esta similitud global es en sí misma una señal que puede ser monitoreada y procesada instantánea sobre instantánea. El comportamiento de la similitud global es un medio por el cual el módulo de la invención puede distinguir la necesidad de adaptación de un mero proceso o una alteración del sensor.

15 Volviendo ahora primero al modo de monitorización regular del sistema de monitorización de la invención, un procedimiento empírico basado en el modelo y el sistema para la monitorización de un proceso o máquina se describe en la patente de EE.UU. n.º 5.764.509 de Gross et al. antes mencionada. La implementación de un sistema de supervisión comprende dos fases, una primera fase de construcción del modelo empírico (también conocido como "formación"), y una segunda fase para encender la monitorización en vivo. Otros modelos empíricos que entrenan en los datos conocidos podrían también ser empleados, tales como las redes neuronales, pero para los propósitos de ilustración, se describirá un modelo empírico a lo largo de las líneas de la patente de Gross como una línea de base.

20 Un procedimiento para entrenar el modelo empírico se representa gráficamente en la figura 2, en la que los datos históricos del sensor recogidos para el proceso o máquina se destilan para crear un conjunto de datos de entrenamiento representativo, la biblioteca de referencia. Cinco señales de los sensores 202, 204, 206, 208 y 210 se muestran para un proceso o máquina a ser monitorizados, aunque se debe entender que esto no es una limitación en el número de sensores que se pueden supervisar el uso de la presente invención. El eje de abscisas 215 es el número de muestra o sello de tiempo de los datos de sensor recogidos, donde los datos se muestrean digitalmente y los datos de sensor se correlacionan temporalmente. El eje de ordenadas 220 representa la magnitud relativa de cada lectura del sensor sobre las muestras o "instantáneas". Cada instantánea representa un vector de cinco elementos, una lectura para cada sensor en esa instantánea. De todos los datos históricos de los sensores recopilados previamente que representan el funcionamiento normal o aceptable, de acuerdo con este procedimiento de entrenamiento, sólo aquellas instantáneas de cinco elementos se incluyen en el conjunto de entrenamiento representativo que contiene ya sea un valor mínimo o máximo para cualquier sensor dado. Por lo tanto, para el sensor 202, el máximo 225 justifica la inclusión de los cinco valores de sensor en las intersecciones de la línea 230 con cada señal de sensor, incluyendo el máximo 225, en el conjunto de entrenamiento representativo, como un vector de cinco elementos. Del mismo modo, para el sensor 202, el mínimo 235 justifica la inclusión de los cinco valores de sensor en las intersecciones de la línea 240 con cada señal de sensor.

35 La selección de datos representativos se representa también en la figura 3. Los datos recogidos que representan el funcionamiento normal tienen N sensores y L observaciones o instantáneas o conjuntos relacionados temporalmente de datos del sensor que comprenden una matriz  $\mathbf{X}$  de N filas y L columnas. En la etapa 304, un contador  $i$  para número de elemento se inicializa a cero, y un contador de observación o de instantáneas  $t$  se inicializa a uno. Dos matrices  $\mathbf{máx}$  y  $\mathbf{mín}$  para contener los valores máximo y mínimo, respectivamente, a través de los datos recogidos para cada sensor se inicializan para ser vectores de cada uno de los N elementos que se configuran igual a la primera columna de  $\mathbf{X}$ . Dos matrices adicionales  $\mathbf{Tmáx}$  y  $\mathbf{Tmín}$  para contener el número de la observación de los valores máximo y mínimo vistos en los datos recogidos para cada sensor se inicializan para ser vectores de cada uno de N elementos, todos cero.

40 En la etapa 307, si el valor del sensor de sensor  $i$  en la instantánea  $t$  en  $\mathbf{X}$  es mayor que el máximo visto aún para ese sensor en los datos recogidos,  $\mathbf{máx}(i)$  es la actualización para igualar el valor de sensor y  $\mathbf{Tmáx}(i)$  guarda el número  $t$  de la observación en la etapa 310. Si no, una prueba similar se realiza para el mínimo para dicho sensor en los pasos 314 y 317. El contador de observación  $t$  se incrementa en la etapa 320. En la etapa 322, si todas las observaciones han sido revisadas para un sensor dado ( $t = L$ ), entonces  $\mathbf{t}$  es reajustada e  $i$  se incrementa (para encontrar el máximo y mínimo para el sensor siguiente) en la etapa 325. Si el último sensor ha sido terminado ( $i = N$ ), la etapa 328, entonces se quitan las redundancias y una matriz  $\mathbf{D}$  se crea a partir de un subconjunto de vectores de  $\mathbf{X}$ .

55 En primer lugar, en la etapa 330, los contadores  $i$  y  $j$  se inicializan a uno. En la etapa 333, las matrices de  $\mathbf{Tmáx}$  y  $\mathbf{Tmín}$  son concatenados para formar un solo vector  $\mathbf{Ttmp}$  que tiene  $2N$  elementos. Estos elementos son clasificados en orden ascendente (o descendente) en la etapa 336 para formar matriz  $\mathbf{T}$ . En la etapa 339, el soporte  $\mathbf{tmp}$  se ajusta al primer valor en  $\mathbf{T}$  (un número de observación que contiene un sensor mínimo o máximo). La primera columna de  $\mathbf{D}$  se iguala a la columna de  $\mathbf{X}$  correspondiente al número de observación que es el primer elemento de  $\mathbf{T}$ . En el bucle a partir de la etapa de decisión 341, el  $i$ -ésimo elemento de  $\mathbf{T}$  se compara con el valor de  $\mathbf{tmp}$  que contiene el elemento previo de  $\mathbf{T}$ . Si son iguales (el vector de observación correspondiente es un mínimo o máximo para más de un sensor), ya ha sido incluido en  $\mathbf{D}$  y no necesita incluirse de nuevo. Contador  $i$  se incrementa en la

etapa 350. Si no son iguales, **D** se actualiza para incluir la columna de **X** que corresponde al número de la observación de **T(i)** en la etapa 344, y *tmp* es actualizado con el valor en **T(i)**. El contador *j* se incrementa entonces en la etapa 347. En la etapa 352, si se han comprobado todos los elementos de **T**, entonces la destilación en el conjunto de entrenamiento **D** ha terminado, etapa 355.

5 Una variedad de modelos empíricos se considera que es el objeto de la presente invención de toma de decisiones de adaptación y readaptación, incluidas las redes neuronales, modelos de lógica difusa, y similares. Todos estos modelos empíricos emplean datos de proceso o máquina bajo vigilancia para modelar y de ese modo monitorizar el proceso o máquina. Todos están sujetos a las deficiencias de los datos históricos proporcionados cuando los modelos se construyen, en vista del envejecimiento agraciado, asentamiento o estados no encontrados previamente del proceso o máquina monitorizados. A modo de un ejemplo de la aplicación de los procedimientos de la presente invención, se describirá la técnica de modelado empírico de la patente anteriormente mencionada de Gross et al. Esta técnica de modelado empírico utiliza un operador de similitud, que también es una inventiva empleada en la presente invención en forma de similitud global y otras técnicas de toma de decisiones de adaptación descritas en este documento. En general, un funcionamiento de semejanza proporciona una puntuación de similitud escalar reducida entre un extremo (por lo general "1" para "idéntico") y el otro extremo (típicamente "cero" para "completamente disímil"), en una comparación de dos números. Más particularmente, esta puede ser adaptada para la comparación de dos vectores que tienen el mismo número de elementos, donde una puntuación de similitud es producida para comparar cada elemento similar de los dos vectores, y luego promediando o combinando de otra manera estadística las puntuaciones de similitud en una puntuación de similitud vector a vector.

20 Los cálculos para el funcionamiento de similitud se describen ahora en detalle a continuación. En lo que sigue, el subíndice "dentro" generalmente corresponde a la instantánea actual obtenida del bus de entrada 108, que puede comprender, por ejemplo, diez sensores en tiempo real correlacionados, y el subíndice "fuera" corresponde en general a las estimaciones generada por el motor de estimación 111. La biblioteca de referencia 114 comprende una serie de instantáneas seleccionadas de acuerdo con el procedimiento de entrenamiento descrito anteriormente, cada instantánea siendo un vector de datos de sensores, dispuestos como está dispuesta la instantánea de entrada. Para seguir el ejemplo a continuación, la biblioteca de referencia comprendería vectores formados por diez elementos cada uno. Esta biblioteca de referencia también se conoce como la matriz **D**.

30 La etapa de proporcionar un entrenamiento representativo fijado de acuerdo con la descripción anterior da lugar a una matriz **D** de valores, que tiene diez filas (correspondientes a los diez parámetros medidos en el proceso o máquina) y un número suficiente *n* de columnas (conjuntos de lecturas de los sensores simultáneas o relacionadas temporalmente) para representar adecuadamente el rango dinámico de funcionamiento esperado total del proceso o de la máquina. Aunque el orden de las columnas no importa en **D**, debe fijarse la correspondencia de filas a determinados sensores.

35 Luego, utilizando  $y_{dentro}$  para designar un vector (que tiene diez elementos en este ejemplo) que corresponde a la instantánea de entrada de bus de entrada 108, un vector  $y_{fuera}$  se genera como la estimación del motor de estimación 111 que tiene diez elementos, de acuerdo con:

$$\overrightarrow{y_{fuera}} = \overline{D} \bullet \overline{W}$$

donde **W** es un vector de ponderación que tiene tantos elementos *N* como columnas hay en **D**, generados por:

$$\overline{W} = \frac{\hat{W}}{\left( \sum_{j=1}^N \hat{W}(j) \right)}$$

40 
$$\hat{W} = (\overline{D}^T \otimes \overline{D})^{-1} \bullet (\overline{D}^T \otimes \overrightarrow{y_{dentro}})$$

donde el funcionamiento de semejanza está representado por el círculo con la cruz en su interior. El superíndice "T" aquí representa la transpuesta de la matriz, y el superíndice "-1" representa la inversa de la matriz o disposición resultantes. Es importante destacar que debe haber correspondencia de fila a los mismos sensores para las filas de **D**, el  $y_{dentro}$  y el  $y_{fuera}$ . Es decir, si la primera fila representante de la matriz de conjunto de entrenamiento **D** corresponde a valores para un primer sensor en la máquina, el primer elemento de  $y_{dentro}$  debe también ser el valor actual (si opera en tiempo real) de ese mismo primer sensor.

50 El funcionamiento de semejanza puede ser seleccionado de una variedad de operadores conocidos que producen una medida de la similitud o cercanía numérica de las filas del primer operando con columnas del segundo operando. El resultado del funcionamiento es una matriz donde el elemento de la *i*-ésima fila y la *j*-ésima columna se determina de la *i*-ésima fila del primer operando y la *j*-ésima columna del segundo operando. El elemento resultante (*i, j*) es una medida de la similitud de estos dos vectores. En la presente invención, la *i*-ésima fila del primer

operando tiene generalmente elementos correspondientes a valores de sensor para un estado temporalmente relacionado dado del proceso o máquina, y lo mismo es cierto para la *j*-ésima columna del segundo operando. Efectivamente, la matriz resultante de las mediciones de similitud representa la similitud de cada vector de estado en un operando a cada vector de estado en el otro operando.

5 A modo de ejemplo, un operador de semejanza que puede ser usado compara los dos vectores (la *i*-ésima fila y la *j*-ésima columna) sobre una base elemento a elemento. Solamente son comparados los elementos correspondientes, por ejemplo, el elemento (*i*, *m*) con el elemento (*m*, *j*), pero no el elemento (*i*, *m*) con el elemento (*n*, *j*). Para cada comparación, la semejanza es igual al valor absoluto de la más pequeña de los dos valores dividido por el mayor de los dos valores. Por lo tanto, si los valores son idénticos, la similitud es igual a uno, y si los valores son sumamente  
10 desiguales, la semejanza se aproxima a cero. Cuando se calculan todas las similitudes elementales, la similitud global de los dos vectores es igual a la media de las semejanzas elementales. Una combinación estadística diferente de las semejanzas elementales también se puede utilizar en lugar de promediado, por ejemplo, la mediana.

Otro ejemplo de un operador de similitud que puede ser usado se puede entender con referencia a la figura 4. Este operador de semejanza corresponde al operador de similitud de la prueba de relación de ángulos límites (BART),  
15 ilustrado en la Patente de Estados Unidos n.º 5.987.399 de Wegerich et al. Para cada sensor o parámetro físico se forma un triángulo 404 para determinar la semejanza entre dos valores para dicho sensor o parámetro. La base 407 del triángulo se establece en una longitud igual a la diferencia entre el valor mínimo 412 observado para dicho sensor en todo el conjunto de entrenamiento, y el valor máximo 415 observado para dicho sensor a través de todo el conjunto de entrenamiento. Un ángulo  $\Omega$  se forma por encima de la base 407 para crear el triángulo 404. La similitud  
20 entre dos elementos en un funcionamiento de vector a vector se encuentra a continuación, mediante el trazado de las ubicaciones de los valores de los dos elementos, representado como  $X_0$  y  $X_1$  en la figura, a lo largo de la base 407, usando en un extremo el valor del mínimo 412 y en el otro extremo el valor del máximo 415 para escalar la base 407. Los segmentos de línea 421 y 425 atraídos por las ubicaciones de  $X_0$  y  $X_1$  sobre la base 407 forman un ángulo  $\theta$ . La relación de ángulo  $\theta$  respecto al ángulo  $\Omega$  da una medida de la diferencia entre  $X_0$  y  $X_1$  en el rango de valores en el conjunto de entrenamiento para el sensor en cuestión. Restando esta relación, o alguna versión algorítmicamente modificada de ella, del valor de uno produce un número entre cero y uno que es la medida de la similitud de  $X_0$  y  $X_1$ .  
25

Cualquier tamaño de ángulo menor de 180 grados y cualquier ubicación para el ángulo encima de la base 407 se puede seleccionar para los propósitos de la creación de un dominio de similitud, pero cualquiera que sea elegido  
30 debe ser utilizado para todas las mediciones de semejanza correspondientes a ese sensor particular y parámetro físico del proceso o de la máquina. Por el contrario, los triángulos 404 de diferentes formas pueden ser utilizados para diferentes sensores. Un procedimiento de seleccionar la forma general del triángulo es comprobar empíricamente qué forma resulta en los resultados de señal estimada consistentemente más precisos.

Para la eficiencia computacional, se puede hacer el ángulo  $\Omega$  en un ángulo recto (no representado en la figura). La designación de segmento de línea 431 como una altura *h* del ángulo  $\Omega$  encima de la base 407, entonces el ángulo  $\theta$   
35 para una similitud dada de elemento a elemento para elemento *i* viene dado por:

$$\theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{h}{X_1(i)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{h}{X_0(i)}\right)$$

Entonces, la semejanza elemental es:

$$s_i = 1 - \frac{\theta_i}{\pi / 2}$$

40 Como se ha indicado anteriormente, las semejanzas elementales pueden ser promediadas estadísticamente o tratadas estadísticamente de otra forma para generar una semejanza general de una instantánea a otra instantánea, como si fuera pedido de acuerdo con la invención.

Otra clase de operador de similitud que puede usarse en la presente invención implica la descripción de la proximidad de un vector de estado a otro vector de estado en *n*-espacio, donde *n* es la dimensionalidad del vector de estado de la instantánea actual del proceso o máquina monitorizados. Si la proximidad es comparativamente estrecha, la similitud de los dos vectores de estado es alta, mientras que si la proximidad es distante o grande, la semejanza disminuye, en última instancia, infinitamente. A modo de ejemplo, la distancia euclidiana entre dos vectores de estado se puede usar para determinar la similitud. En un proceso instrumentado con 20 sensores, por ejemplo, la distancia euclidiana en el espacio 20-dimensional entre la instantánea actualmente monitorizada, que  
50 comprende un vector de estado de 20 elementos, y cada vector de estado en el conjunto de entrenamiento proporciona una medida de similitud, como se muestra:

$$S = \frac{1}{1 + \frac{\|\vec{x} - \vec{d}\|^\lambda}{c}}$$

donde  $\mathbf{X}$  es la instantánea actual, y  $\mathbf{d}$  es un vector de estado del conjunto de entrenamiento,  $\lambda$  y  $c$  son constantes seleccionables por el usuario.

Volviendo ahora a los sistemas y procedimientos de la presente invención de adaptación, un módulo de decisión de adaptación 125 realiza generalmente pruebas en la instantánea actual de los datos del sensor o una secuencia de estos, para determinar si adaptarse o no a un nuevo estado operativo del proceso o de la máquina. Esta determinación tiene inherentes a ella varias decisiones más particulares. En primer lugar, el módulo de decisión de la adaptación debe decidir si todo o no todo el aparato de monitorización acaba de iniciar la monitorización o no. Si la monitorización acaba de comenzar, el módulo de decisión de adaptación esperará a varias instantáneas o muestras de datos para que la monitorización se establezca antes de hacer pruebas para optar por la adaptación. Una segunda decisión relacionada con la decisión general de adaptar se refiere a si el proceso o máquina monitorizados ha entrado o no en una transición o no. Normalmente, cuando un proceso o máquina cambia de estado, ya sea a través del proceso alterado, fallo de la máquina, o simplemente un cambio en el funcionamiento normal, existe un período de tiempo durante el cual los sensores monitorizados proporcionan datos dinámicos, y el proceso o la máquina no es ni de forma estable en su modo anterior ni tampoco de forma estable en su nuevo modo de objetivo. Esta transición se manifiesta generalmente como una oscilación transitoria en uno o más de los datos del sensor. El módulo de decisión de la adaptación espera a que la transición se complete antes de la adaptación. Por lo tanto, además de la segunda decisión de determinar cuándo una transición ha comenzado, una tercera decisión que debe hacerse es si el periodo de transición, y el proceso o máquina monitorizados están en un nuevo estado operativo estable. Se debe entender que "estable" no significa un estado en el que todas las lecturas de los sensores son planas, sino más bien un estado que puede ser reconocido de forma fiable por el modelo empírico, lo que puede implicar el movimiento dinámico, pero, sin embargo, correlacionado de las lecturas del sensor. Una cuarta decisión que debe ser hecha después de una transición es determinar si el nuevo estado operativo estable es aquel que no ha sido visto por el modelo empírico o no. Si no se ha encontrado antes, es un candidato para la adaptación. Por último, una quinta decisión que debe hacerse es si un nuevo estado, previamente no encontrado es, de hecho, un nuevo estado aceptable, o un proceso o un sensor alterado.

Según la invención, la detección de un transitorio como evidencia de una posible transición fuera del estado operativo actual se puede realizar utilizando el operador de similitud global. La similitud global es la puntuación de similitud de vector a vector calculada a partir de una comparación de la instantánea actual del bus de entrada 108 en contra de la estimación a partir del motor de estimación 111. Típicamente, la estimación es la estimación generada en respuesta a la instantánea actual, sino que también está dentro del alcance de la presente invención que puede ser una estimación generada a partir de una instantánea anterior, tal como cuando el modelo genera estimaciones de predicción para valores de los sensores. Los cálculos para la generación de un valor de similitud de vector a vector ya se han descrito anteriormente. Volviendo a la figura 5, se muestra un gráfico de una típica similitud global generada por un proceso o máquina bajo monitorización. El eje vertical 501 es la puntuación de similitud global, y el eje horizontal 504 es la instantánea o muestra del número de las instantáneas de entrada, que normalmente son secuenciales en el tiempo, pero también puede representar alguna otra presentación ordenada de las instantáneas. Un límite superior 506 y un límite inferior 509 se calculan como se describe a continuación para su uso en la determinación de en qué punto la línea de similitud global o señal 512 indica un transitorio. La puntuación de similitud global en 516 se muestra cayendo por debajo del límite 509, al igual que las posteriores puntuaciones de similitud global.

En general, cuando un proceso o máquina está funcionando en un estado que es reconocido por el modelo empírico, la similitud global entre la estimación y la corriente de entrada son altas, cerca de 1, y no varían mucho. La ubicación de los límites 506 y 509 puede ser seleccionada por el usuario, o puede ser seleccionada automáticamente. Un procedimiento para la selección automática de estos límites es recoger una serie de sucesivas similitudes globales y determinar la media de ellos y la desviación estándar. Los límites se establecen a continuación en la media más o menos un múltiplo de la desviación estándar. Un múltiplo preferido es 3 veces la desviación estándar. El número de similitudes globales sucesivas utilizadas pueden ser cualquier número estadísticamente significativo sobre el que el proceso o máquina está en un estado operacional de modelado, y 100-1000 es un número razonable. Un número más pequeño puede ser razonable si la tasa de muestreo para la monitorización es menor, y en algunos casos puede estar en el rango de 5-10, donde la tasa de muestreo para la monitorización es del orden de un solo dígito para el período de tiempo en el que el sistema o proceso monitorizado puede desviarse sustancialmente del funcionamiento normal.

Sin embargo, otra manera de calcular los límites 506 y 509 es como sigue. Después de acumular un conjunto de datos históricos de los que se selecciona una biblioteca de referencia de acuerdo con un procedimiento de formación



como el procedimiento de Mín-Máx descrito con referencia a las figuras 2 y 3, las instantáneas restantes del conjunto histórico que no fueron seleccionadas en la biblioteca de referencia se puede alimentar como entrada para el modelo empírico, y las similitudes globales para las estimaciones derivadas de ellas se pueden utilizar. Estas proporcionan una media y una desviación estándar de fijación de los límites 506 y 509 como se describe anteriormente.

De acuerdo con todavía otra forma de definir los límites 506 y 509, no son límites de línea recta, pero en su lugar son límites que flotan una cantidad fija a cada lado de un medio determinado a través de una ventana en movimiento de las similitudes globales. Por ejemplo, la desviación estándar puede calcularse de acuerdo con una forma descrita anteriormente, y luego un múltiplo de la desviación estándar seleccionada. Esto se establece a continuación, en torno a una media que se define como la similitud global media de las últimas instantáneas, por ejemplo, los últimos cinco o los diez últimos.

Cuando una similitud global de una instantánea 516 se desplaza fuera de los límites 506 o 509, el módulo de decisión de la adaptación reconoce esto como un transitorio. Esto significa una probabilidad de que se está iniciando una transición del proceso o máquina monitorizados. El módulo de decisión de adaptación puede desactivar la supervisión, o al menos la generación de alertas de módulo de pruebas estadísticas 122 después de la detección de un transitorio. Además, el módulo de decisión de adaptación comienza entonces a emplear una o más de varias pruebas que se pueden utilizar para determinar cuándo termina un período de transición.

Preferiblemente, al detectar primero el transitorio, el módulo de decisión de adaptación coloca el límite superior 506 y el límite inferior 509 alrededor de cada punto de similitud mundial posterior, utilizando el punto como la media, pero todavía utilizando el múltiplo seleccionado de la desviación estándar establecido antes como los límites. Cada punto sucesivo se compara con estos límites establecidos alrededor de la "media" de la última ubicación del punto. Esto se puede ver en la figura 6, que muestra un proceso o máquina que sale de transición, tal como se mide por la similitud global. El punto 602 es un punto de transición. El límite superior 605 y el límite inferior 608 se muestran en algún múltiplo de la desviación estándar establecida antes alrededor del punto 602. El punto 611 cae fuera de este rango, y por lo tanto es también un punto de transición. Sin embargo, el punto 614 cae dentro del rango de alrededor del punto 617, y el módulo de decisión de adaptación comienza a hacer una monitorización de estos dos y de siguientes puntos para la prueba de estabilidad de la similitud global. Una forma de hacer esto es contar una serie sucesiva de similitudes globales instantáneas que caen todas dentro del rango de alrededor de la similitud global anterior, y cuando se alcanza un recuento particular, determinarán el proceso o máquina que se ha estabilizado. Un recuento típico que se puede utilizar es de cinco instantáneas, aunque será contingente sobre la dinámica del proceso o máquina que están siendo monitorizados, y la frecuencia de muestreo en la que se capturan las instantáneas. El recuento puede comenzar en cualquiera de los puntos 617 o 614. Si un punto posterior se encuentra fuera de la gama, antes de que se alcance el recuento elegido, tal como se muestra en el punto 620, el punto se determina que está en transición, y el recuento se pone a cero. Comenzando en el punto 620 a continuación, el recuento comenzaría de nuevo si el punto siguiente estuviera dentro del alcance. Hasta que se alcanza el recuento, el proceso o la máquina se considera todavía en transición. Otra manera de determinar si un proceso o máquina monitorizados se ha estabilizado en un nuevo estado es buscar al menos un número seleccionado de puntuaciones de similitud global a través de una ventana móvil de instantáneas que se encuentran dentro del rango antes mencionado, donde el rango se ajusta alrededor de la media de todas las similitudes globales anteriores en la ventana para cualquier similitud global dada. A modo de ejemplo, si la ventana de instantáneas es cinco, y el número seleccionado en el conjunto de los cinco que deben tener similitudes globales calificadas en el rango es de cuatro, entonces la segunda puntuación de similitud global califica si se encuentra en el rango establecido alrededor de la primera similitud global, y la tercera similitud global califica si se encuentra en el intervalo en torno a la media de la primera y segunda similitudes globales, y así sucesivamente. Si las cuatro similitudes globales después de la primera todas califican, entonces el sistema se ha estabilizado en un nuevo estado. La ventana puede ser elegida para ser mucho más larga, por ejemplo 50, dependiendo de la velocidad de muestreo de monitorización, y el número al menos seleccionado de los valores de calificación puede ser 40, por ejemplo.

Cuando se alcance un recuento de los puntos de similitud global dentro de su rango, como por ejemplo en el punto 623 después de cinco puntos consecutivos dentro del rango indicado por la caja 625, el módulo de decisión de la adaptación indica que la transición ha terminado y se ha alcanzado un nuevo estado. Nótese que en la figura 6, la similitud global se ha estabilizado en una similitud global más baja (alrededor de 0,8) que se muestra en la figura 5 (alrededor de 0,975), lo que indica el modelo empírico no es el modelado de este estado, así como el estado anterior, y puede, de hecho, no ser reconocido en el nuevo estado en absoluto. Por lo general, si el nuevo estado es también parte del modelo empírico, la curva de similitud global se parecerá más a la mostrada en la figura 7. En ella, un primer estado operativo se indica mediante las similitudes global 701. Una transición se inicia en la transitoria 703, y continúa hasta que se alcanza un nuevo estado operativo estable 705 más allá del punto 706 como lo indican cinco (o algún otro número preseleccionado) de similitudes globales consecutivas 710 dentro del rango de cada uno.

De acuerdo con todavía otra forma para la determinación de la adaptación, independiente del uso de la similitud global, el módulo de decisión de adaptación puede examinar algunos de los datos de los sensores que comprenden la instantánea actual que son designados por el usuario por lo general después de la instalación como variables de control en el proceso o la máquina monitorizados. Esta técnica proporciona una forma mucho más simple de determinar cuándo adaptar, pero sólo puede emplearse cuando las variables de control son claramente separables

de los parámetros dependientes del proceso o máquina. Una variable de control se determina normalmente de forma manual por delante de la construcción de modelos con conocimiento del dominio de la aplicación. Las variables de control son típicamente aquellas entradas a un proceso o máquina que accionan el comportamiento de funcionamiento del proceso o de la máquina. A menudo son las variables ambientales sobre las que no se puede ejercer ningún control. Por ejemplo, en un motor o turbina, la temperatura ambiente es a menudo una variable de control. Al entrenar el modelo empírico, como por ejemplo se ha descrito anteriormente con el procedimiento Mín-Max, el software para ejecutar el sistema de monitorización de adaptación inventiva realiza una monitorización de los rangos generales de las variables de control que se observan en el conjunto de entrenamiento a partir del cual se destila el conjunto de referencia. Luego, en el funcionamiento de monitorización, el módulo de decisión adaptable simplemente compara la variable(s) de control de corriente de esos rangos, y si una o más variables de control están ahora fuera del rango entrenado, el módulo de decisión de adaptación puede iniciar el reciclaje. También es útil el uso de variables de control junto con el operador de similitud global, de modo que la determinación se puede hacer cuando la transición de un estado a otro ha terminado, como se describe anteriormente. Alternativamente, las técnicas estándar conocidas en la técnica para el análisis de la estabilidad de las variables de control también se pueden emplear directamente contra las variables de control, si la dinámica de las variables de control permite, hacer la determinación de cuándo una transición comienza y termina. En cualquier caso, en el uso de variables de control para determinar cuándo debe volver a entrenar el modelo empírico, lo que se sacrifica es la capacidad de controlar las variables de control para la alteración. En otras palabras, si una variable de control se sale del rango que fue entrenado, se asume por el aparato de la invención que un nuevo estado operativo aceptable se ha encontrado, en lugar de asumir que la variable de control indica un funcionamiento anormal.

En el caso de que no se emplee esta decisión basada en la variable de control, sigue existiendo después de determinar que la transición se ha detenido, la etapa de determinar si el nuevo estado es también ya suficientemente modelado, o es un estado no encontrado hasta el momento al que se debe adaptar. Para ello, el módulo de decisión de adaptación tiene una batería de pruebas que se pueden utilizar para hacer la determinación, además de la prueba de rango de la variable de control.

En una primera técnica, un umbral puede ser aplicado a la similitud global media del nuevo estado al final del período de transición. Por ejemplo, con referencia a figura 8, una media inferior a un umbral 804 de 0,90 se puede utilizar para indicar que el nuevo estado no está suficientemente modelado por el modelo empírico, y el modelo debe ser adaptado para dar cabida al nuevo estado. Según la invención, la media puede ser examinada sobre una instantánea 808 para tomar esta decisión (en cuyo caso la media es simplemente la similitud global) o, alternativamente, puede ser examinada más de una serie de instantáneas, donde la media se vuelve a calcular constantemente utilizando los 5 resultados más recientes, a modo de ejemplo. Si la media luego cae por debajo del umbral seleccionado más de una fracción seleccionada de instantáneas a través de una serie de instantáneas (por ejemplo, la mitad), a continuación, el nuevo estado se considera que es reconocido y potencialmente sujeto a la adaptación. Por ejemplo, como se muestra en la figura 8 los cinco puntos 812 tienen cuatro que se caen por debajo del umbral 804, y sólo uno por encima y, por lo tanto, este estado sería considerado como no reconocido.

De acuerdo con una segunda técnica, una ventana de los valores de similitud globales sucesivos puede ser comparada con el umbral seleccionado, y si al menos un cierto número de estos caen por debajo del umbral, entonces el nuevo estado se considera que es reconocido y potencialmente sujeto a la adaptación. Por ejemplo, si se examina una ventana móvil de cinco similitudes globales, y al menos tres están por debajo del umbral, el nuevo estado se puede considerar sujeto a la adaptación.

En una tercera técnica representada en las figuras 9A y 9B, la instantánea presente real puede ser procesada por similitud contra toda la librería de referencia (como se hace como parte del proceso de generación de la estimación), y se realiza una prueba sobre las similitudes. Dado que el módulo de decisión de la adaptación indica un nuevo estado se ha asentado, las puntuaciones de similitud de la instantánea actual en contra de la biblioteca de referencia pueden ser examinadas por la más alta de dicha similitud, y si esta es inferior a un umbral elegido, el nuevo estado se puede considerar un estado no reconocido que es un candidato para la adaptación. Un umbral típico para esto sería en el intervalo de menos de 0,90. Como se puede ver en la figura 9A, al comparar la instantánea actual 903 (simbolizada por un símbolo del vector con los puntos que se colocan para los valores de los sensores) con las instantáneas de la biblioteca de referencia 114, una serie de puntuaciones de similitud 907 se generan para cada comparación como parte de la monitorización de rutina. Las puntuaciones se muestran en un gráfico en la figura 9B, donde una puntuación de similitud más alta 912 está por encima del umbral de 0,90, y por lo tanto la instantánea actual no indica una necesidad de adaptación. Una vez más, esta decisión puede ser tomada en una instantánea, o se puede hacer mediante la determinación de si una fracción seleccionada de más de una serie de instantáneas actuales tiene mayores similitudes con la biblioteca de referencia que caen por debajo del umbral elegido.

Sin embargo, una tercera técnica se puede emplear para determinar si un nuevo estado se presenta y el modelo empírico deben adaptarse es examinar la fracción de alarma generada por un módulo SPRT en el aparato de monitorización.

De acuerdo con la invención, el operador de similitud global tiene la capacidad inherente de distinguir entre un proceso o sensor alterados y un cambio de estado. Cuando un sensor falla, el modelo empírico estima típicamente un valor razonable para lo que el sensor debe indicar, en base a los otros sensores de entrada. La diferencia entre

este fallo de lectura del sensor y la estimación de la misma (realmente una estimación del parámetro medido subyacente) proporciona un medio para el módulo de pruebas estadísticas 122 para alertar a un operador humano que hay un problema en el sensor ha fallado. Sin embargo, debido a la naturaleza del funcionamiento de similitud, el efecto sobre la similitud global es limitado. De hecho, la media de varias similitudes globales secuenciales en el caso de un sensor defectuoso no puede cambiar mucho de la media cuando el sensor no falló, aunque la varianza de la similitud global puede aumentar algo (todavía por lo general todavía permanecer dentro de los umbrales 506 y 509 indicados en la figura 5). De esta manera, el módulo de decisión de adaptación generalmente no trata de adaptarse en un sensor fallado, y el sistema de supervisión puede alertar con éxito sobre el sensor fallido.

Cuando se produce una alteración en el proceso que afecta a uno o sólo unos pocos de los parámetros monitorizados, el módulo de decisión de adaptación de manera similar no indicará la necesidad de adaptación, a pesar de las alertas por la alteración que se están produciendo en el aparato de monitorización. Esto es cierto incluso cuando una alteración del proceso eventualmente conduce a un cambio significativo en todas las variables, debido a que el aparato de monitorización de la presente invención está diseñado para captar la señal más temprana posible del cambio y alertar sobre el mismo. Mucho antes de que la alteración del proceso afecte a todas las variables, es probable que el operador humano haya sido notificado de la alteración.

Además, una alteración catastrófica en el proceso por lo general tampoco exhibe un asentamiento en un nuevo estado. Las similitudes globales para un proceso severamente alterado no sólo caen potencialmente a niveles muy bajos (menos de 0,50), sino que también sufren de una gran varianza continua. Típicamente, una alteración en el proceso fallará para establecerse en un nuevo estado estable con la rapidez que un simple cambio de modo operacional, y esto puede ser utilizado para distinguir una alteración del proceso de un nuevo estado operativo aceptable. Esto se determina mejor empíricamente basado en la aplicación, y un ajuste seleccionable por el usuario se puede proporcionar en el software del módulo de decisión de la adaptación para designar un período durante el cual una transición debe establecerse en un estado estable o de otra manera ser considerado un proceso alterado y se enciende alertando de nuevo. De acuerdo con la invención, el módulo de decisión de adaptación también puede medir la varianza de la similitud global, y si la varianza está todavía por encima de un cierto umbral después de un período de tiempo de espera seleccionado, la transición se puede considerar un proceso alterado, y de nuevo la alerta puede ser devuelta de nuevo en la monitorización que viene a través del módulo de pruebas estadísticas 122.

Después de que el módulo de decisión de adaptación se ha cerciorado de que:

1) una variable de control está ahora fuera de rango, y la adaptación se justifica porque:

- a) la similitud global está ahora por debajo de un umbral aceptable, lo que indica un nuevo estado no reconocido; o
- b) la similitud más alta de la instantánea o secuencia de instantáneas actual está por debajo de un umbral aceptable, lo que indica un nuevo estado no reconocido; o
- c) se están generando un número de alertas, empezando de forma coincidente con el cambio en la variable de control; o

2) una adaptación se justifica debido a que:

- a) se ha detectado un transitorio en la similitud global, que indica una transición; y
- b) se ha completado la transición y se realizó un nuevo estado estable; e
  - i) el nuevo estado estable no se reconoce porque la similitud global está ahora por debajo de un umbral aceptable; o
  - ii) el nuevo estado estable no se reconoce porque la más alta similitud de la instantánea o secuencia de instantáneas actual está por debajo de un umbral aceptable; o
  - iii) el nuevo estado estable no es reconocido por la fracción de alertas que se está generando en la monitorización está por encima de un umbral.

Una etapa de adaptación se lleva a cabo entonces mediante el módulo de reconversión 128. De acuerdo con la invención, el reciclaje se puede lograr mediante la adición de instantáneas de la secuencia de instantáneas actuales a la biblioteca de referencia, o mediante la sustitución de las instantáneas en la biblioteca de referencia. Ambos modos pueden utilizarse, donde la biblioteca de referencia tiene un tamaño inicial en la implementación del sistema de monitorización, y se selecciona un tamaño máximo al que puede crecer la biblioteca de referencia, y más allá que instantáneas recién añadidas deben sustituir a las instantáneas existentes.

Al añadir instantáneas actuales a la biblioteca de referencia, el módulo de reciclado decide primero qué instantáneas seleccionar para la adición. De acuerdo con una realización, cuando el módulo de decisión de adaptación identifica basado en la similitud global de una secuencia de varias, por ejemplo, 5 instantáneas, para las que se ha estabilizado la similitud global, que es un nuevo estado, y el nuevo estado se ha determinado que no estaba

5 modelado previamente, las cinco instantáneas se pueden utilizar para aumentar la biblioteca de referencia. Además, a partir de la sexta instantánea, el módulo de reciclado comienza a entrar en un ciclo de adaptación más largo, comprobando las instantáneas a medida que llegan y probando mediante la prueba de similitud global si el modelo recién aumentado está modelando de forma adecuada las nuevas instantáneas. Se puede determinar un nuevo umbral, por ejemplo 0,90, que la biblioteca de referencia recién aumentada debe superar en similitud global, para que la adaptación se declare terminada. Si no se alcanza el umbral, entonces el módulo de reciclado continúa añadiendo nuevas instantáneas (o al menos las instantáneas que no parecen ser modeladas de manera adecuada), siempre que el nuevo estado sea estable y no un nuevo transitorio (indicando una nueva etapa de transición o quizás alteración del proceso o fallo del sensor). Un límite establecido para la duración de un módulo de reciclado seguirá participando en el ciclo de adaptación más largo más allá del final de una transición se podrá ajustar de forma opcional, por lo que la adaptación no continúa indefinidamente. Esto se puede aplicar a un nuevo estado que simplemente no se puede modelar adecuadamente al umbral de similitud global elegido como punto de corte para la adaptación.

10 De acuerdo con otro modo, en lugar de sumar las instantáneas identificadas adicionales a la biblioteca de referencia, toda la biblioteca de referencia y las instantáneas adicionales se pueden combinar en un conjunto de entrenamiento total al que se aplica un procedimiento de entrenamiento tales como Mín-Máx, para destilar el nuevo conjunto de entrenamiento en una nueva biblioteca de referencia.

20 Cuando se alcanza el límite de tamaño en la biblioteca de referencia, el módulo de eliminación de vectores puede utilizar varios procedimientos para sustituir o eliminar las instantáneas antiguas (o vectores de datos del sensor) de la biblioteca de referencia. De acuerdo con una primera manera, para cada instantánea que se añadirá más allá del límite, se retira el vector en la biblioteca de referencia que lleva la más alta similitud con la instantánea añadida deseable. Para este funcionamiento se utiliza el operador de similitud como se describe en el presente documento. De acuerdo con un segundo procedimiento, en el uso de un procedimiento de entrenamiento tales como Mín-Máx, la marca de tiempo de cuando se añade un vector de la biblioteca de referencia se examina a través de toda la biblioteca, y se elimina el vector de sellado de tiempo más antiguo. En este caso, la instantánea de sustitución lleva la marca de tiempo del momento de la sustitución, y por lo tanto tiene la marca de tiempo más reciente. De acuerdo con otro procedimiento, durante el modo de monitorización regular del aparato de monitorización basado en el modelo empírico, para cada instantánea actual del proceso o máquina monitorizados, se realiza una determinación de qué instantánea en la biblioteca de referencia tiene la mayor similitud con ella, y esa instantánea es una marca de tiempo con el momento de la comparación. Por lo tanto, cada instantánea en la biblioteca de referencia está potencialmente siendo actualizada como el último vector de estado más cercano visto en el funcionamiento del proceso o máquina. Entonces, cuando se añade un nuevo vector como parte de la adaptación, se sustituye el vector con la indicación de la hora. La nueva instantánea de reemplazo, por supuesto, lleva un sello de tiempo actual. De esta manera, las instantáneas en la biblioteca de referencia que representa los estados del sistema de monitorización no se han visto en mucho tiempo, son reemplazadas primero con nuevas instantáneas actualizadas. Este modo es especialmente útil en la monitorización de equipos o procesos que se asientan con gracia con la edad, y no se espera lograr exactamente los estados operativos donde se encontraban cuando eran nuevos.

**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de adaptación de un modelo empírico, utilizado en la monitorización de un sistema, que comprende las etapas de:
  - 5 a) recibir, en un módulo de decisión de adaptación (125), valores reales de parámetros que comprenden instantáneas actuales de parámetros operativos monitorizados que caracterizan un estado operativo del sistema monitorizado;
  - b) el módulo de decisión de adaptación determina en base a un operador de similitud global si la instantánea actual de los datos del sensor procedentes del sistema representa una molestia para el proceso o un fallo del sensor, o representa el inicio de una transición a un nuevo estado operativo del sistema monitorizado;
  - 10 c) si se reconoce una transición a un nuevo estado operativo mediante el módulo de decisión de adaptación y si el nuevo estado ha sido instalado en él, el módulo de decisión de adaptación decide adaptar o no mediante el examen, después del final del período de transición, las puntuaciones de similitud global de la instantánea actual con una biblioteca de referencia para la más alta de tal similitud, y si esta es inferior a un umbral elegido, considerar el nuevo estado que sea un estado no reconocido que es un candidato para la adaptación; y
  - 15 d) si el nuevo estado es un estado no reconocido, adaptar el modelo en una etapa de reconversión mediante la adición de instantáneas de la secuencia de instantáneas actuales a la biblioteca de referencia, o mediante la sustitución de las instantáneas en la biblioteca de referencia.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, que comprende además la etapa de: indicar un cambio del estado operativo del sistema cuando la puntuación global de similitud cae fuera de un intervalo seleccionado.
- 20 3. El procedimiento de la reivindicación 1, que incluye:
 

generar instantáneas de estimaciones de los valores de los parámetros en respuesta a la recepción de las instantáneas de los valores reales de los parámetros; en el que

el procedimiento comprende además las etapas de:

  - 25 comparar cada instantánea de valores de parámetros reales con una instantánea relacionada de valores de los parámetros estimados para generar una puntuación global de similitud para cada comparación; e
  - indicar la estabilización del estado operativo del sistema en base a al menos una de las puntuaciones de similitud global.
4. El procedimiento de la reivindicación 3, en el que cada instantánea representa un vector de valores de parámetros que caracterizan un estado operativo del sistema en un momento en el tiempo.
- 30 5. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que dicha etapa de adaptación comprende la adaptación del modelo empírico cuando la puntuación global de similitud cae fuera de un intervalo seleccionado.
6. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la etapa de adaptación comprende:
  - identificar un comienzo de una fase de transición cuando la puntuación global de similitud cae fuera de un intervalo seleccionado;
  - 35 identificar un final de la fase de transición;
  - determinar en respuesta a la identificación del final de la fase de transición si el sistema está en un nuevo estado operativo que no se tiene en cuenta en el modelo empírico; y
  - actualizar el modelo empírico para tener en cuenta el nuevo estado operativo en respuesta a una determinación de que el nuevo estado operativo no fue tenido en cuenta en el modelo empírico.
- 40 7. El procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además calcular una pluralidad de puntuaciones de similitud global, y en el que la etapa de determinación comprende:
  - comparar al menos una puntuación global de similitud con un umbral, calculándose cada puntuación global de similitud en base a valores de los parámetros que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente después del final de la fase de transición, y si la al menos una puntuación global de similitud está por
  - 45 debajo del umbral, entonces se concluye que el nuevo estado no se tiene en cuenta en el modelo empírico.
8. El procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además calcular una pluralidad de puntuaciones de similitud global, y en el que la etapa de determinación comprende:

- 5       comparar una ventana de sucesivas puntuaciones de similitud global con un umbral, calculándose cada puntuación de similitud global en base a valores de los parámetros que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente y en un tiempo después del final de la fase de transición, y si al menos un número seleccionado de las puntuaciones de similitud global en dicha ventana caen por debajo del umbral, entonces se concluye que el nuevo estado operativo no se tiene en cuenta en el modelo empírico.
9. El procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además calcular una pluralidad de puntuaciones de similitud global, y en el que la etapa de determinación comprende:
- 10       comparar una ventana de sucesivas puntuaciones de similitud global con un umbral, calculándose cada puntuación de similitud global en base a valores de los parámetros que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente y en un tiempo después del final de la fase de transición, y si la media de dichas puntuaciones de similitud global en dicha ventana cae por debajo del umbral, entonces se concluye que el nuevo estado operativo no se tiene en cuenta en el modelo empírico.
- 15       10. El procedimiento de la reivindicación 6, en el que el modelo empírico tiene una biblioteca de referencia de instantáneas de valores de parámetros que caracterizan estados reconocidos del sistema, y la etapa de determinación comprende comparar una instantánea de los valores reales de los parámetros recibidos que representan un estado operativo en un momento después del final de la fase de transición para cada instantánea en la biblioteca de referencia para calcular la puntuación de similitud global para cada comparación, y si la más alta de tal puntuación de similitud global es inferior a un umbral seleccionado, a continuación, se concluye que el nuevo estado operativo no se tiene en cuenta en el modelo empírico.
- 20       11. El procedimiento de la reivindicación 6, en el que el modelo empírico tiene una biblioteca de referencia de instantáneas de valores de parámetros que caracterizan los estados reconocidos del sistema, y la etapa de determinación comprende comparar cada una en una serie de instantáneas de los valores reales de los parámetros recibidos que representan un estado operativo en un momento después del final de la fase de transición con cada instantánea en la biblioteca de referencia para calcular la puntuación de similitud global para cada comparación, y si la media a lo largo de la serie de la más alta puntuación de similitud global para cada instantánea real es menor que un umbral seleccionado, entonces se concluye que la nuevo estado operativo no se tiene en cuenta en el modelo empírico.
- 25       12. El procedimiento de la reivindicación 6, en el que el modelo empírico tiene una biblioteca de referencia de instantáneas de valores de parámetros que caracterizan los estados reconocidos del sistema, y la etapa de determinación comprende comparar cada una en una serie de instantáneas de los valores reales de los parámetros recibidos que representan un estado operativo en un momento después del final de la fase de transición con cada instantánea en la biblioteca de referencia para calcular la puntuación de similitud global para cada comparación, y si la puntuación de similitud global más alta de al menos un número seleccionado de instantáneas reales a lo largo de la serie es inferior a un umbral seleccionado, entonces se concluye que el nuevo estado operativo no se tiene en cuenta en el modelo empírico.
- 30       13. El procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además calcular una pluralidad de puntuaciones de similitud global, y en el que la etapa de identificación del final de la fase de transición comprende el examen de una ventana móvil de sucesivas puntuaciones de similitud global de la pluralidad, calculándose cada puntuación de similitud global en base a los valores reales de los parámetros que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente, y cuando cada uno de al menos un número seleccionado de sucesivas puntuaciones de similitud global en la ventana se encuentra dentro de un intervalo seleccionado alrededor de la anterior puntuación de similitud global, se identifica que se ha alcanzado el final de la fase de transición.
- 35       14. El procedimiento de la reivindicación 6, que comprende además calcular una pluralidad de puntuaciones de similitud global, y en el que la etapa de identificación del final de la fase de transición comprende el examen de una ventana móvil de sucesivas puntuaciones de similitud global de la pluralidad, calculándose cada puntuación de similitud global en base a los valores reales de los parámetros que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente, y cuando cada uno de al menos un número seleccionado de sucesivas puntuaciones de similitud global en la ventana se encuentra dentro de un intervalo seleccionado alrededor de la media de las anteriores puntuaciones de similitud global en la ventana, se identifica que se ha alcanzado el final de la fase de transición.
- 40       15. El procedimiento de la reivindicación 6, en el que el modelo empírico tiene una biblioteca de referencia de instantáneas de valores de parámetros que caracterizan los estados reconocidos del sistema, y la etapa de actualización comprende la adición de al menos una instantánea de los valores reales de los parámetros recibidos a la biblioteca de referencia.
- 45       16. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la etapa de cálculo comprende comparar elementos correspondientes de una instantánea de valores de parámetros reales recibidos y una instantánea relacionada de estimaciones para generar semejanzas elementales, y combinar estadísticamente las semejanzas elementales para generar la puntuación de similitud global.
- 50       55

17. El procedimiento de la reivindicación 2, en el que la etapa de examen comprende comparar elementos correspondientes de una instantánea de valores de parámetros reales recibidos y una instantánea relacionada de estimaciones para generar semejanzas elementales, y combinar estadísticamente las semejanzas elementales para generar la puntuación de similitud global.
- 5 18. El procedimiento de la reivindicación 17, en el que la instantánea relacionada de las estimaciones se genera en respuesta a la recepción de la instantánea de valores de parámetros reales.
19. El procedimiento de la reivindicación 17, en el que la instantánea relacionada de las estimaciones es una predicción relacionada con la instantánea de valores de parámetros reales en el tiempo, y se genera en respuesta a una instantánea anterior de los valores de los parámetros reales.
- 10 20. El procedimiento de la reivindicación 2 o 17, que comprende además el cálculo de una pluralidad de puntuaciones de similitud global, calculándose cada puntuación de similitud global en base a valores de parámetros reales que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente, y en el que el intervalo seleccionado tiene un umbral inferior igual a un múltiplo de una desviación estándar para una secuencia de las puntuaciones de similitud global, se resta de la media de la secuencia de las puntuaciones de similitud global.
- 15 21. El procedimiento de la reivindicación 20, en el que el múltiplo está en el intervalo de uno a tres.
22. El procedimiento de la reivindicación 17, en el que el intervalo seleccionado tiene un límite inferior seleccionado en el intervalo de 0,85 a 0,95.
- 20 23. El procedimiento de la reivindicación 17, que comprende además el cálculo de una pluralidad de puntuaciones de similitud global, calculándose cada puntuación de similitud global en base a valores de parámetros reales que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente, y en el que la etapa de indicación comprende indicar un cambio de estado operativo cuando al menos un número mínimo seleccionado de las puntuaciones de similitud global en una ventana de desplazamiento de las sucesivas puntuaciones de similitud global caen fuera del intervalo seleccionado.
- 25 24. El procedimiento de la reivindicación 3, que comprende además el cálculo de una pluralidad de puntuaciones de similitud global, calculándose cada puntuación de similitud global en base a valores de parámetros reales que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente, y en el que la etapa de indicación comprende el examen de una ventana móvil de sucesivas puntuaciones de similitud global, y cuando cada uno de al menos un número seleccionado de sucesivas puntuaciones de similitud global en la ventana se encuentra dentro de un intervalo seleccionado alrededor de la anterior puntuación de similitud global, se identifica que se ha estabilizado ese estado operativo del sistema.
- 30 25. El procedimiento de la reivindicación 3, que comprende además el cálculo de una pluralidad de puntuaciones de similitud global, calculándose cada puntuación de similitud global en base a valores de parámetros reales que representan un estado operativo en un instante de tiempo diferente, y en el que la etapa de indicación comprende el examen de una ventana móvil de sucesivas puntuaciones de similitud global, y cuando cada uno de al menos un número seleccionado de sucesivas puntuaciones de similitud global en la ventana se encuentra dentro de un intervalo seleccionado alrededor de la media de las anteriores puntuaciones de similitud global en la ventana, se identifica que se ha estabilizado ese estado operativo del sistema.
- 35 26. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la etapa de generación incluye la comparación de correspondientes elementos de una instantánea de valores de parámetros reales recibidos y una instantánea de valores de los parámetros estimados para generar semejanzas elementales, y combinar estadísticamente las semejanzas elementales para generar la puntuación de similitud global.
- 40 27. El procedimiento de la reivindicación 26, en el que las semejanzas elementales se generan usando un operador de similitud de prueba de relación de ángulos limitados.
- 45 28. El procedimiento de la reivindicación 26, en el que las semejanzas elementales se generan de acuerdo con el valor absoluto de la diferencia de los elementos correspondientes, dividido por un intervalo esperado para los elementos correspondientes.
29. Un aparato para la adaptación de un modelo empírico utilizado en la monitorización de la operación de un sistema, comprendiendo el aparato:
- 50 un módulo de decisión de adaptación (125) que incluye medios para recibir valores de parámetros reales que comprenden instantáneas actuales de los parámetros operativos monitorizados que caracterizan un estado operativo del sistema monitorizado;
- medios en el módulo de decisión de adaptación para determinar en base a un operador de similitud global si la instantánea actual de los datos del sensor procedentes del sistema representa un proceso molesto o un fallo del sensor, o representa el comienzo de una transición a un nuevo estado operativo del sistema monitorizado; y

5 si el módulo de decisión de adaptación reconoce una transición a un nuevo estado operativo y si el nuevo estado ha sido instalado en él, el módulo de decisión de adaptación decide adaptar o no mediante un examen, después del final del período de transición, las puntuaciones de similitud global de la actual instantánea respecto a una biblioteca de referencia para la más alta de tal similitud, y si esta es inferior a un umbral elegido, se considera el nuevo estado como un estado no reconocido que es un candidato para la adaptación; y

medios para adaptar el modelo, si el nuevo estado es un estado no reconocido, en una etapa de reconversión mediante la adición de instantáneas de la secuencia de instantáneas actuales a la biblioteca de referencia, o mediante la sustitución de las instantáneas en la biblioteca de referencia.



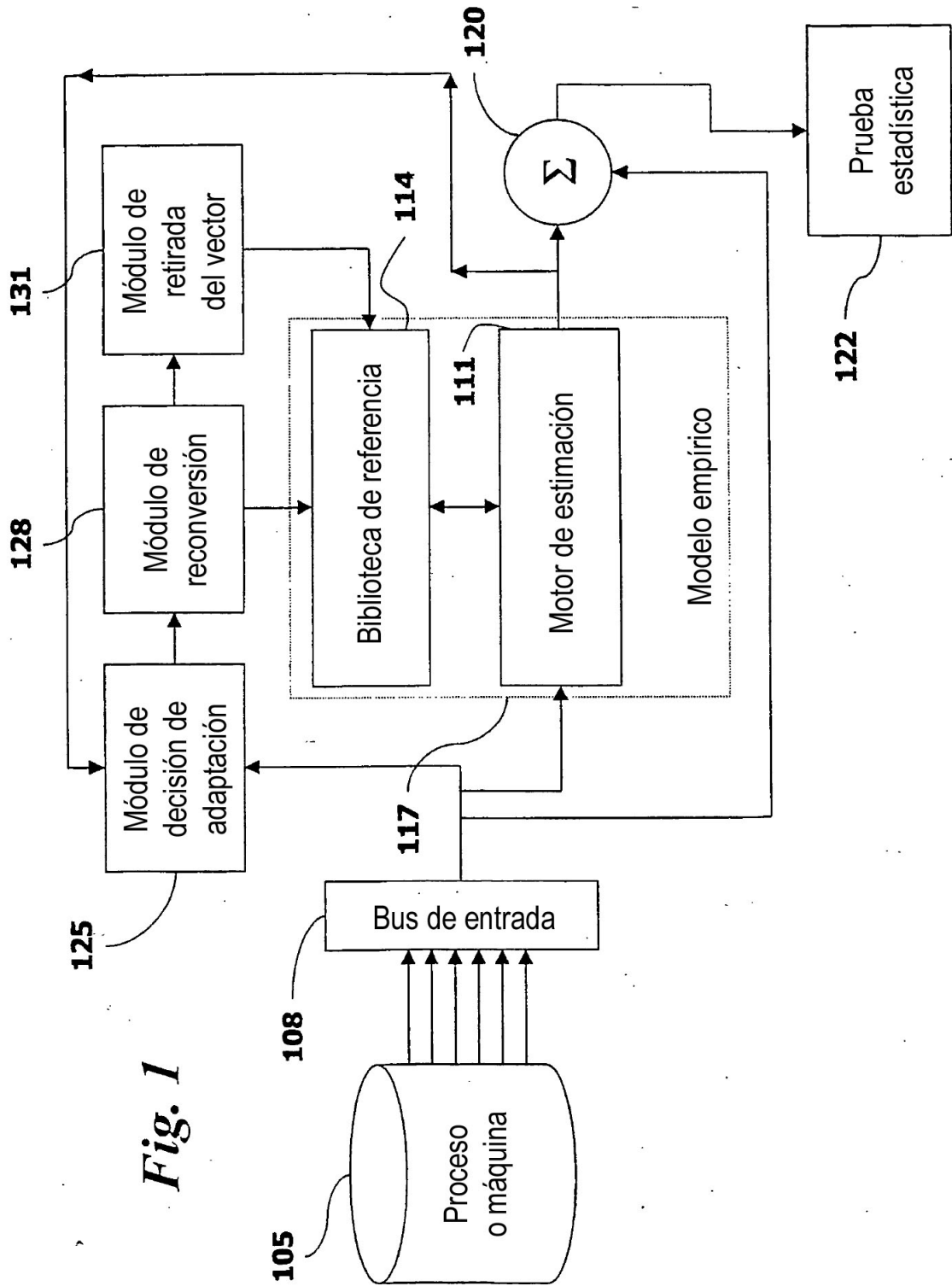


Fig. 1

Fig. 2

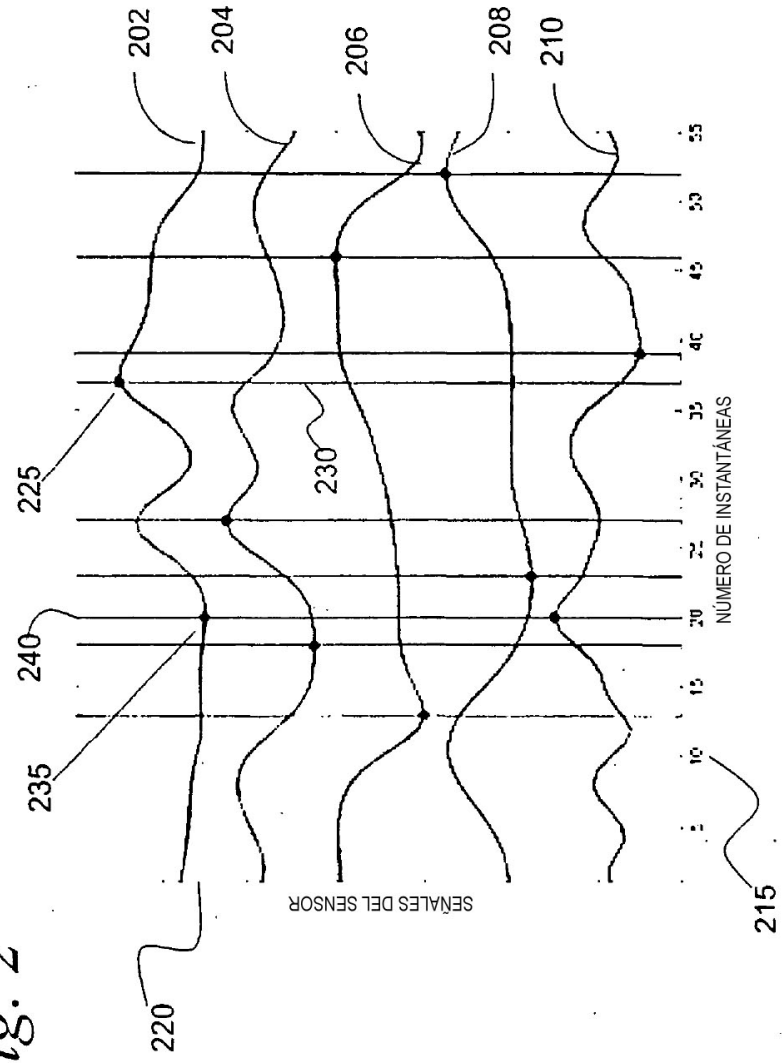


Fig. 3

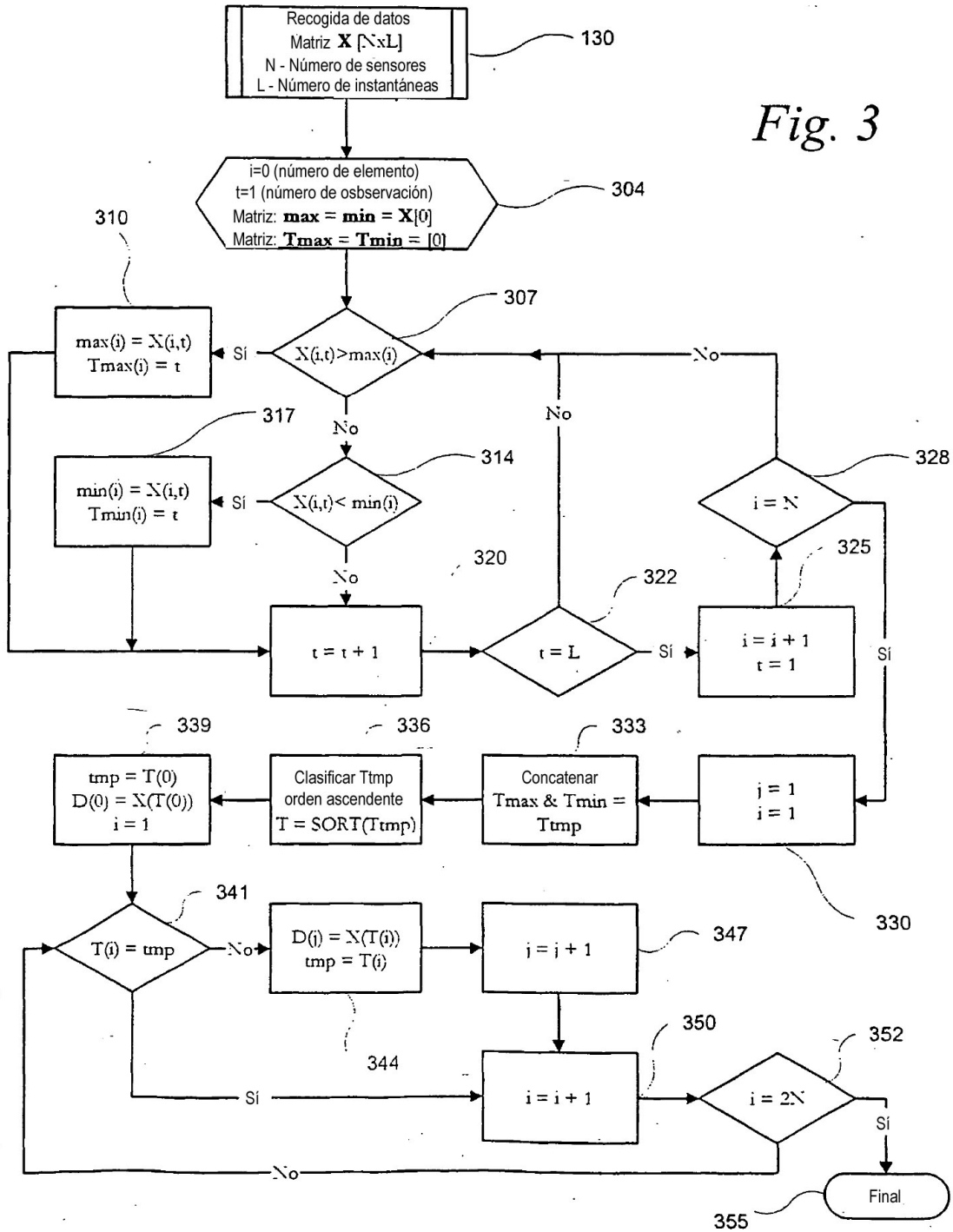


Fig. 4

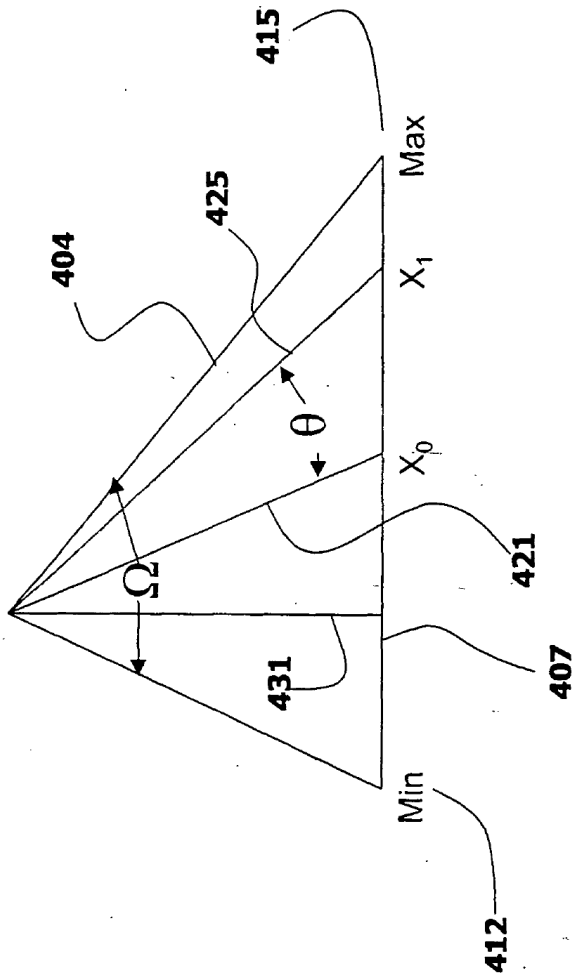


Fig. 5

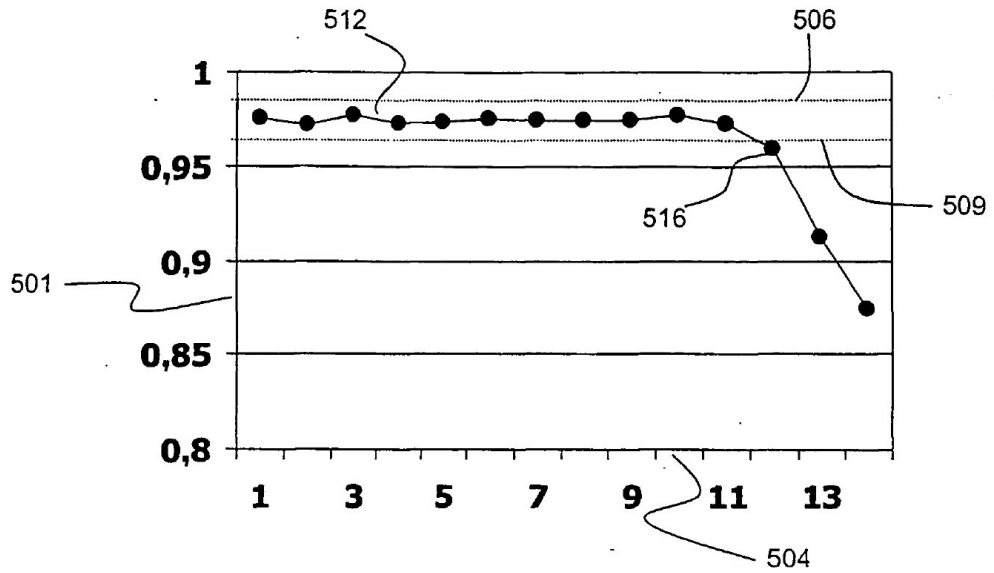


Fig. 6

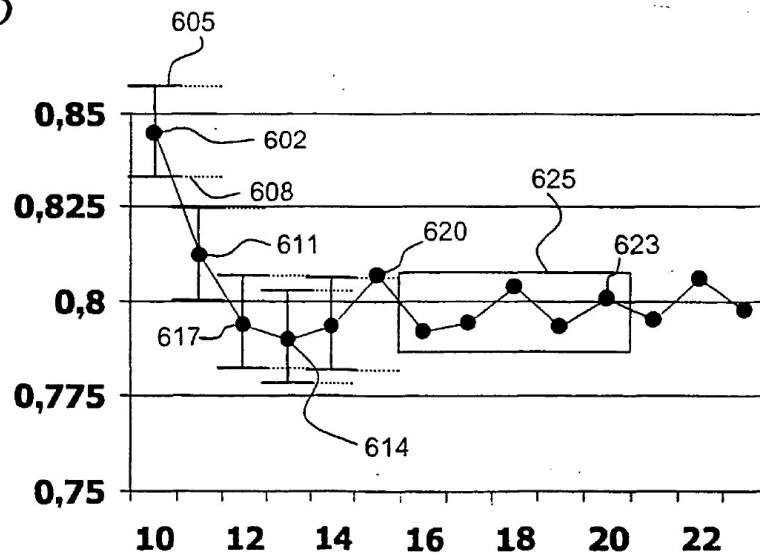


Fig. 7

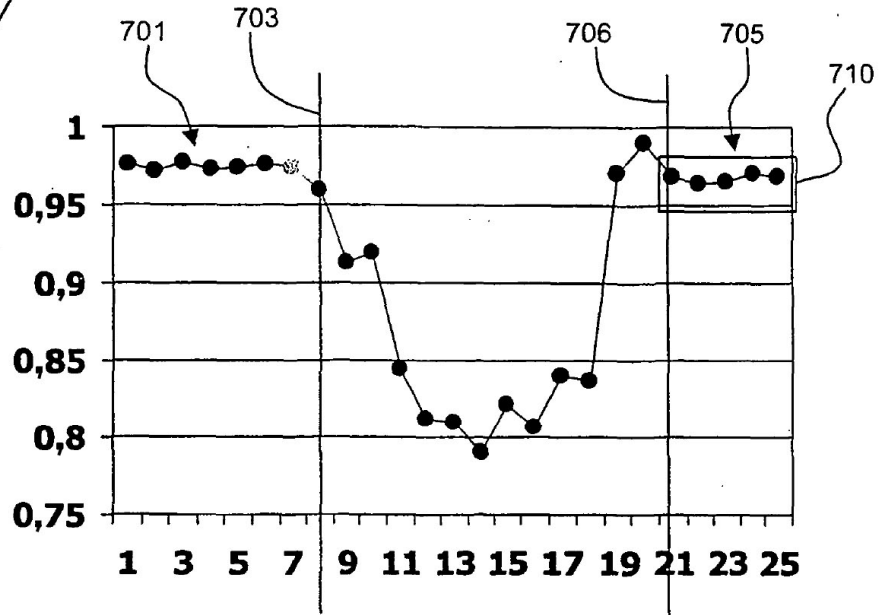


Fig. 8

