

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 540 859**

51 Int. Cl.:

**G01D 21/00** (2006.01)

**G01D 3/08** (2006.01)

**G05B 17/02** (2006.01)

**G05B 23/02** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.11.2001 E 10001611 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **29.04.2015 EP 2182327**

54 Título: **Generador de señal inferencial para equipos y procedimientos instrumentados**

30 Prioridad:

**22.11.2000 US 718592**

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

**14.07.2015**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**WEGERICH, STEPHAN W.**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

**ES 2 540 859 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**

Generador de señal inferencial para equipos y procedimientos instrumentados

**Campo de la invención**

5 La presente invención se refiere a la monitorización de procedimientos físicos para la detección temprana de un fallo de equipo inminente o perturbación del procedimiento y la validación continua en línea de la operación del sensor. Más específicamente, la invención se refiere a sistemas y procedimientos para la generación de señales de sustitución de sensores fallidos o para señales inferidas por parámetros físicos que no están directamente instrumentados.

**Antecedentes de la invención**

10 Monitorizar el rendimiento de casi cualquier procedimiento (tal como en la refinación, productos químicos, acero, producción de energía) requiere el uso de sensores para garantizar que la operación se mantiene dentro de las limitaciones prescritas y que el equipo está funcionando dentro de las especificaciones para garantizar una calidad y un rendimiento del producto aceptables. La monitorización y optimización del rendimiento de equipos y máquinas (sistemas de automóviles, motores a reacción, fabricación discreta, etc.) se basa igualmente en los sensores para  
15 garantizar una operación segura y un rendimiento máximo. Se ha desarrollado una plétora de sensores para medir los parámetros de procedimientos y equipos eléctricos, termales, químicos y físicos. Los tipos de sensores incluyen termopares, acelerómetros, medidores de flujo másico, sensores acústicos, indicadores de esfuerzo y deformación, sensores de vibración, y así sucesivamente.

20 Para las aplicaciones de monitorización y control de procedimientos y equipos más importantes, hoy en día los sensores se alimentan de forma eléctrica, y proporcionan una indicación eléctrica (ya sea analógica o digital) del parámetro que se solicita medir. Además, en muchas circunstancias, los sensores están conectados a través de un bus o una red, y pueden contener suficiente energía de procesamiento a bordo para paquetizar los datos de sensor y transmitirlos a través de una red. En algunos casos, los sensores están conectados con o contienen transmisores o transceptores inalámbricos para la transmisión de los datos de sensor a una localización remota.

25 Los datos de sensor pueden usarse en procedimientos o en operación de equipos en una variedad de maneras. Los sensores proporcionan una validación que controla los ajustes que tienen que tomar efecto, y una práctica típica es indicar una alarma cuando la lectura del sensor supera o cae por debajo de un umbral de seguridad o tolerancia. Los datos de sensor también pueden transmitirse a un repositorio de datos para un análisis y tendencia fuera de línea, que se usa para programar el mantenimiento o refinar un procedimiento. Un uso adicional de los datos de sensor es  
30 proporcionar una realimentación para el control continuo de la operación de un procedimiento de una pieza de un equipo. En un motor de automóvil, por ejemplo, un número de subsistemas usan los datos de sensor para calcular la configuración de corriente abajo para un rendimiento óptimo del motor, o para cumplir con ciertos requisitos mínimos de aire limpio.

35 Existe una variedad de circunstancias en las que es difícil o imposible emplear un sensor para medir un parámetro deseado. El entorno en el que se coloca el sensor puede ser hostil a la longevidad o incluso a una operación adecuada de un sensor, como por ejemplo en la medición del flujo de un gas que contiene una concentración problemáticamente alta de ácido corrosivo. Como alternativa, el entorno puede requerir un sensor que sea prohibitivamente caro o difícil de conseguir. En otra circunstancia alternativa, la medida solicitada puede ser imposible de medir de manera directa razonablemente, como en un intento de determinar el volumen vacío restante  
40 de una cámara de forma inusual parcialmente llenada con un líquido. En otras circunstancias más, el despliegue de un sensor puede debilitar de manera adversa o afectar de otra manera el procedimiento o sistema que se monitoriza. Por ejemplo, en un sistema de fluido cerrado, tal como un sistema hidráulico, la colocación de un sensor a través de la pared del sistema para medir directamente una propiedad del fluido presenta un punto de debilidad y un fallo potencial en el sistema cerrado. Lo que se necesita es una manera de medir indirectamente el parámetro en  
45 cuestión.

Bajo tales circunstancias, puede intentarse medir uno u otros más parámetros con el fin de inferir el parámetro deseado. Esto puede requerir equipar el procedimiento o equipo con sensores adicionales, y usar recursos informáticos para calcular el parámetro inferido. Sin embargo, en general, esto es difícil de hacer con éxito. Además, por lo general requiere mucho estudio y conocimiento del procedimiento o equipo, o una comprensión de los  
50 "primeros principios" dinámicos del sistema, que no pueden obtenerse fácilmente sin una razonable cantidad de tiempo de investigación y coste. Lo que se necesita es una forma efectiva de inferir un parámetro difícil de medir a partir de otros parámetros medidos de un sistema que se correlacionan de alguna manera, sin requerir un conocimiento completo de las dinámicas del sistema y de los parámetros implicados.

55 También existe tal necesidad para la circunstancia de fabricación de un producto instrumentado, tal como un motor u otra máquina, que use sensores para el control de la realimentación, la seguridad, o la optimización del rendimiento. Es altamente deseable para reducir el coste de producción del producto no equipar el producto con un sensor para cada parámetro, sino que inferir algunos parámetros en base a las lecturas de otros sensores. Tal inferencia puede ser posible usando un subconjunto de sensores de la máquina o del motor, junto con un amplio conocimiento del

comportamiento de todos los parámetros en tándem. Sin embargo, el conocimiento necesario puede ser difícil y costoso de desarrollar. Además, el coste de la potencia de cálculo adicional que pueda necesitarse a bordo del producto para calcular los valores de sensor inferidos puede sobrepasar el ahorro de costes de la eliminación de los sensores en el primer lugar. Lo que se necesita es una forma computacionalmente eficiente de inferir los valores de sensor “eliminados” de las unidades de producción a partir de los valores de sensores que están, de hecho, integrados en las unidades de producción del producto.

Una dificultad adicional se presenta con el fallo de los sensores. Como un ejemplo, los sensores pueden usarse para monitorizar un procedimiento o equipo para detectar cuando se desvía de la operación “normal” o correcta. Normal puede significar un estado operativo aceptable, o puede ser el más preferido de un conjunto de diversos estados aceptables. Sin embargo, en la práctica, la desviación puede deberse a un cambio en el parámetro subyacente medido por el sensor, o a un sensor fallido. Por lo tanto, es esencial que se conozca también la salud de estos sensores, y deberían identificarse y diferenciarse las perturbaciones iniciadas por los fallos del sensor de las desviaciones del procedimiento. A menudo, incluso aunque un sensor haya fallado, es deseable continuar la operación del procedimiento y el sensor fallido debe sustituirse con un sensor de sustitución o “virtual” que proporcione la misma información. Lo que se necesita es una manera de proporcionar una salida o una estimación para un sensor fallido dentro de un sistema que permita una operación continua.

Las técnicas de “primeros principios” son conocidas en la técnica para generar los datos de sensor “virtuales” en base a otros datos de sensor reales. Maloney y col. describen en “Pneumatic And Thermal State Estimators For Production Engine Control And Diagnostics”, Controles de motor electrónicos 1998, algoritmos de estimador implementados en un sistema de gestión de motor (EMS) de densidad de velocidad de grado de producción. Una necesidad crítica y básica en el diseño del control EMS y los algoritmos de diagnóstico es la disponibilidad de información que describe el estado del motor. Los algoritmos de estimador proporcionan un flujo de masa del motor, la presión, y las estimaciones de temperatura para su uso general por algoritmos de estimador de control, diagnóstico y otros. Maloney y col. describen el desarrollo de tales modelos de primeros principios con motores totalmente instrumentados en el laboratorio, para calcular las señales virtuales fuera de las señales de sensor reales. El desarrollo está implicado y es altamente específico para la solicitud presentada. Por lo tanto, sería deseable proporcionar un procedimiento general para la generación de valores perdidos o señales virtuales sin tener que recurrir al desarrollo de los modelos de primeros principios.

En una tendencia relacionada, los procedimientos o máquinas se monitorizan por sistemas en base a un soporte lógico que monitorizan los valores de sensor correlacionados en global. Tal sistema se describe en la patente de Estados Unidos Nº 5.764.509 de Gross y col., cuyas enseñanzas se incorporan por referencia. Tal sistema para monitorizar o proporcionar control sobre un procedimiento o máquina es superior a la monitorización y al control tradicional en base al sensor de tipo umbral porque puede diferenciar en general el comportamiento normal o aceptable del procedimiento o máquina a partir de estados inaceptables o de alarma mucho antes que el sistema umbral. Gross y col. enseñan una técnica de modelado empírico que acepta como entrada un conjunto de lecturas de sensor actuales para los parámetros correlacionados lineales y no lineales del procedimiento o máquina monitorizada, y genera estimaciones como salidas de lo que esas lecturas actuales del sensor deberían ser. A continuación, esto se compara usando una prueba de hipótesis estadística para cada sensor para determinar si cualquier sensor está mostrando una desviación estadísticamente significativa de lo que se espera. El modelo empírico de Gross y col. se crea a partir de una historia de los datos recogidos que representan los intervalos esperados de operación para el procedimiento o máquina monitorizada.

Una cuestión importante de tal sistema es la robustez del sistema cuando se presenta con un fallo de un sensor, en oposición a un procedimiento o desviación funcional. Una entrada de señal de sensor mala a un sistema de este tipo puede afectar potencialmente a las estimaciones realizadas por el modelo para todos los sensores en el procedimiento o máquina.

Además, otros módulos de control fuera del sistema de monitorización pueden estar dependiendo de la señal de sensor mala. Sería beneficioso en tales sistemas reducir el impacto de un sensor fallido en la capacidad del sistema para generar estimaciones precisas y por lo tanto representar con precisión el estado operativo del procedimiento o máquina. Adicionalmente, sería ventajoso ser capaz de generar una señal de sustitución para el sensor fallido y hacerla disponible para cualquier otro sistema de control que normalmente depende de las señales de sensor en tiempo real en bruto. Existe una necesidad de una forma de manejar un sensor fallido en estas circunstancias en un sistema de modelado empírico como el de Gross y col.

El documento US 5864773 A describe un sistema que procesa la información proporcionada por los sensores de equipo y los sensores virtuales con el fin de producir estimaciones de procedimiento de la maquinaria y de los estados de obleas para la detección de fallos. Con este fin, el documento desvela el siguiente procedimiento:

(A) Los sensores 14 de equipos miden condiciones de procedimiento y proporcionan señales que se introducen en las unidades 16 de procedimiento de filtrado para eliminar el ruido de las señales detectadas, para reducir la dimensión del problema de análisis (es decir, reducir la cantidad de datos), y para corregir los datos de acuerdo con los modelos de deriva de sensor. Esto da como resultado un conjunto reducido de variables o componentes principales para el análisis de fallos. (B) A continuación, se usa el análisis empírico para examinar el conjunto

reducido de variables para la correlación con los estados de la máquina, el procedimiento y la oblea. (C) Una vez que se determinan las correlaciones, se usan los procedimientos de modelado para asignar las variables a las estimaciones incluyendo las estimaciones virtuales. Los sensores 24 virtuales generan las estimaciones por regresión lineal, redes neuronales, u otros procedimientos. (D) Por último, el sistema 26 lógico en base a reglas usa las estimaciones virtuales y las medidas reales para determinar si existe un fallo usando comparaciones lógicas.

**Sumario de la invención**

La presente invención proporciona un sistema y procedimiento mejorados para producir señales de sensor de sustitución para sensores fallidos, y señales de sensor inferidas para parámetros físicos no instrumentados, en procedimientos y equipos que tienen uno o más sensores en lugar de parámetros físicos de monitorización. El sistema puede proporcionar valores de parámetros esperados, así como las diferencias entre las señales esperadas y de entrada; o el sistema puede proporcionar medidas en bruto de similitud entre la recogida de señales de entrada y la recogida de estados modelados aceptables.

En un procedimiento o máquina que esté completamente instrumentada con sensores para todos los parámetros de interés, los datos de sensor se recogen para todos los regímenes de operación posterior esperados de los mismos o procedimientos o máquinas similares. Estos datos recogidos forman una historia a partir de la que el sistema de la invención puede “aprender” la operación deseada o normal del procedimiento o máquina, usando rutinas de entrenamiento que lo depuran a un conjunto representativo de datos de sensor. Usando este conjunto de entrenamiento representativo de datos de sensor, las realizaciones descritas monitorizan el procedimiento o máquina en operación en tiempo real (o si se prefiere, en modo por lotes), y generan estimaciones para algunos de los sensores para los que se han recogido los datos históricos, pero que han fallado o que se han eliminado del procedimiento o máquina. La invención puede emplearse como una salvaguarda que se activa para producir una señal de sensor de sustitución cuando falla un sensor real (un modo autoasociativo o de sustitución). También puede usarse para producir una señal de sensor inferida para reducir el coste de producción de una máquina reduciendo el número de sensores que son necesarios para monitorizar y controlar la máquina (un modo inferencial).

El aparato de la presente invención puede desplegarse como un dispositivo accionado eléctricamente con una memoria y un procesador, localizado físicamente en o cerca del procedimiento o máquina para el que se ha generado la señal “virtual”. Como alternativa, puede localizarse de forma remota del procedimiento o máquina, como un módulo en un ordenador que recibe los datos de sensor de los sensores en vivo en el procedimiento o máquina a través de una red o una instalación de transmisión inalámbrica. Las señales de sensor de sustitución o inferidas generadas en consecuencia pueden devolverse a un sistema de control o sistema de visualización local al proceso o máquina, o localizarse en la localización remota o aún en una localización remota diferente.

Una memoria para almacenar el conjunto de entrenamiento representativo, o una transformación del mismo, está acoplada a un procesador. El procesador recibe a partir de las señales de datos de entrada que contienen, los valores reales de los sensores realmente en el procedimiento o máquina, y puede recibir estos en tiempo real. El procesador está dispuesto para tomar un conjunto de lecturas de los sensores reales de la entrada, y generar una estimación de uno o más sensores inferidos deseados, usando una combinación lineal de los datos de sensor del conjunto de entrenamiento representativo, como ponderado por el resultado de una medida de similitud de los datos de sensor de entrada a los datos de sensor del conjunto de entrenamiento representativo.

En consecuencia, sería ventajoso proporcionar un procedimiento para generar una estimación de un parámetro físico de un procedimiento o máquina en base a los valores de sensor de otros parámetros físicos del procedimiento o máquina, y en base a un conjunto de datos de sensor del procedimiento o máquina representativos de la operación pasada. El sistema de monitorización mejorado puede aceptar un conjunto de entradas de datos de sensor para un procedimiento o máquina, y proporcionar como salida al menos una estimación de un parámetro del procedimiento o máquina que no esté entre las entradas de sensor. Un procedimiento y un aparato computacionalmente eficientes para generar una señal de sustitución para un parámetro en un procedimiento o máquina de sensor monitorizado son también deseables cuando se determina que un sensor ha fallado. Para este fin, sería ventajoso proporcionar un módulo ejecutable por ordenador para generar una señal de sensor de sustitución para un sensor fallido, o una señal de sensor inferida para un parámetro no instrumentado, en base a una entrada de otros parámetros o un procedimiento o máquina, y para emitir la estimación a un sistema de visualización o control. Un componente en base a un microprocesador puede añadirse a una máquina para interactuar con los datos de sensor en la máquina para proporcionar las estimaciones inferidas de al menos un parámetro físico adicional de la máquina no medido por los sensores.

**Breve descripción de los dibujos**

Las funciones novedosas que se creen características de la invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas. Sin embargo, la invención en sí misma, así como el modo preferido de uso, otros objetivos y las ventajas de la misma, se entienden mejor por referencia a la siguiente descripción detallada de las realizaciones junto con los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 ilustra las etapas para la configuración de la generación de señales virtuales de inventiva para un procedimiento o máquina;

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

- 5 La figura 3 ilustra un diagrama de flujo para crear un conjunto de datos de “entrenamiento” representativo establecido a partir de los datos de sensor recogidos para su uso en la invención;

La figura 4 es un diagrama de una disposición para obtener una historia del conjunto de datos para una máquina, para uso en la presente invención;

- 10 La figura 5 ilustra una realización del procesador de a bordo de la presente invención para generar señales virtuales para una máquina o procedimiento monitorizado o controlado;

La figura 6 ilustra una realización de monitorización remota de la presente invención para generar señales virtuales para una máquina o procedimiento monitorizado o controlado;

La figura 7 ilustra un diagrama de flujo para generar un conjunto de una o más señales de sensor virtuales de acuerdo con la presente invención;

- 15 La figura 8 ilustra el cálculo de uno de los operadores de similitud de la presente invención;

La figura 9 ilustra un diagrama de flujo de la lógica de decisión para generar una señal virtual de sustitución en un procedimiento o máquina monitorizada de acuerdo con la invención;

La figura 10 ilustra un sistema hidráulico capaz de monitorizarse por la presente invención usando una señal compleja; y

- 20 La figura 11 muestra una gráfica de una señal virtual generada en comparación con la señal de sensor real correspondiente de acuerdo con la invención.

**Descripción detallada de las realizaciones preferidas**

- 25 Volviendo a la figura 1, un diagrama de flujo general muestra las etapas para la configuración y el uso de un procedimiento, máquina, sistema u otra pieza de equipo, ya sea mecánico, eléctrico o biológico, de acuerdo con la invención. En la etapa 110, una realización descrita del procedimiento o máquina a partir de la que pueden generarse las señales inferidas o de sustitución en operación, está totalmente instrumentada con suficientes sensores para medir todos los parámetros de interés, incluyendo los parámetros para los que se generan las señales virtuales. En la etapa 120, se recogen los datos de sensor cuando se hace funcionar el prototipo a través de todos los intervalos de operación que se esperan posteriormente. En la etapa 130, se usa uno de varios procedimientos de “entrenamiento” para depurar los datos de sensor recogidos en la etapa 120 en un subconjunto suficiente para representar los intervalos y las correlaciones operativas entre los sensores a lo largo de esos intervalos. Estos procedimientos se tratarán a continuación. En la etapa 140, los datos de sensor representativos depurados o una transformación de esos datos, incluyendo los elementos de datos correspondientes a cada uno de (todos) los sensores con los que se ha instrumentado el prototipo, se cargan en una memoria de procesador que se proporcionará para generar las señales de sensor virtuales para el procedimiento o máquina en una operación normal. En la etapa 150, la aplicación para generar señales de sensor virtuales es igual que unas señales de sensor de sustitución para los sensores que fallan en operación. En la etapa 160, la aplicación para generar las señales de sensor virtuales es igual que unas señales inferidas para los sensores que se eliminan o no se integran en series de producción de máquinas o equipos, ahorrando de esta manera el coste de los sensores ausentes, mientras que, no obstante, se proporcionan señales para el procesamiento corriente abajo.
- 30
- 35
- 40

- Las realizaciones descritas proporcionan sustancialmente el procedimiento o máquina para la que se generarán las señales virtuales en operación. Por ejemplo, en el caso de un motor, un motor prototipo puede estar completamente instrumentado en una configuración de banco de laboratorio con sensores para todos los parámetros. A continuación, el motor prototipo es operado a través de una variedad de intervalos operativos, y se registran los datos de sensor para todos los sensores, por lo general, como valores de tiempo de sellado y digitalizados por medio de ordenadores digitales unidos a y en comunicación con las salidas del sensor. Usando el procesador de ordenador y el soporte lógico de las realizaciones descritas, los datos de sensor recogidos se depuran a continuación, a un subconjunto de datos de sensor que representa los intervalos operativos para los que se han recogido los datos. Cuando el objetivo es producir en masa este motor con un coste reducido de la producción integrando un menor número de sensores, pero teniendo todavía todas las señales de sensor disponibles para la monitorización y control del motor, los datos representativos depurados se proporcionan en un módulo de soporte lógico de ordenador de inventiva y en un procesador de soporte físico para ejecutarlo, que puede integrarse en el sistema de monitorización o de control del motor, y que genera señales virtuales de los sensores que faltan, como se detalla a continuación. El sistema descrito en las realizaciones preferidas se proporciona para monitorizar el equipo instrumentado con una pluralidad de sensores capaces de monitorizarse con un procesador de información. Se
- 45
- 50
- 55

- proporciona un sistema frontal de entrada de adquisición de datos para su uso con el procesador de información para recibir valores operativos descriptivos de los parámetros físicos del sistema. Unos datos de sensor correlacionados en tiempo representativos de los estados y las señales operativas esperadas observadas a partir del equipo instrumentado durante la operación se usan por el procesador de información para generar salidas que son descriptivas de un parámetro que puede incluir o estar provisto además de señales observadas a partir del equipo instrumentado. El procesador de información puede funcionar en respuesta a la pluralidad de sensores del equipo instrumentado para establecer relaciones entre las señales de componentes y uno o más parámetros del procedimiento del equipo para generar una o más señales paramétricas correspondientes para procesar los parámetros del sistema.
- Como otro ejemplo, para un procedimiento en el que es deseable medir un parámetro que exigiría colocar un sensor en un entorno corrosivo o destructivo, puede construirse una maqueta del procedimiento en una configuración de laboratorio, completamente instrumentada. La maqueta puede ser operada a través de los intervalos esperados de la operación posterior, y los datos recogidos a lo largo de estos intervalos. Mientras que uno o más sensores pueden destruirse eventualmente de esta manera hasta que se recojan suficientes datos, el modelo inferencial de inventiva posterior permitirá una operación plena del procedimiento del que se trate, sin la necesidad posterior de reemplazar los sensores destruidos adicionalmente. El parámetro puede generarse en la operación por el módulo de ordenador de las realizaciones descritas, haciendo referencia a los datos representativos depurados a partir de los datos recogidos en el laboratorio.
- La cantidad de datos históricos que deben recogerse para proporcionar el conjunto de entrenamiento representativo es, por supuesto, un contingente de la aplicación específica y la variedad de modos e intervalos operativos que se encontrarán en la operación supervisada normal, pero en cualquier caso, por lo general, representa mucho menos tiempo y esfuerzo que el que se requiere para estudiar el sistema a través de todos sus intervalos para derivar un modelo de primeros principios del sistema. Es importante destacar que los datos recogidos deberían incluir ambos lados de cualquier histéresis presente en los modos operativos.
- Por lo tanto, las realizaciones descritas proporcionan un enfoque empírico extremadamente beneficioso para proporcionar señales de sensor de sustitución o señales de sensor inferidas para monitorizar y controlar un procedimiento o máquina. Esto evita la larga tarea o quizás insalvable de desarrollar un modelo de primeros principios y la comprensión de las relaciones entre todos los parámetros instrumentados.
- Volviendo a la figura 2, se representa gráficamente un procedimiento de la etapa 130 para depurar los datos de sensor recogidos en la etapa 120 para crear un conjunto de datos de entrenamiento representativo. Se muestran cinco señales 202, 204, 206, 208 y 210 de sensor para un procedimiento o máquina en la que más tarde una o más de las cinco se generarán por inferencia. El eje 215 de abscisas es el número de la muestra o sello de tiempo de los datos de sensor recogidos, en el que los datos se muestrean digitalmente y los datos de sensor se correlacionan temporalmente. El eje 220 de ordenadas representa la magnitud relativa de cada lectura de sensor a través de las muestras o "instantáneas". Cada instantánea representa un vector de cinco elementos, una lectura para cada sensor en esa instantánea. De todos los datos de sensor recogidos en la etapa 120 (todas las instantáneas), de acuerdo con este procedimiento de entrenamiento, se incluyen solo aquellas instantáneas de cinco elementos en el conjunto de entrenamiento representativo que contiene o un valor mínimo global o uno máximo global para cualquier sensor dado. Por lo tanto, para el sensor 202, el máximo 225 global 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 global, en el conjunto de entrenamiento representativo, como un vector de cinco elementos. Del mismo modo, para el sensor 202, el mínimo 235 global justifica la inclusión de los cinco valores de sensor en las intersecciones de la línea 240 con cada señal de sensor.
- La selección de datos representativos se representa también en la figura 3. Los datos recogidos en la etapa 130 tienen  $N$  sensores y  $L$  observaciones o instantáneas o conjuntos temporalmente relacionados de datos de sensor que componen una matriz  $X$  de  $N$  filas y  $L$  columnas. En la etapa 304, se inicializa a cero un contador  $i$  para un número de elemento, y se inicializa a uno un contador  $t$  de observación o de instantáneas. Dos matrices "max" y "min" para contener los valores máximos y mínimos respectivamente a través de los datos recogidos para cada sensor, se inicializan para ser vectores cada uno de los  $N$  elementos que se igualan a la primera columna de  $X$ . Dos matrices adicionales  $T_{max}$  y  $T_{min}$  para mantener el número de observación del valor máximo y mínimo observado en los datos recogidos para cada sensor, se inicializan para ser vectores cada uno de los  $N$  elementos, todos a cero.
- En la etapa 307, si el valor de sensor del sensor  $i$  en la instantánea  $t$  en  $X$  es mayor que el máximo visto todavía para ese sensor en los datos recogidos,  $max(i)$  se actualiza para igualar el valor de sensor y  $T_{max}(i)$  almacena el número  $t$  de la observación en la etapa 310. Si no es así, se hace una prueba similar para el mínimo para ese sensor en las etapas 314 y 317. El contador  $t$  de observación se incrementa en la etapa 320. En la etapa 322, si todas las observaciones se han revisado para un sensor dado ( $t = L$ ), entonces  $t$  se reinicia e  $i$  se incrementa (para encontrar el máximo y el mínimo para el siguiente sensor) en la etapa 325. Si el último sensor se ha terminado ( $i = N$ ), etapa 328, entonces, se eliminan las redundancias y se crea una matriz  $D$  a partir de un subconjunto de vectores de  $X$ .
- En primer lugar, en la etapa 330, se inicializan a uno los contadores  $i$  y  $j$ . En la etapa 333, las matrices  $T_{max}$  y  $T_{min}$  se concatenan para formar un solo vector  $T_{tmp}$  que tiene  $2N$  elementos. Estos elementos se clasifican en orden

ascendente (o descendente) en la etapa 336 para formar una matriz T. En la etapa 339, el portador *tmp* se establece al primer valor en T (un número de observación que contiene un sensor mínimo o máximo). La primera columna de D se iguala a la columna de X correspondiente al número de observación que es el primer elemento de T. En el bucle de partida con la etapa 341 de decisión, el *i*-ésimo elemento de T se compara con el valor de *tmp* que contiene el elemento anterior de T. Si son iguales (el vector de observación correspondiente es un mínimo o un máximo para más de un sensor), ya se ha incluido en D y no necesita incluirse de nuevo. El contador *i* se incrementa en la etapa 350. Si no son iguales, se actualiza D para incluir la columna de X que corresponde al número de observación de T(*i*) en la etapa 344, y se actualiza *tmp* con el valor en T(*i*). A continuación, el contador *j* se incrementa en la etapa 347. En la etapa 352, si se han comprobado todos los elementos de T, entonces, la depuración en el conjunto D de entrenamiento ha terminado, etapa 355.

Volviendo a la figura 4, se muestra un diagrama esquemático de una disposición de un banco de trabajo de laboratorio para recopilar datos del comportamiento de un procedimiento o máquina para la depuración. Se representa un prototipo 410 de máquina, que puede ser cualquier tipo de máquina para la que se necesitan o son deseables sensores virtuales. Por ejemplo, una máquina 410 puede ser un motor de combustión, un motor eléctrico, una bomba, un compresor, un refrigerador, y así sucesivamente. La máquina 410 se denomina un prototipo, pero es importante destacar que debería generar datos de sensor que sean sustancialmente los mismos que los valores de parámetro reales esperados en un modelo de producción de la máquina, como debería medirse por los mismos sensores. Por supuesto, el prototipo puede ser un ejemplo del propio modelo de producción, e idealmente no necesita diferir de ninguna forma de otros modelos de producción. La máquina 410 puede estar conectada a y controlada por un sistema 420 de control, que comprende, en general, un sistema digital en base a un microcontrolador o un microprocesador con entradas y salidas analógicas/digitales y digitales/analógicas apropiadas según se necesiten. La máquina 410 está instrumentada con sensores que proporcionan valores de sensor a lo largo de las salidas 430. Mientras que todos los parámetros de interés están instrumentados en esta disposición de un banco de trabajo de laboratorio, se entiende que solo un subconjunto 440 de los sensores se empleará en un modelo de producción de la máquina 410, mientras que un segundo subconjunto 450 de sensores no se empleará o no puede emplearse de manera fiable en el modelo de producción de la máquina 410. Esto puede hacerse para evitar los costes de los sensores 450, o puede deberse a la dificultad o imposibilidad de emplear los sensores 450 durante tanto tiempo como sea necesario en el modelo de producción. La máquina 410 se hace funcionar a través del intervalo esperado de las operaciones, y el sistema 460 de adquisición de datos puede usarse para grabar a continuación, los valores de todos los sensores 430 con los que la máquina 410 está instrumentada. Además, las señales de control del sistema 420 de control pueden registrarse también por el sistema 460 de adquisición de datos, y pueden usarse como "señales de sensor" que se correlacionan con las otras señales de sensor.

Los datos adquiridos por el sistema 460 de adquisición de datos pueden procesarse en consecuencia usando un módulo 480 de ordenador para producir un conjunto de datos de entrenamiento depurados que representan los intervalos operativos de la máquina 410, usando el procedimiento de entrenamiento descrito anteriormente, u otros procedimientos que puedan conocerse en la técnica.

En la realización descrita actualmente, se muestra un procesador de a bordo en la figura 5, en el que una máquina (o procedimiento) 508 se controla por un sistema 517 de control que se localiza en la máquina. La máquina 508 está instrumentada con sensores para algunos de los parámetros físicos o lógicos de interés en el control de la máquina, y las salidas de estos sensores se muestran como conductores 523 de salida, que se introducen en el sistema 517 de control. Estos se introducen también en un procesador 545 localizado dentro o en la máquina, dispuesto para ejecutar un programa de cálculo para generar un conjunto 530 de al menos una señal virtual a partir de las señales en los conductores 523 de salida. El procesador está conectado a una memoria 551, también dentro o en la máquina, que almacena los datos que comprenden el conjunto de entrenamiento depurado para representar los estados operativos esperados de la máquina 508. La memoria 551 también puede almacenar de manera ventajosa programas para su ejecución por el procesador 545. Las señales 530 virtuales generadas por el procesador 545 se proporcionan al sistema 517 de control, en lugar de los valores de sensor auténticos de los parámetros físicos o lógicos de la máquina. De esta manera, usando un procesador y una memoria localizados en o dentro de la máquina, el sistema de control de la máquina puede proveerse, de manera ventajosa, de suficientes valores de parámetros físicos de la máquina para controlarla de manera eficaz, incluso si algunos de los parámetros físicos no se han instrumentado, debido a consideraciones de ahorro de costes, o debido a la imposibilidad de instrumentar uno o más parámetros físicos.

El procesador 545 también puede ser una parte del sistema 517 de control, y de hecho puede ser el procesador en el que se ejecutan las rutinas del sistema de control, en el caso de que el sistema de control sea un sistema de control computarizado digital. Idealmente, el procesador 545 y la memoria 551 se alimentan por la misma fuente de alimentación como el sistema de control. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, también puede ser preferible proporcionar un procesador y una memoria independientes del procesador y/o la memoria del sistema de control, con el fin de proporcionar señales 530 virtuales en el momento oportuno, como si fueran parámetros verdaderamente instrumentados. Por ejemplo, puede ser necesario que el procesador 545 deba funcionar a una velocidad de reloj más alta que cualquier procesador disponible dentro del sistema de control, con el fin de proporcionar señales virtuales de una forma que parezcan indistinguibles al sistema de control de un parámetro instrumentado auténtico. Además, el procesador 545 y la memoria 551 pueden comprender una unidad independiente del sistema de control con su propia fuente de alimentación que puede actualizarse para un sistema

de máquina y control existente.

De acuerdo con otra realización, se muestra un procedimiento 603 en la figura 6 para instrumentarse con sensores que tienen conductores 606 de salida. Estos proporcionan señales de sensor a un sistema 610 de control que controla el procedimiento. Estas señales se proporcionan también a un enlace 613 de comunicaciones remoto, que está dispuesto para comunicar los valores digitales de las señales de sensor a un segundo enlace 615 de comunicaciones remoto, localizado en un lugar remoto físicamente. Se proporciona un procesador 618, que puede comprender un sistema informático y un soporte lógico, que usa las señales de sensor recibidas por el enlace 615 para generar al menos una señal de sensor virtual indicativa de un parámetro físico inferido del procedimiento 603. Se proporciona una memoria 620 para almacenar un conjunto de datos de entrenamiento representativos del comportamiento operativo esperado del procedimiento 603, de acuerdo con el procedimiento de depuración descrito anteriormente. Además, puede proporcionarse una pantalla 623 en la localización remota para visualizar los datos descriptivos del procedimiento 603, que comprende las señales 606 de sensor o las señales virtuales derivadas de las mismas o de ambas. Las señales virtuales generadas por el procesador 618 pueden transmitirse de nuevo también desde el enlace 615 al enlace 613 y la entrada a través de los conductores 627 al sistema 610 de control para el control ventajoso del procedimiento. Los datos que comprenden las señales de sensor originales y/o las señales de sensor virtuales pueden transmitirse también a un tercer enlace 630 de comunicaciones remoto, localizado en una tercera localización distante, para su visualización en la pantalla 633, proporcionando de este modo información valiosa relativa al procedimiento para las partes interesadas localizadas ni en la planta física del procedimiento ni en el lugar de cálculo de las señales virtuales.

Los enlaces de comunicaciones remotos pueden seleccionarse a partir de una variedad de técnicas conocidas en la técnica, incluyendo la comunicación de paquetes en base al protocolo de internet sobre la infraestructura pública de telecomunicaciones, las comunicaciones punto a punto de líneas dedicadas directas, inalámbricas o por satélite. Más específicamente, los enlaces 613, 615 y 630 remotos pueden ser servidores habilitados en internet con un soporte lógico de aplicación para acumular, encolar y transmitir datos como mensajes y colas para recibir y reconstituir los datos que llegan como mensajes. Como alternativa, las comunicaciones pueden ser sincrónicas (queriendo decir en contraste con las comunicaciones en base a mensajes asíncronos) sobre un enlace inalámbrico.

La realización de la invención mostrada en la figura 6 proporciona un cálculo de las señales virtuales usando recursos informáticos que se localizan geográficamente distantes del procedimiento (o máquina) que se monitoriza y/o se controla con las señales virtuales. Un beneficio de esto es que los recursos informáticos para generar las señales virtuales pueden compartirse por una multitud de procedimientos o máquinas, en las que la memoria 620 puede mantener múltiples conjuntos de conjuntos de entrenamiento de datos que caracterizan los diversos procedimientos y máquinas monitorizadas. Otro beneficio es que los resultados de la señal virtual pueden visualizarse y usarse también potencialmente en un análisis adicional por las partes interesadas localizadas a distancia del procedimiento que se está monitorizando.

Los cálculos a realizarse por el procesador de información se describen en detalle a continuación. Usando como un ejemplo una máquina que se producirá en masa que tiene quince parámetros físicos totales de interés, se supone que diez de ellos se instrumentarán con sensores reales que proporcionan señales reales durante la operación de la máquina, y cinco señales serán inferidas a partir de las diez primeras, reduciendo de esta modo el coste para producir la máquina mediante el coste de los sensores de estos cinco parámetros. En lo siguiente, el subíndice "dentro" corresponde en general a los diez sensores reales cuyos valores se introducen en los cálculos, y el subíndice "fuera" corresponde en general a los cinco valores de sensor inferidos que se emiten como salida por el cálculo.

La etapa de proporcionar un conjunto de entrenamiento representativo de acuerdo con la descripción anterior da como resultado una matriz D de valores, que tiene quince filas (correspondientes a los quince parámetros medidos en la prueba o en la configuración de laboratorio) y un número  $n$  suficiente de columnas (conjuntos de lecturas de sensor simultáneas o temporalmente relacionadas) para representar adecuadamente el intervalo de operación completo dinámico esperado de la máquina. La matriz D comprende dos matrices contiguas,  $D_{dentro}$  y  $D_{fuera}$ , teniendo cada una  $n$  columnas:  $D_{dentro}$  tiene diez filas (correspondientes a los diez sensores reales) y  $D_{fuera}$  tiene cinco filas, correspondientes a los cinco sensores inferidos. Mientras que el orden de las columnas no importa en D, la  $i$ -ésima columna tanto en  $D_{dentro}$  como en  $D_{fuera}$  debe corresponderse.

A continuación, usando  $y_{dentro}$  para designar un vector que tiene diez elementos correspondientes a los valores de los diez sensores reales (preferiblemente en tiempo real), se genera un vector  $y_{fuera}$  que tiene cinco elementos correspondientes a los cinco valores de sensor inferidos, de acuerdo con:

$$\vec{y}_{fuera} = \vec{D}_{fuera} \cdot \vec{W}$$

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

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

$$\vec{w} = \left( \overline{D}_{dentro}^T \otimes \overline{D}_{dentro} \right)^{-1} \cdot \left( \overline{D}_{dentro}^T \otimes \vec{y}_{dentro} \right)$$

donde  $\otimes$  representa una operación de similitud entre los dos operandos descritos en mayor detalle a continuación lo que produce una matriz. El superíndice “T” en el presente documento representa la transpuesta de la matriz, y el superíndice “-1” representa la inversa de la matriz o la matriz resultante. Es importante destacar que debe haber correspondencia de fila a los mismos sensores para las filas en  $D_{dentro}$  e  $y_{dentro}$ , y para  $D_{fuera}$  e  $y_{fuera}$ . Es decir, si la primera fila de la matriz  $D_{dentro}$  del conjunto de entrenamiento representativo corresponde a los valores de un primer sensor en la máquina, el primer elemento de  $y_{dentro}$  también debe ser el valor actual (si funciona en tiempo real) de ese mismo primer sensor.

Volviendo a la figura 7, se muestra la generación de una o más señales de sustitución o inferidas en un diagrama de flujo. El diagrama de flujo muestra la generación de una señal de sustitución o inferida en las realizaciones descritas, que proporciona una entrada de una instantánea de los valores de sensor reales en operación en tiempo real. La matriz  $D_{dentro}$  se proporciona en la etapa 705, junto con el vector de instantánea de entrada  $y_{dentro}$  y una matriz A para los cálculos. Se inicializa un contador  $i$  a uno en la etapa 708, y se usa para contar el número de observaciones en la matriz  $D_{dentro}$  de entrenamiento. En la etapa 712, se inicializa otro contador  $k$  a uno (usado para contar a través del número de sensores en una instantánea y observación), y se inicializa la matriz A para contener ceros para los elementos.

En la etapa 715, se realiza la operación de similitud de elemento a elemento entre el elemento  $k$ -ésimo de  $y_{dentro}$  y el elemento ( $i$ -ésimo,  $k$ -ésimo) en  $D_{dentro}$ . Estos elementos se corresponden con valores de sensor, uno de entrada real, y uno de una observación en el historial  $D_{dentro}$  de entrenamiento. La operación de similitud devuelve una medida de similitud de los dos valores, en general un valor entre cero (no similitud) y uno (idéntico) que se asigna a la variable  $r$  temporal. En la etapa 720, se añade  $r$  dividida por el número de sensores M al  $i$ -ésimo valor en la matriz A de una dimensión. Por lo tanto, el  $i$ -ésimo elemento en A mantiene la similitud media de las similitudes elementales de  $y_{dentro}$  para la  $i$ -ésima observación en  $D_{dentro}$ . En la etapa 724, se incrementa el contador  $k$ .

En la etapa 729, si todos los sensores en una observación particular en  $D_{dentro}$  se han comparado con los elementos correspondientes de  $y_{dentro}$ , entonces,  $k$  ahora será más grande que M, e  $i$  puede incrementarse en la etapa 731. Si no es así, entonces el siguiente elemento en  $y_{dentro}$  se compara por similitud con su elemento correspondiente en  $D_{dentro}$ .

Cuando todos los elementos de la instantánea  $y_{dentro}$  real actual se han comparado con todos los elementos de una observación en  $D_{dentro}$ , se realiza una prueba en la etapa 735 si esta es la última de las observaciones en  $D_{dentro}$ . Si es así, entonces el contador  $i$  es ahora mayor que el número de observaciones N en  $D_{dentro}$ , y el procesamiento pasa a la etapa 738. De lo contrario, pasa de nuevo a la etapa 712, en la que la matriz A se reinicia a ceros, y el contador  $k$  de elemento (sensor) se reinicia a uno. En la etapa 738, se calcula un vector de ponderación W-estimulo a partir de la ecuación mostrada en la misma, donde  $\otimes$  representa una operación de similitud, normalmente el mismo operador de similitud que el que se usa en la etapa 715. En la etapa 743, W-estimulo se normaliza usando una suma de todos los elementos de ponderación en W-estimulo, lo que mejora los efectos en las etapas posteriores de cualquier elemento especialmente grande en W-estimulo, produciendo un vector W de ponderación normalizado. En la etapa 746, esto se usa para producir la salida  $y_{fuera}$  de sustitución o inferencial usando  $D_{fuera}$ . El vector de salida puede tener solo un elemento, en el caso de que se esté generando solo una señal de sustitución o inferencial, o puede tener múltiples elementos, que se corresponden con cada sensor “virtual” que se está generando. La matriz  $D_{fuera}$  se ha descrito anteriormente como que contiene los datos de entrenamiento de contrapartida del sensor(s) que se está generando.

La operación de similitud puede seleccionarse a partir de una variedad de operadores conocidos que producen una medida de la proximidad de similitud o numérica de las filas del primer operando a las columnas del segundo operando. El resultado de la operación es una matriz en la que el elemento de la  $i$ -ésima fila y de la  $j$ -ésima columna se determina a partir 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 semejanza de estos dos vectores. En la realización descrita, la  $i$ -ésima fila del primer operando tiene, en general, elementos que corresponden a los valores de sensor para un estado relacionado temporal dado de la 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 para cada vector de estado en el otro operando.

A modo de ejemplo, un operador de similitud que puede usarse compara los dos vectores (la *i*-ésima fila y la *j*-ésima columna) en una base de elemento por elemento. Solamente los elementos correspondientes se comparan, por ejemplo, el elemento (*i*, *m*) con el elemento (*j*, *m*), pero no el elemento (*i*, *m*) con el elemento (*j*, *n*). Para cada tal comparación, la similitud es igual al valor absoluto del menor 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 desiguales, la similitud 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 similitudes elementales. Una combinación estadística diferente de las similitudes elementales puede usarse también en lugar del promedio, por ejemplo, la mediana.

Otro ejemplo de un operador de similitud que puede usarse puede entenderse con referencia a la figura 8. Con respecto a este operador de similitud, las enseñanzas de la patente de Estados Unidos N° 5.987.399 de Wegerich y col. son relevantes, y se incorporan en su totalidad como referencia. Para cada sensor o parámetro físico, se forma un triángulo 804 para determinar la similitud entre dos valores de ese sensor o parámetro. La base 807 del triángulo se establece en una longitud igual a la diferencia entre el valor 812 mínimo observado para ese sensor en todo el conjunto de entrenamiento, y el valor 815 máximo observado para ese sensor a través de todo el conjunto de entrenamiento. Un ángulo  $\Omega$  se forma por encima de esa base 807 para crear el triángulo 804. La similitud entre cualquiera de los dos elementos en una operación de vector a vector se encuentra, a continuación, trazando las localizaciones de los valores de los dos elementos, representados como  $X_0$  y  $X_1$  en la figura, a lo largo de la base 807, usando en un extremo el valor del mínimo 812 y en el otro extremo el valor del máximo 815 para escalar la base 807. Los segmentos 821 y 825 de línea se arrastran a las localizaciones de  $X_0$  y  $X_1$  en la base 807 formando un ángulo  $\theta$ . La relación del ángulo  $\theta$  con el ángulo  $\Omega$  da una medida de la diferencia entre  $X_0$  y  $X_1$  en el intervalo de valores en el conjunto de entrenamiento para el sensor en cuestión. Restando esta relación, o alguna versión algorítmicamente modificada de la misma, del valor de uno produce un número entre cero y uno que es la medida de la similitud de  $X_0$  y  $X_1$ .

Cualquier tamaño de ángulo menor que 180 grados y cualquier localización del ángulo por encima de la base 807 puede seleccionarse con el fin de crear una similitud, pero cualquiera de los que se elijan deben usarse para todas las mediciones de similitud correspondientes para un sensor específico y un parámetro físico del procedimiento o máquina. Por lo tanto, pueden usarse triángulos 804 de diferentes formas para diferentes sensores. Un procedimiento de seleccionar la forma general del triángulo es comprobar empíricamente qué forma da como resultado de manera más consistente los resultados de señal virtual más precisos.

Para eficiencia de cálculo, el ángulo  $\Omega$  puede hacerse un ángulo recto (no representado en la figura). Designando el segmento 831 de línea como una altura  $h$  del ángulo  $\Omega$  por encima de la base 807, entonces el ángulo  $\theta$  para una similitud de elemento a elemento dada para el 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 similitud elemental es:

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

Como se ha indicado anteriormente, las similitudes elementales pueden promediarse estadísticamente o de otro modo tratarse estadísticamente para generar una similitud general de una instantánea a otra instantánea, como si se solicitase por el sistema.

Sin embargo, otra clase de operador de similitud que puede usarse en las realizaciones descritas implica describir la proximidad de un vector de estado a otro vector de estado en un *n*-espacio, en el que *n* es la dimensionalidad del vector de estado de la instantánea actual del procedimiento o máquina monitorizada. Si la proximidad es relativamente estrecha, la similitud de los dos vectores de estado es alta, mientras que si la proximidad es distante o grande, la similitud disminuye, en última instancia, infinitamente. A modo de ejemplo, puede usarse la distancia euclidiana entre dos vectores de estado para determinar la similitud. En un procedimiento instrumentado, por ejemplo, con 20 sensores en el que se infiere beneficiosamente un parámetro veintiuno no instrumentado, la distancia euclidiana entre la instantánea monitorizada actualmente, que comprende un vector de estado de elemento 20, y cada vector de estado en el conjunto de entrenamiento (que comprende un vector de elemento 20 en el que el elemento 21 corresponde al sensor virtual que se ha dejado fuera) proporciona una medida de similitud, como se muestra:

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

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

5 Volviendo a la figura 9, se representa la lógica de decisión para un procedimiento de comprobación de sensores fallidos y de generación de señales de sustitución en respuesta al mismo de acuerdo con la invención. Tal procedimiento puede realizarse en un procesador y una memoria como será conocido por los expertos en la materia, para proporcionar un sistema para monitorizar una máquina o procedimiento en tiempo real y generar una o más señales virtuales de sustitución cuando se necesiten en respuesta a un fallo detectado de un sensor en la máquina o procedimiento. En la etapa 903, un INDICADOR variable se inicializa a cero, y un contador  $t$  de instantáneas también se inicializa a cero. En el primer bucle a través del procedimiento, si  $t$  es cero en la etapa 906, entonces, el entrenamiento inicial se realiza en la etapa 908. Un conjunto 912 de entrenamiento depurado en la realización descrita proporciona una matriz de entrenamiento de instantáneas 917. En la etapa 908, las matrices  $D_{dentro}$  y  $D_{fuera}$  se configuran igual a la matriz D de 917, el INDICADOR se configura a cero,  $t$  se configura a 1 y una matriz  $G_0$  intermedia se encuentra por:

$$15 \quad G_0^{-1} = (D_{dentro}^T \otimes D_{dentro})^{-1}$$

usando la operación de similitud.

Una monitorización en tiempo real o en línea de la máquina o procedimiento que adquiere los datos 920 de sensor reales procede a continuación en la etapa 922, en la que una instantánea  $X_t$  de los datos correlacionados en tiempo o coincidentes se adquiere a partir de los sensores en la máquina o procedimiento. Los datos adquiridos se usan para calcular los valores estimados de todos los sensores de acuerdo con:

$$20 \quad \hat{X}_t = D_{fuera} \cdot G_t^{-1} \cdot (D_{dentro}^T \otimes X_t)$$

Tal estimación de todos los sensores tiene utilidad como se conoce en la técnica anterior, tal como Gross y col. mencionado anteriormente, para comparar con los valores de sensor reales y detectar cuándo se está produciendo un cambio de procedimiento. Como puede discernirse fácilmente en esta figura, si no han fallado los sensores en la máquina o procedimiento monitorizado, entonces las matrices  $D_{fuera}$  y  $D_{dentro}(0)$  son equivalentes.

25 Un motor de decisión en la etapa 926 examina si ha fallado algún sensor. Puede usarse cualquiera de una variedad de técnicas conocidas en la técnica anterior para detectar un sensor fallido, y puede trabajar examinando solo los datos monitorizados originales o comparando los datos monitorizados con los datos estimados. A modo de ejemplo, una técnica para determinar si un sensor ha fallado es monitorizar si la lectura del sensor se ha congelado en un solo valor a lo largo de una secuencia de lecturas en las que debería haber cambiado. Como otro ejemplo, un sensor fallido puede determinarse cuando una lectura de sensor sufre una discontinuidad brusca o cae a cero, especialmente, cuando el parámetro físico que se mide por el sensor no puede ser posiblemente cero. Además, ciertos sensores "inteligentes" están comercialmente disponibles de manera que proporcionan una indicación de que han fallado. En la etapa 930, si uno o más sensores han fallado, se indica en la etapa 933, y el indicador variable se configura en uno. Si se determina que los sensores no han fallado, entonces el procedimiento continúa en la etapa 30 35 906.

Volviendo a la etapa 906,  $t$  es ahora distinto de cero, después de haberse configurado a uno en la etapa 908. El contador  $t$  se incrementa en la etapa 937, lo que corresponde a una lectura de la siguiente instantánea de los datos de sensor auténticos. Tras comprobar el estado del INDICADOR en la etapa 940, si el INDICADOR sigue siendo cero (ningún sensor ha fallado desde el último bucle a través del procedimiento), entonces  $D_{dentro}$  y G siguen siendo los mismos en la etapa 945, y se adquiere y se procesa la siguiente instantánea continuando de nuevo con la etapa 922. Si, por otra parte, el INDICADOR se ha configurado a uno en la etapa 933 como se ha comprobado en la etapa 940, entonces las matrices  $D_{dentro}$  y G deben recalcularse en la etapa 950. Las filas correspondientes a los sensores fallidos se eliminan de  $D_{dentro}$  (estas no se eliminan de  $D_{fuera}$ ). La matriz G se recalcula en base a la nueva  $D_{dentro}$ . El INDICADOR se reinicia a cero. A continuación, en la etapa 922, como se adquiere la instantánea del procedimiento o máquina monitorizada, los elementos del vector X de entrada correspondiente a los mismos sensores fallidos se eliminan. Sin embargo, ya que no se ha eliminado ninguna fila de  $D_{fuera}$ , la estimación de X generada en la etapa 922 incluye las estimaciones de las filas perdidas, es decir, los sensores fallidos. Por lo tanto, estas estimaciones son los valores de sensor virtuales calculados como los valores de sustitución para los sensores fallidos.

Por lo tanto, la realización proporciona de manera ventajosa la capacidad de generar señales de sustitución sobre la marcha para sensores fallidos en los sistemas de monitorización que emplean una operación de similitud para calcular las estimaciones para la comparación con datos reales. Tal señal de sustitución puede proporcionarse para el procesamiento corriente abajo que requiere una señal de sensor del sensor(s) fallido. Por consiguiente, una señal de sensor compleja puede descomponerse en múltiples entradas correlacionadas para proporcionar una medida inferencial de un parámetro físico no instrumentado de un sistema.

Volviendo a la figura 10, se muestra una realización 100 de bomba hidráulica en la que un motor 102 diésel acciona un eje 104 del sistema 100 hidráulico, que acciona un pistón 106 en un cilindro 108 para controlar el suministro hidráulico que se proporciona por una válvula 110 direccional de cuatro vías. En la realización descrita, se proporciona un ciclo de ocho etapas al sistema hidráulico para facilitar las tasas de flujo variables. El sistema 100 está equipado con un acelerómetro 112, localizado preferentemente con el fin de observar vibraciones longitudinales con los desplazamientos variables de los cilindros de bomba asociados con los pistones 106 alternativos en el mismo. La introducción de contaminantes en el bucle hidráulico, tales como partículas y granos metálicos o similares, el desgaste de la válvula y el pistón del sistema, provocan cambios en la presión hidráulica. Esto da como resultado cambios en las vibraciones de la bomba, en tanto que pueden compensar la pérdida de presión.

El parámetro deseablemente estimado con una señal virtual en conexión con el sistema 100 hidráulico puede ser la presión o el flujo proporcionado por el sistema. Un transductor de presión invasiva en la línea hidráulica, sin embargo, puede ser obstructivo y susceptible al fallo. En consecuencia, se usa deseablemente en su lugar el acelerómetro 112 para facilitar las lecturas de presión virtuales correlacionadas con el acelerómetro 112. Esto se logra emitiendo como salida la señal compleja del acelerómetro 112 a un analizador 114 de espectro de potencia, que puede incorporarse en un ordenador que ejecuta un módulo de soporte lógico, con un dispositivo de adquisición de datos unido al acelerómetro 112. La densidad espectral de potencia (PSD) emitida por el analizador 114 proporciona la potencia de la vibración medida por el acelerómetro como una función de la frecuencia de esa vibración, usando una ventana deslizante de transformada rápida de Fourier (FFT) de muestra 1024 que prevé periodos de frecuencia que pueden seleccionarse por el usuario, por ejemplo, 30 periodos de frecuencia sobre el espectro de potencia que se proporcionan como un vector de observación de entrada para los cálculos de similitud como se ha tratado anteriormente. Por consiguiente, los componentes de frecuencia asociados con los periodos seleccionables por el usuario proporcionan múltiples observaciones de entrada. La PSD puede usarse como una entrada multivariable para el generador de señal inferencial. El parámetro físico no instrumentado de presión hidráulica, o el flujo como se desee, es la señal inferida. Las entradas de la PSD son las señales reales. Estas entradas pueden seleccionarse de las varias alternativas siguientes.

En la primera alternativa, las frecuencias seleccionadas solo pueden usarse como entradas. Por ejemplo, con algún conocimiento de las frecuencias de vibración que puedan ser de interés en el sistema 100 hidráulico, pueden seleccionarse varias frecuencias, y el valor de la potencia en cada una de estas frecuencias puede usarse como una entrada de "sensor".

En otra alternativa, las frecuencias pueden "categorizarse" o contarse a través de varias bandas de frecuencias. En este caso, el valor (o señal de "sensor") para una banda o periodo determinado de frecuencias puede ser uno de los valores de potencia más alto en el periodo, el valor de potencia más bajo en el periodo, el valor de potencia promedio a través del periodo, o el valor de potencia media en el periodo. Otras variaciones trabajarían y estarían también claramente dentro del ámbito y el espíritu de la invención.

Por lo tanto, las realizaciones descritas proporcionan el beneficio de trabajar con señales complejas descompuestas como entradas para inferir en un parámetro físico no instrumentado. En una realización ejemplar, se recogieron datos de un acondicionador de aire de habitación convencional montado en una ventana que funciona a través de una variedad de condiciones esperadas en una habitación grande que sirve como un disipador térmico. Se usaron las salidas de un total de 23 sensores y se representaron las mediciones de los gradientes de temperatura a través del evaporador y el condensador. Los datos se adquirieron de termopares de tipo k que se digitalizaron usando una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) con una configuración de tasa de muestreo de 100 muestras/s. Los datos se recogieron mientras el acondicionador de aire mantenía el entorno de la habitación a una temperatura relativamente constante. Los datos se depuraron para un conjunto de entrenamiento de acuerdo con los procedimientos descritos en el presente documento. Un gran número de instantáneas de entrenamiento (92, cuatro veces el número de variables de sensor), en relación con el número de sensores, se emplearon para desarrollar el modelo empírico del acondicionador de aire en operación.

Para medir la fidelidad del modelo empírico, se estimaron un total de 600 observaciones operativas elegidas aleatoriamente usando el modelo desarrollado a partir del entrenamiento. Para cada una de tales observaciones, se introdujo una instantánea de los 23 sensores en el modelo, que generaron entonces una salida de 23 estimaciones para esos mismos sensores. Se definió un error de estimación de modelado de referencia como la relación del promedio del valor cuadrático medio (RMS) del residual (la diferencia entre el valor de sensor estimado y real) con la desviación convencional del ruido en el valor real del sensor. Cuando estaban disponibles los 23 sensores como entrada del modelo, el error de estimación fue de 0,271. Esta es una fracción del ruido promedio en los sensores.

La eficacia de las señales de sensor virtuales aleatorias precisas se accede mediante un sensor después de otro

- 5 que se selecciona de manera aleatoria con un valor configurado a cero, simulando fallos del sensor. Fallaron un máximo de 12 sensores, correspondiente a una pérdida del 52 % de los sensores originalmente disponibles. Se muestra un error de estimación como se ha descrito anteriormente en la tabla siguiente para un número creciente de sensores fallidos como un promedio a través de todos los sensores. Como sería de esperar, el error de estimación aumentó a medida que aumentó el número de sensores fallidos. Sin embargo, es notable que el error de estimación a través de todos los sensores permanezca relativamente bajo, lo que indica que las estimaciones de sensor tanto para los sensores que no “fallaron” como incluso para los sensores que “fallaron” fueron útilmente exactas.

Número de sensores fallidos	Promedio RMS de estimación de errores
0	0,2706
1	0,2763
2	0,2915
3	0,3096
4	0,3141
5	0,3237
6	0,3402
7	0,3523
8	0,3791
9	0,4014
10	0,4095
11	0,4348
12	0,4649

- 10 Volviendo a la figura 11, se muestra una gráfica de una señal de sensor virtual generada por el acondicionador de aire después de fallar el sensor original y otros dos, y que se excluyen como entradas para el modelo empírico. También se muestra el valor real del sensor original. La abscisa de la gráfica es el tiempo en minutos. La ordenada es el valor del sensor, una temperatura. Como puede verse, cuando el sensor se trata como fallido (así como los otros dos en el conjunto de 23), y no se proporciona al modelo empírico, el modelo genera no obstante una estimación viable y usable del valor de sensor, en base a los otros valores de sensor proporcionados como entrada.
- 15 Se apreciará por los expertos en la materia que las modificaciones a las realizaciones preferidas anteriores pueden hacerse en diversos aspectos. La presente invención se expone con detalle en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un sistema de monitorización de equipos instrumentados, que comprende:

una pluralidad de sensores (430; 523; 606) capaces de ser monitorizados desde el equipo instrumentado;

un procesador (545; 618) de información;

5 una entrada de adquisición de datos para dicho procesador (545; 613) de información para recibir valores operativos descriptivos de los parámetros físicos del sistema a partir de dicha pluralidad de sensores (430; 523; 606);

10 una memoria (551; 620) que puede operar para ser acoplada con dicha entrada de adquisición de datos para almacenar un conjunto de datos de sensor correlacionados en el tiempo representativos de los estados operativos esperados, y las señales observadas durante la operación del equipo instrumentado;

en el que dicho procesador (545; 618) de información está adaptado para generar al menos un valor de salida virtual descriptivo de un parámetro del equipo instrumentado, en el que el parámetro no está representado por los valores operativos recibidos,

**caracterizado porque**

15 dicho procesador (545; 618) de información está adaptado además para generar el al menos un valor de salida virtual en base a un operador de similitud para obtener una medida de similitud entre los estados operativos esperados y los valores operativos recibidos,

20 en el que el operador de similitud se refiere a un cálculo que compara al menos uno de los valores operativos recibidos con un valor que representa un estado esperado del sistema para obtener una medida de similitud y en el que la medida de similitud es un valor dentro de un intervalo donde un extremo del intervalo significa que los valores comparados no tienen similitud y el otro extremo del intervalo significa que los valores comparados son idénticos, y

en el que dicho procesador (545; 618) de información determina un fallo de adquisición de datos asociado con dicha entrada de adquisición de datos a partir de al menos uno de dicha pluralidad de sensores (430; 523; 606) y proporciona una señal de sustitución estimada para el mismo.

25 2. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicho procesador (545; 618) de información está adaptado además para usar un operador de similitud con los datos de dicha memoria (551; 620) que comprende una pluralidad de instantáneas de los estados operativos descriptivos de los parámetros físicos del sistema a partir de dicha pluralidad de sensores, comprendiendo cada instantánea los datos correlacionados en el tiempo a partir de dicha pluralidad de sensores (430; 523; 606).

30 3. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que la proximidad numérica de un conjunto de los valores de observación a un estado operativo esperado se determina por dicho procesador (545; 618) de información promediando sobre todos los valores de observación en el conjunto una similitud elemental para cada valor de observación con un valor correspondiente en una instantánea para el estado operativo esperado, y en el que cada una de dichas similitudes elementales se normaliza por el intervalo esperado para cada valor de observación respectivo.

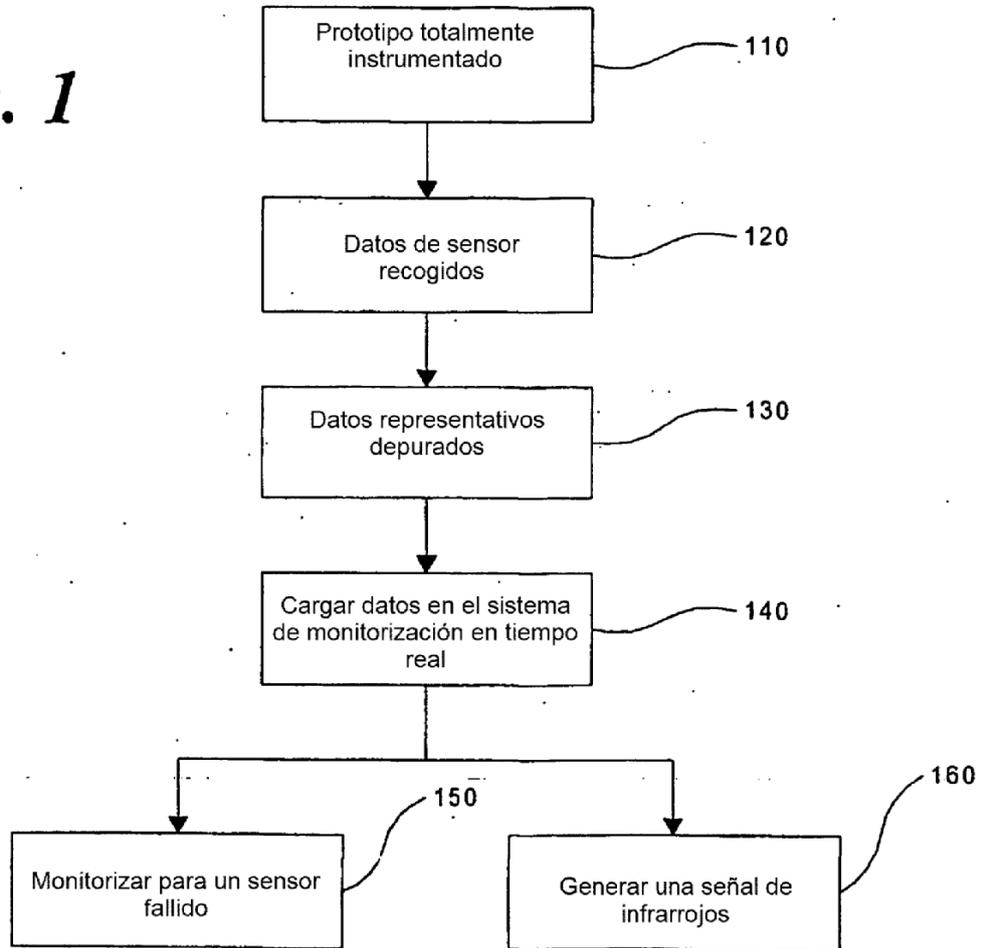
40 4. El sistema de acuerdo con una de las reivindicaciones 1-3, en el que dicha memoria (551; 620) almacena una primera matriz modelo derivada de dicho conjunto de datos de sensor correlacionados en el tiempo representativos de los estados de operación esperados, y cuando dicho procesador (545; 618) de información determina que se ha producido un fallo de adquisición de datos con respecto a al menos uno de dicha pluralidad de sensores (430; 523; 606), dicho procesador de información se dispone para generar una segunda matriz modelo derivada de dicho conjunto de datos de sensor correlacionados en el tiempo exclusivos de cualquier sensor asociado con dicho fallo de adquisición de datos.

45 5. El sistema de acuerdo con la reivindicación 4, en el que dicha primera matriz modelo comprende unos valores de similitud a partir de todas las comparaciones por pares de instantáneas de todos los conjuntos de datos de sensor correlacionados en el tiempo, y dicha segunda matriz modelo comprende unos valores de similitud a partir de todas las comparaciones por pares de instantáneas de conjuntos de datos de sensor correlacionados en el tiempo excluyendo aquellos sensores asociados con dicho fallo de adquisición de datos.

6. El sistema de acuerdo con una de las reivindicaciones 1-5, en el que el al menos un valor de salida virtual representa un parámetro que no es medido por los sensores.

50 7. El sistema de acuerdo con una de las reivindicaciones 1-6, en el que el al menos un valor de salida virtual representa un parámetro que es medido por un sensor cuando los datos de sensor son fallidos.

*Fig. 1*



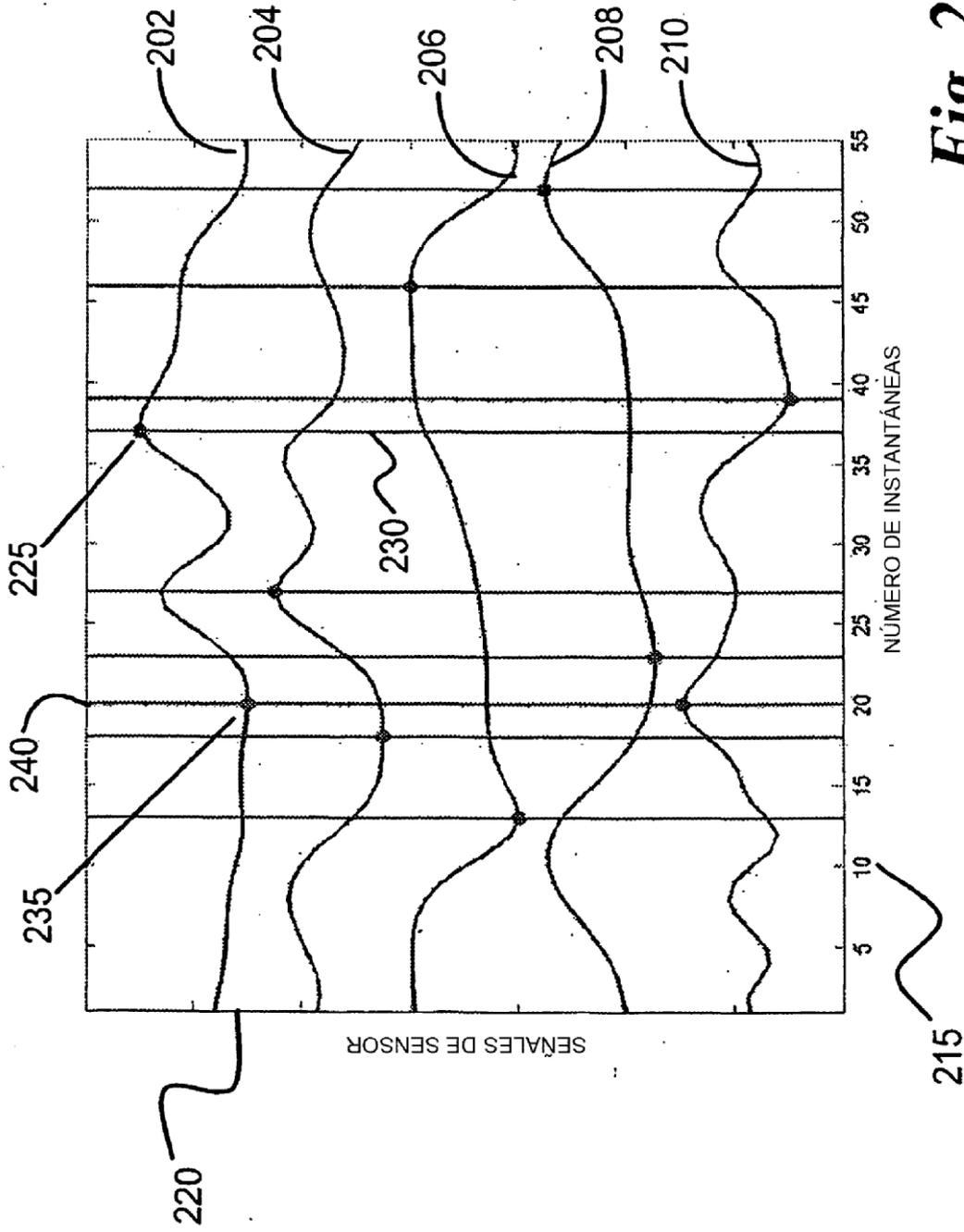
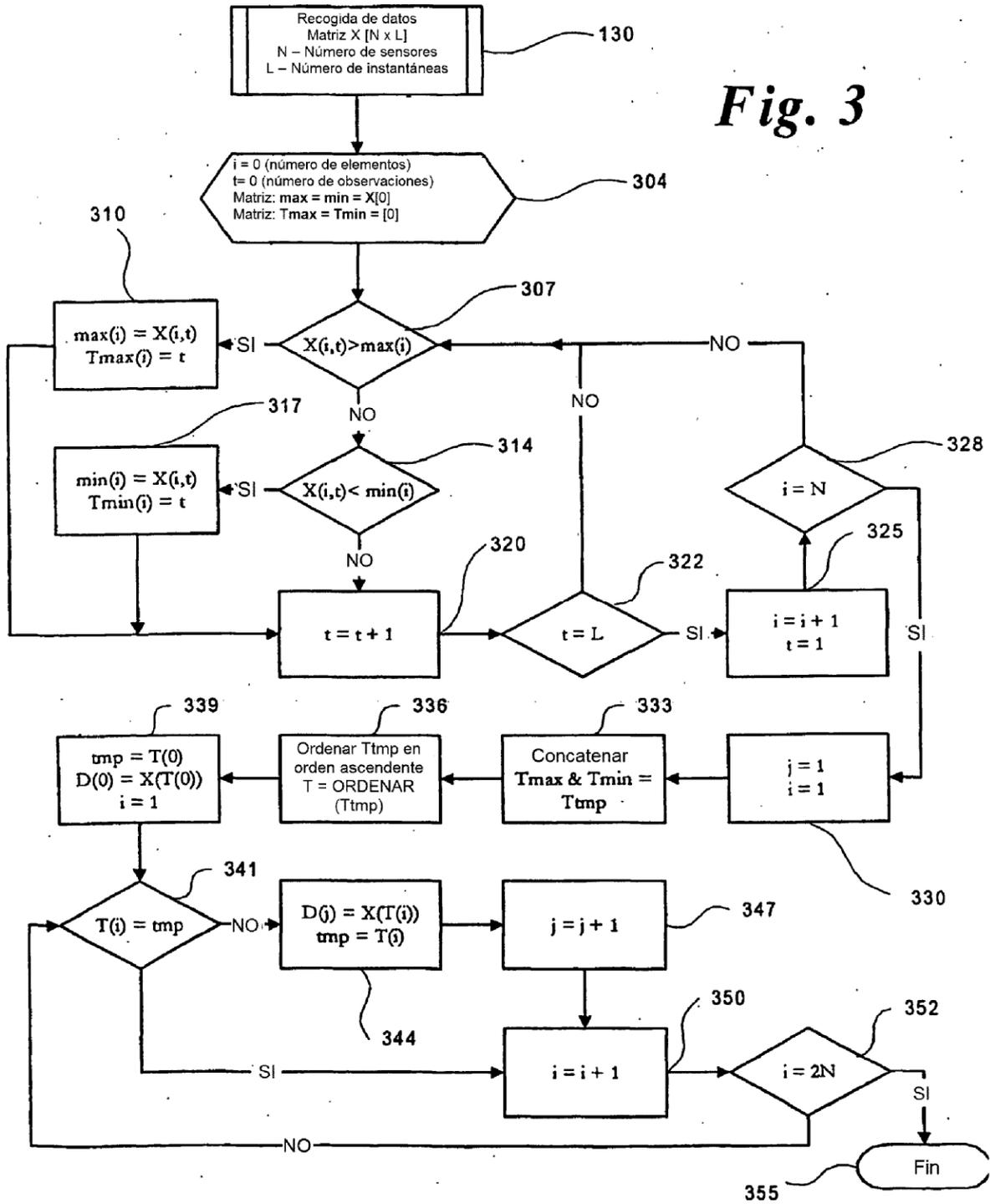
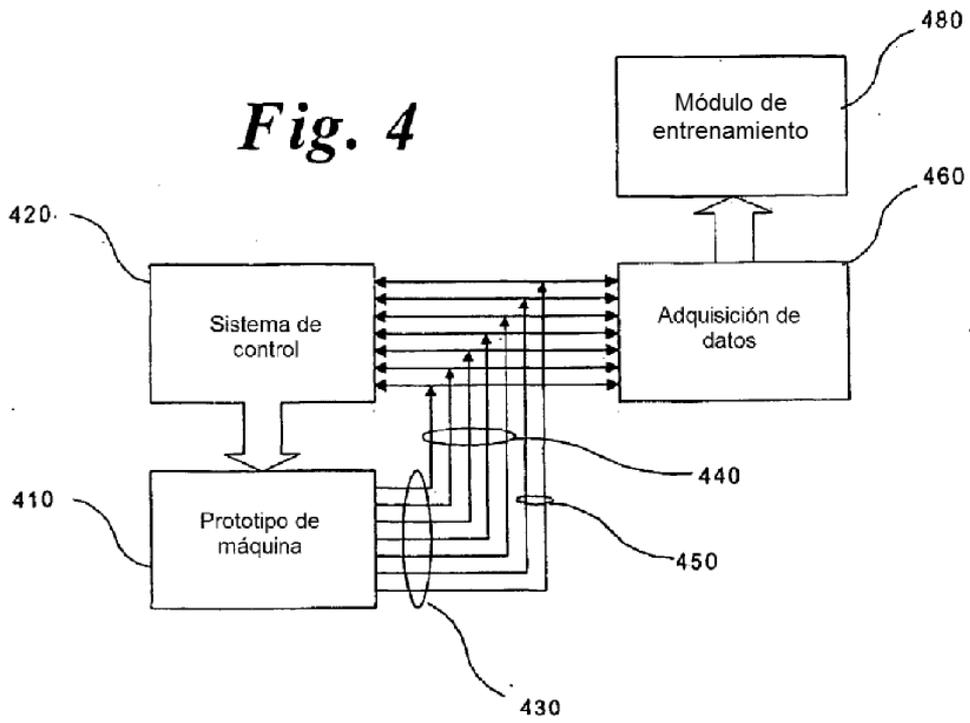


Fig. 2

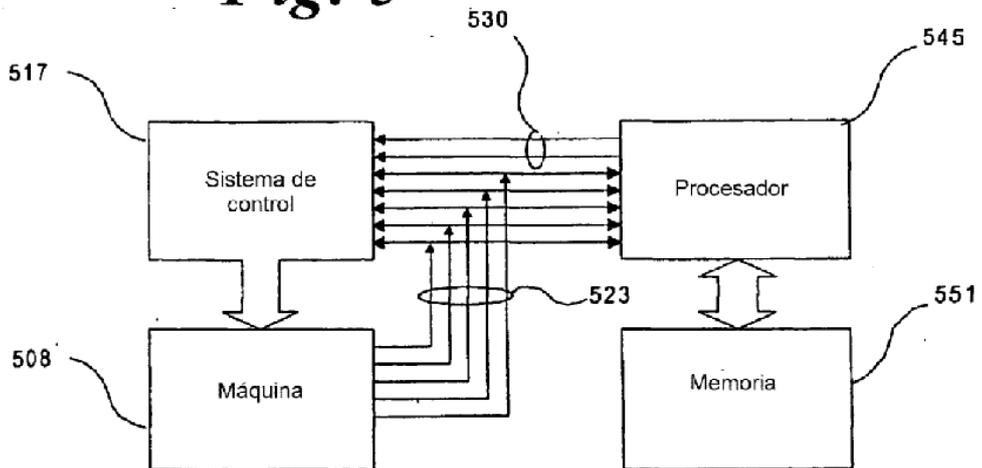
*Fig. 3*

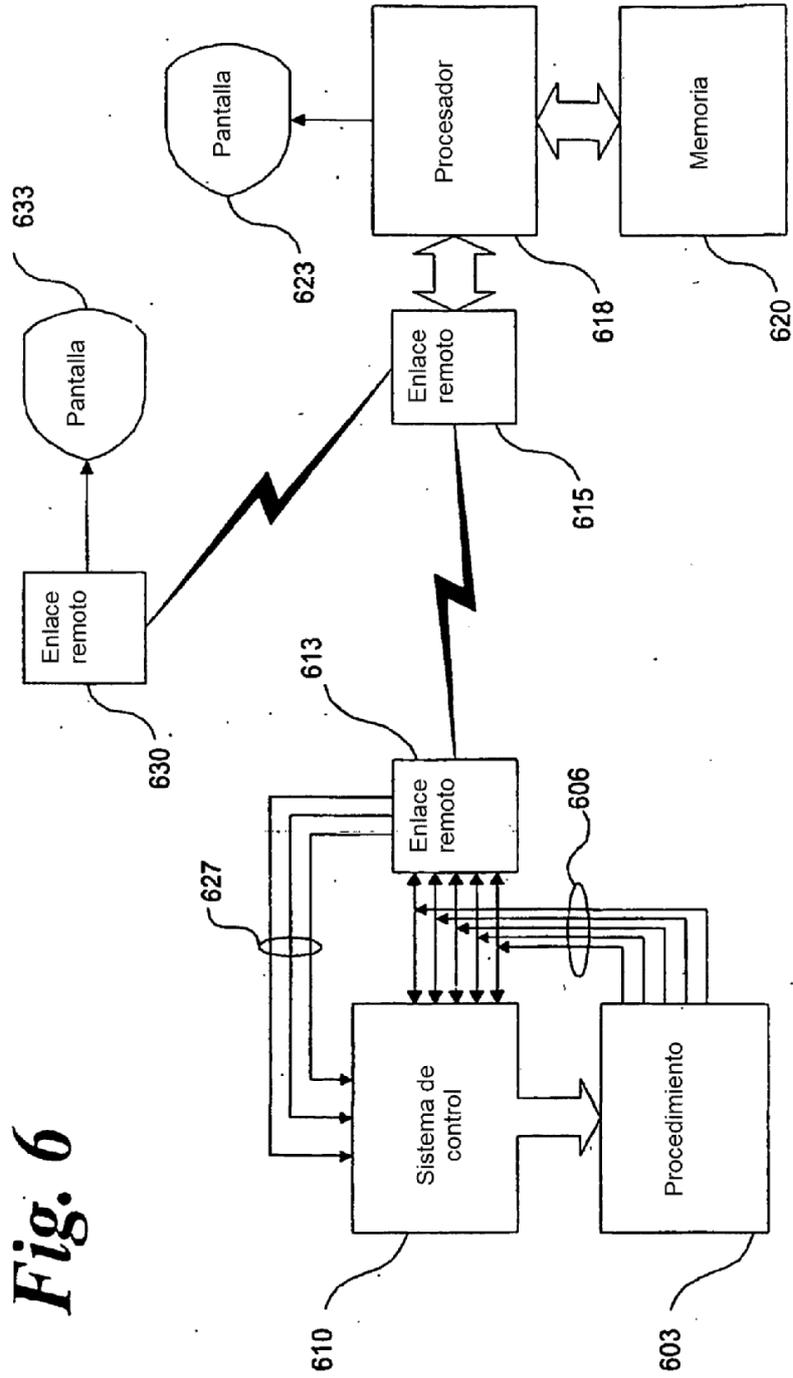


**Fig. 4**



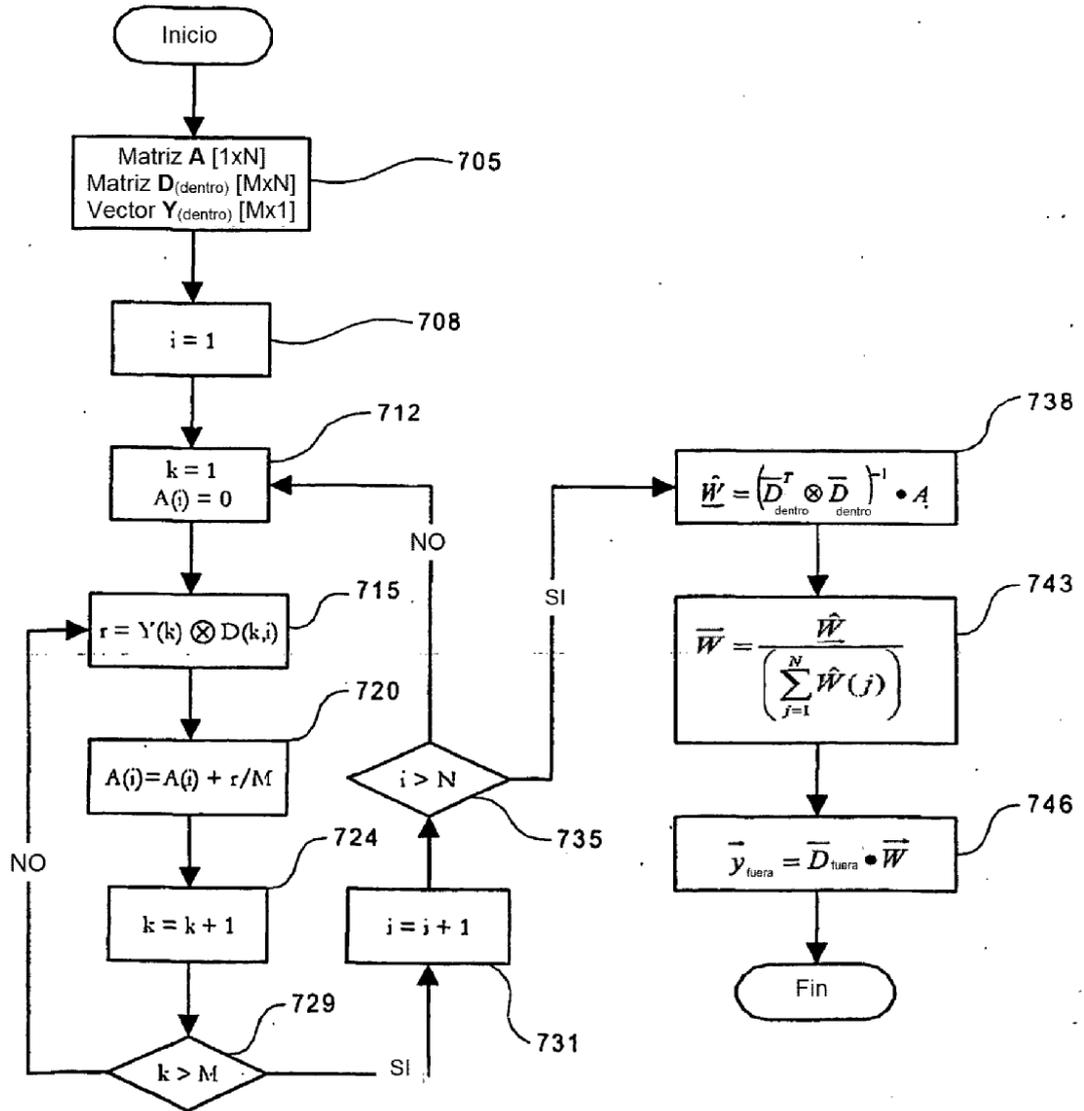
**Fig. 5**





**Fig. 6**

**Fig. 7**



*Fig. 8*

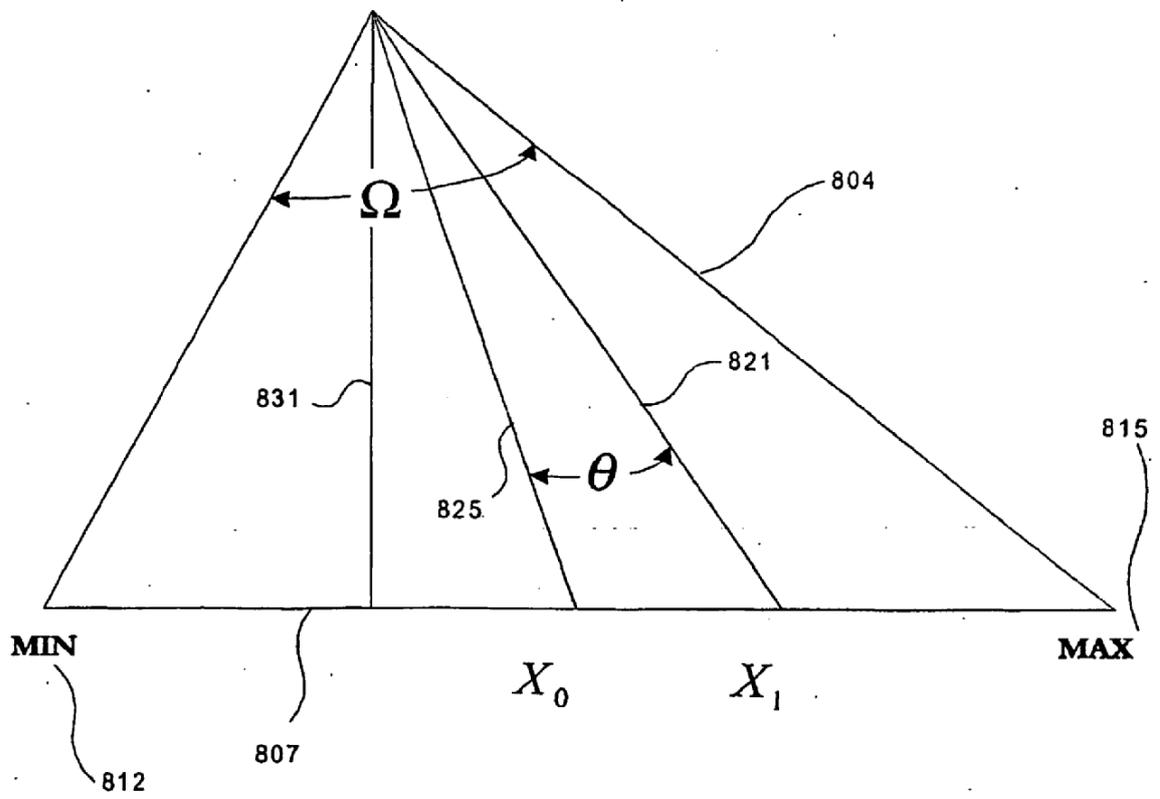
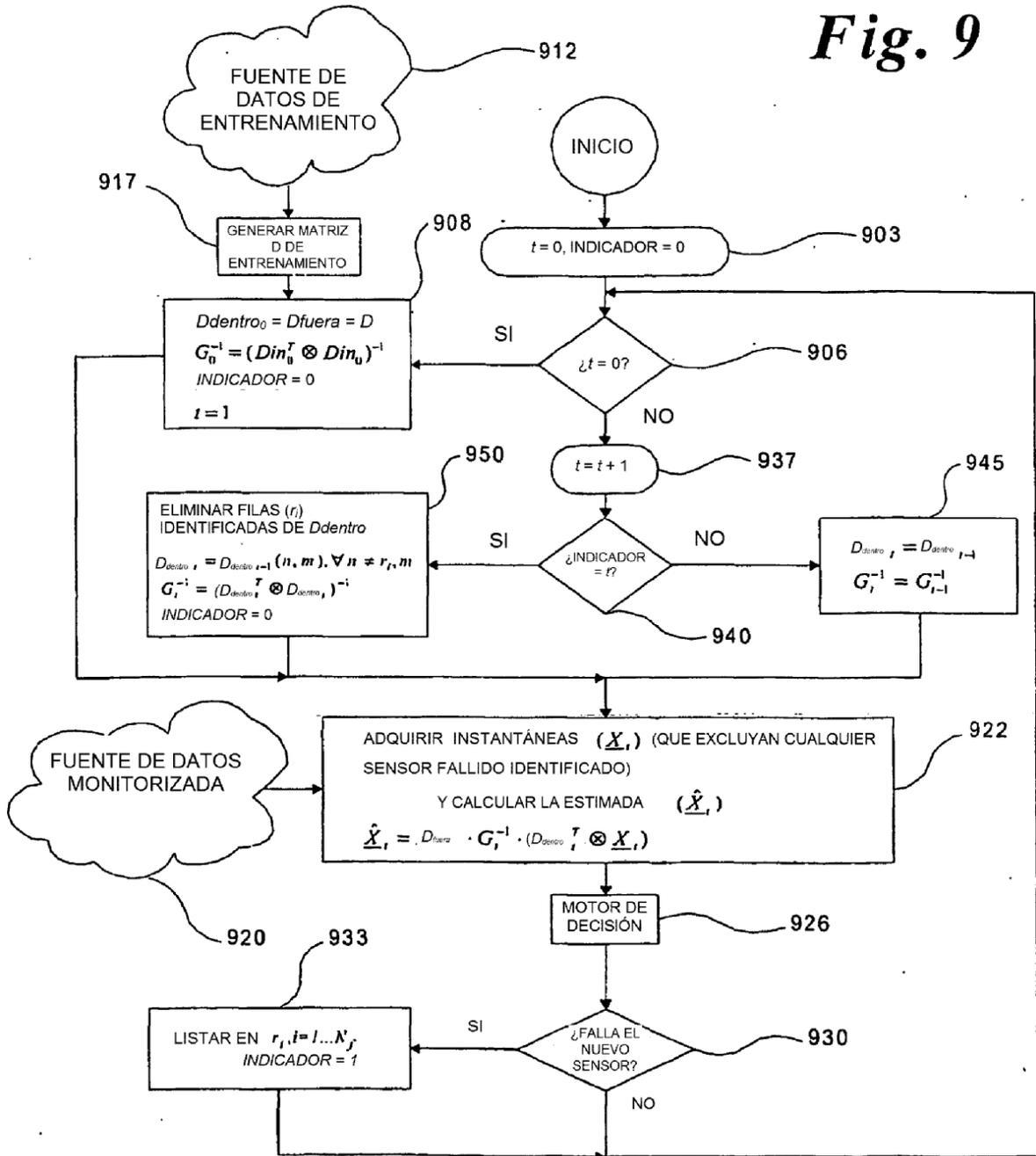


Fig. 9



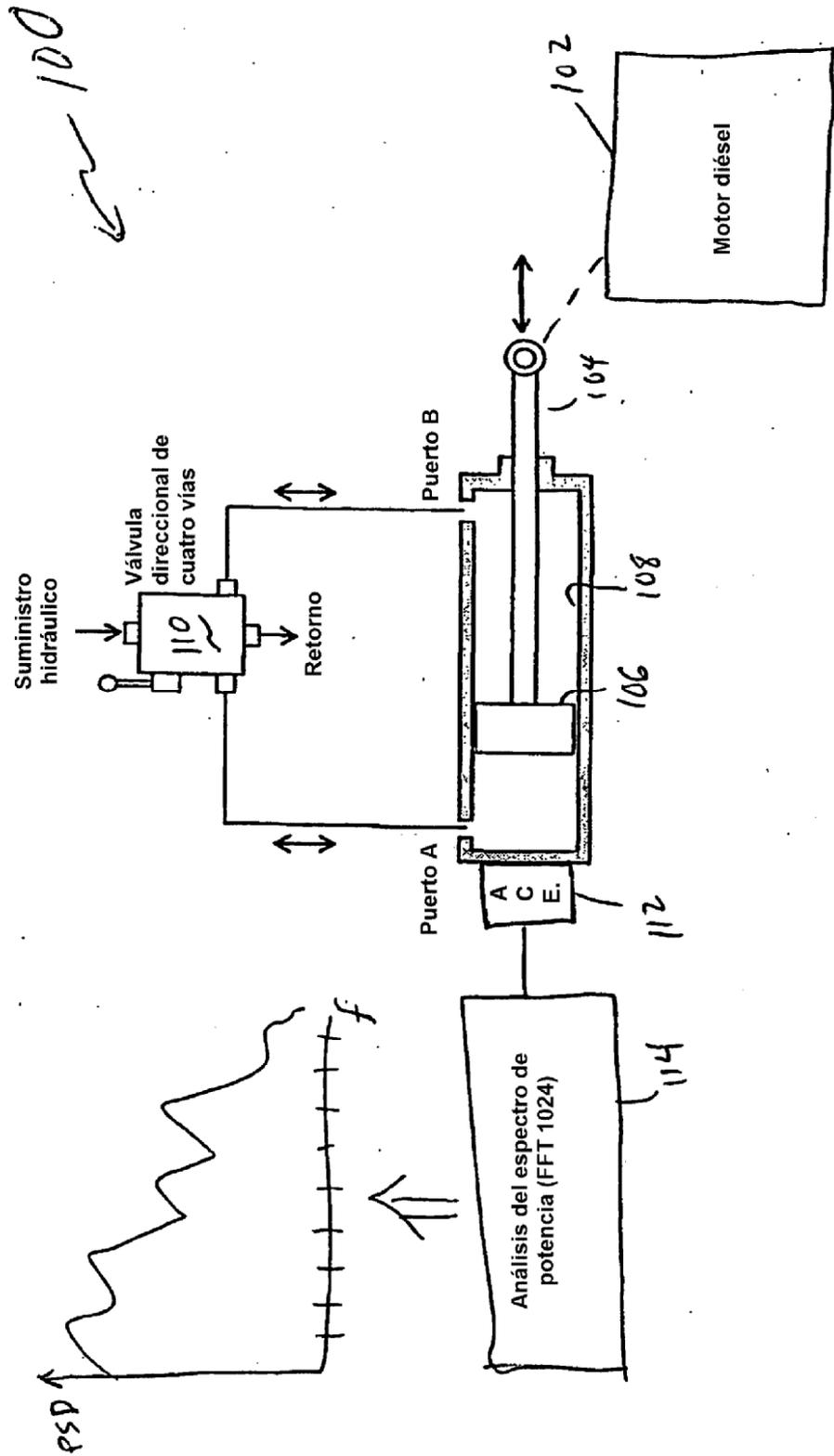


Fig. 10

**Fig. 11**

