

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 015 090**

51 Int. Cl.:

**G05B 23/02**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.01.2023** **E 23152059 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.01.2025** **EP 4404014**

54 Título: **Supervisión de vibraciones para la detección de fallos en la automatización de procesos**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la  
traducción de la patente:  
**29.04.2025**

73 Titular/es:

**IFM ELECTRONIC GMBH (100.00%)**  
**Friedrichstrasse 1**  
**45128 Essen, DE**

72 Inventor/es:

**AJOUZ, ALI;**  
**KLEMM, MATTHIAS;**  
**BOGUNIA, LUKAS;**  
**FRIEDRICH, CHRISTIAN;**  
**VARMA, ROGER y**  
**HOFFMANN, ALEXANDER**

74 Agente/Representante:

**DEL VALLE VALIENTE, Sonia**

ES 3 015 090 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

Supervisión de vibraciones para la detección de fallos en la automatización de procesos

5 La invención se refiere a un procedimiento de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones para la detección de fallos de un fallo de máquina o de *hardware* en la automatización de procesos.

10 Del estado de la técnica se conoce la supervisión de procesos realizados por máquina, para determinar si se producen fallos o averías en las máquinas, ordenadores, etc. utilizados. Para este fin, se utilizan normalmente sensores que recogen datos continuamente durante el desarrollo de proceso, que se evalúan según un criterio establecido, para decidir si se presenta un fallo o no. Del documento DE 10 2018 222 562 A1 se sabe, por ejemplo, cómo detectar un estado de error en un circuito excitador de una máquina eléctrica, en donde la corriente de excitador y la señal de mando se filtran y comparan con valores de referencia como señales de comparación registradas por sensor. Del documento EP 0 934 567 A1 se conoce un procedimiento para la clasificación de la dependencia estadística de una serie temporal medible, en el que se describen pruebas iterativas con distintas hipótesis nulas. Del documento DE 10 2019 107 363 A1 se conoce a su vez un procedimiento implementado por ordenador para emitir una señal de desgaste de una máquina-herramienta con una así llamada detección de punto de cambio “*Change Point Detection*” con métrica de distancia. Sin embargo, este procedimiento por regla general no es lo suficientemente fiable para observaciones a largo plazo las 24 horas del día.

20 Además, la valoración de la calidad de datos basada en hipótesis nula se conoce también del documento L. Shalalfeh y col., *Fractional Dynamics of PMU Data* (IEEE Transactions on Smart Grid, IEEE, USA, tomo 12, núm. 3, págs. 1-11, mayo de 2021), XP011850407, ISSN: 1949-3053, DOI: 10.1109/TSG.2020.3044903.

25 Del documento EP 0 907 913 B1 se conoce además un procedimiento para la diferenciación de diagnóstico, en el que con un histograma se miden desviaciones de regla, lo que permite extraer conclusiones sobre las distintas fuentes de averías.

30 El objetivo de la invención es poder proponer un procedimiento de supervisión para la detección de fallos, que permita una detección de fallos especialmente fiable.

El objetivo se consigue mediante las características de la reivindicación 1, partiendo de procedimientos de supervisión anteriores, conocidos del estado de la técnica.

35 Mediante las medidas mencionadas en las reivindicaciones dependientes, son posibles realizaciones ventajosas y perfeccionamientos de la invención.

40 El procedimiento de supervisión según la invención está destinado a utilizarse en la automatización de procesos para un análisis de vibraciones. Por ejemplo, una máquina con un rotor, por ejemplo, un ventilador puede examinarse para detectar posibles fallos como desviaciones o similares defectuosas, que se desarrollan lentamente siguiendo una tendencia, al detectarse la vibración y sus desviaciones. Por consiguiente, el procedimiento de supervisión según la invención para la detección de fallos o de un fallo de máquina o de un fallo de *hardware*, que resulta de un análisis de vibraciones en un proceso realizado por máquina comprende inicialmente también el registro de al menos una serie de datos de sensor medidos durante el desarrollo de proceso. Estos datos detectados por sensor se recogen con frecuencia en orden cronológico. Sin embargo, por ejemplo, también es concebible que la serie de datos de sensor represente una secuencia local o un curso local, por ejemplo, cuando debe registrarse mediante sensores, si entre dos partes siempre se mantiene la misma distancia o si un componente no abandona su posición de alojamiento prevista debido a calentamiento, desequilibrios u otras irregularidades.

50 La enseñanza de la invención se caracteriza porque la detección de fallos deseada también puede comprender una predicción de fallos. En la invención se ha reconocido que los fallos de máquina o de *hardware* a menudo “se anuncian”, especialmente cuando se supervisan vibraciones o rotaciones, es decir, rara vez se produce un fallo espontáneo y repentino de la máquina sin ningún signo, sino que más bien se producen fenómenos sintomáticos que indican el fallo y que son medibles porque, por ejemplo, las magnitudes medidas en relación con la máquina/*hardware* cambian gradualmente. Las magnitudes medidas modificadas pueden registrarse por regla general mediante sensores, por ejemplo, una corriente de salida, una corriente de entrada, una velocidad de giro (p.ej., en un soplador), etc. No es poco frecuente que la máquina o el *hardware* pueda seguir realizando su trabajo, a veces, incluso sin ninguna pérdida de calidad o ninguna perceptible en la producción, hasta que la máquina sufre una avería mayor.

60 En este aspecto, la invención también permite optimizar intervalos de mantenimiento, es decir, predecir cuándo debe realizarse un mantenimiento en las máquinas existentes y cuán largos o cortos deben ser los intervalos de mantenimiento.

65 Según la invención, se ha reconocido la dificultad de que los datos de sensor medidos estén ocultos por errores estadísticos, en particular, un ruido estadístico, por lo que resulta difícil realizar una evaluación de datos de sensor

medidos individuales, ya que estos están sometidos a errores estadísticos y pueden desviarse de valores teóricos especificados, aunque no se presente ningún fallo.

5 Se ha reconocido que, por ejemplo, una magnitud de este tipo registrada mediante sensores por término medio no se modifica o solo lo hace lentamente, sino que las fluctuaciones estadísticas de esta magnitud aumentan en torno a un valor esperado.

10 Además, según la invención se tiene en cuenta por primera vez que los fallos que aparecen a menudo pueden repercutir en los datos de sensor registrados en distintos aspectos. Por lo tanto, según la invención, en la evaluación y examen se tratan irregularidades estadísticas, es decir, inicialmente con independencia de su causa de error, ya que las comparaciones simples y el registro de desviaciones de valor individual han resultado ser un criterio insuficiente para permitir una detección de fallos fiable. Por tanto, el procedimiento según la invención puede emplearse de manera universal para una pluralidad de aplicaciones, ya que no son necesarias condiciones especiales en cuanto a las máquinas supervisadas y, por regla general, también solo ha de conocerse el comportamiento esperado general de una magnitud medida registrada mediante sensores aunque, por ejemplo, solo se trate de un valor constante a lo largo del tiempo.

20 Según la invención, se comprueban al menos tres criterios antes de que se emita una señal de advertencia. Como criterio básico, que se supone de importancia fundamental en la detección de fallos según la invención, se comprueba si los datos de medición son constantes dentro de un rango de tolerancia especificado. Para poder procesar en paralelo en gran medida, se verifican al menos tres criterios, dado el caso incluso se determinan y se comprueban al mismo tiempo cronológicamente antes de emitir una advertencia.

25 Dado que el criterio de base es de central importancia y también con respecto a otros criterios, como un análisis de tendencias o un examen de cambios bruscos representa la prueba más general, que es la condición básica para una desviación de tendencia o desviación brusca, en un primer paso también se comprueba inicialmente el criterio de base. Solo cuando esto produce una desviación se comprueban otros criterios. Estos criterios subsiguientes se evalúan también paralelos en el tiempo para la evaluación más rápida.

30 Por consiguiente, como ventaja, un ejemplo de realización de la invención también proporciona un sistema de advertencia de varios niveles, al menos de tres niveles, en el que según el número de los criterios cumplidos en la detección de fallos, se muestra un nivel de advertencia propio. De este modo, al mismo tiempo se proporciona un procedimiento de supervisión, que efectúa una ponderación de los fallos que se producen, de manera que el usuario sea consciente de la gravedad de las irregularidades y también pueda sopesar con más precisión si y con qué medidas debe intervenir en un proceso o en la ejecución de una máquina.

40 Si en un primer paso se comprueba inicialmente el criterio de base y en un paso posterior otros criterios, también el sistema de advertencia puede estar adaptado ventajosamente a esto, es decir, puede emitir una advertencia al menos de dos etapas que tenga en cuenta esta distribución.

45 La invención es adecuada sobre todo para la automatización de procesos de sistemas, que se utilizan en el funcionamiento continuo y sus comportamientos de vibración o propiedades de vibración para el funcionamiento son especialmente relevantes. Como ejemplos, cabe mencionar la supervisión de bombas de vacío para aplicaciones en salas blancas o la supervisión para ventiladores que funcionan 24 horas durante 7 días a la semana. A partir del análisis según la invención de la señal de vibración, puede obtenerse ventajosamente de manera muy anticipada una indicación del comienzo de un daño, de manera que la máquina o instalación pueda repararse o mantenerse a tiempo, antes de que surja un daño o avería mayor. A partir de varias indicaciones de este tipo, también puede efectuarse una adaptación de los intervalos de mantenimiento, cuando en concreto puede estimarse la frecuencia con la que se produce dicho daño en el desarrollo del funcionamiento y cuando se le espera. El sistema puede adaptarse muy rápidamente a distintas aplicaciones para supervisiones a largo plazo. En un perfeccionamiento preferido, como sensores se utilizan sensores de vibración, para supervisar, por ejemplo, ventiladores, cojinetes, bombas, bombas de vacío u otros motores en el funcionamiento continuo.

55 Una aplicación ventajosa podría presentarse, por ejemplo, en el campo de la tecnología médica, en el que se produce una interacción de procesos técnicos y biológicos, por lo que se favorecen desviaciones estadísticas y una detección de fallos que requiere una intervención es más difícil de distinguir de una simple desviación estadística. Otra aplicación ventajosa se da en el campo de la refrigeración de procesos de producción (ventiladores, etc.).

60 Por tanto, según la invención está prevista una evaluación estadística de al menos una serie recogida o de una parte de la al menos una serie recogida. En un ejemplo de realización ventajoso, a este respecto se verifican además al menos tres criterios, para poder asociar también niveles de advertencia correspondientes en función de cuántos de estos criterios se cumplan de una vez.

65 El procedimiento de supervisión según la invención se ejecuta en general como procedimiento implementado por ordenador, en el que tiene lugar una evaluación electrónica o asistida por ordenador de los datos de sensor. Por

consiguiente, también se supera el prejuicio técnico de que las señales con errores estadísticos o con ruido no pueden evaluarse estadísticamente en cuanto a error y plausibilidad.

La evaluación estadística según la invención tiene lugar estableciendo una hipótesis nula. Si se da desviación de la hipótesis nula o si la probabilidad de una desviación de la hipótesis nula está por encima de un nivel  $\alpha$  de significancia predeterminado, entonces se emite una advertencia.

En el caso de perfeccionamientos especialmente preferidos de la invención, puede comprobarse por ejemplo al menos uno de los tres criterios siguientes en la evaluación estadística:

- Un error típico que va a detectarse con métodos estadísticos consiste en que se presenta un salto del nivel de datos de sensor medio en una secuencia temporal o local. Este salto debe diferenciarse de desviaciones individuales que se deben a ruidos y, por consiguiente, son meramente estadísticas sin que se presente un fallo en el sentido estricto. Dicho fallo en forma de un salto puede presentarse, por ejemplo, cuando la magnitud que debe medirse realmente está sometida a un cambio que aparece repentinamente, pero de forma continua, es decir, se desvía de un comportamiento estacionario. Sin embargo, también es concebible, por ejemplo, un fallo relacionado con el sensor, que lleve a esta desviación de nivel. Por tanto, el valor medio, promediado al menos a lo largo de intervalos temporales o locales más amplios, cambia en el curso temporal.

- Un fallo adicional que va a detectarse con métodos estadísticos puede consistir en que los datos de sensor medidos se modifiquen (“huyan”) continuamente según una tendencia constante. Por tanto, también en este caso se presenta una desviación del comportamiento estacionario. El valor medio en el curso temporal cambia continuamente.

- Sin embargo, aunque el valor medio permanece constante promediado a lo largo de intervalos temporales o locales más amplios, la susceptibilidad de fluctuación o volatilidad puede variar en gran medida o en particular aumentar en caso de un fallo.

En una forma de realización de la invención, el comportamiento que se espera puede describirse mediante una función modelo, que está compuesta por una suma de una función, que describe un comportamiento estacionario de una función, que representa un paseo aleatorio (*random-walk*) para modelar el ruido y de una función lineal, que describe un comportamiento de tendencia con el tiempo/la distancia local para poder reproducir efectos típicos como un ruido de fondo o una deriva de los valores medidos. Por lo tanto, los valores medidos pueden describirse de la siguiente manera:

$$y_t = c_t + \delta t + u_t,$$

en donde  $y_t$  representa los datos de medición modelados dependiendo del tiempo  $t$  (o del lugar),  $u_t$  describe un comportamiento estacionario,  $c_t$  un paseo aleatorio para simular, por ejemplo, el ruido y  $\delta t$  una tendencia, es decir, una “huida” o “deriva” de los valores medidos.

Mediante esta descripción de modelo una evaluación estadística de los fallos que se esperan puede hacerse matemáticamente tangible con respecto a los posibles fallos. Con esta descripción de modelo pueden calcularse magnitudes estadísticas como el valor esperado, la desviación estándar o la varianza. En el caso de un comportamiento estacionario, el valor esperado puede determinarse promediando. A partir del modelo pueden calcularse también las desviaciones de los valores medidos con respecto a la función modelo, los residuos.

Dado que un comportamiento de tendencia de los valores medidos, en particular, un cambio continuo de los valores medidos representaría un fallo, en el modelo se supone inicialmente  $\delta = 0$ . El primer criterio es una comprobación sobre si un salto aparece repentinamente en el nivel medio de datos de medición, un denominado cambio de nivel. En un comportamiento estacionario, la varianza en el caso ideal es  $= 0$ . Si los valores medidos están sometidos a ruido, la varianza ronda un nivel valor esperado determinado (en este caso, lo ideal es el valor medio). La volatilidad del componente de paseo aleatorio  $c_t$  es igual a cero según una hipótesis nula y solo en el caso de un comportamiento no estacionario en total (también teniendo en cuenta un ruido subyacente) es distinta de cero. En un comportamiento no estacionario básicamente el valor esperado también varía, siempre que este se determine nuevamente a lo largo de intervalos de tiempo consecutivos. En este caso, desde el punto de vista estadístico ha tenido lugar un salto, que desplaza los valores medidos en tal medida, que una desviación del valor esperado en el caso de una varianza determinada a consecuencia de un ruido subyacente ya no puede explicarse mediante el comportamiento de ruido.

Para la hipótesis nula puede utilizarse una prueba KPSS estacionaria (KPSS: Kwiatkowski, Phillips, Schmidt y Shin):

Para un número  $T$  de valores medidos puede suponerse de este modo una estadística de prueba para la hipótesis nula

$$\frac{\sum_{t=1}^T S_t^2}{S^2 T^2}$$

, en donde  $S_t$  es la suma de los residuos  $e_t$

$$S_t = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_t$$

en puntos de medición individuales  $t$  (por regla general, en momentos individuales  $t$ ) con respecto a la función modelo o curva de regresión y  $s^2$  la varianza con respecto al valor esperado. En la comprobación del primer criterio de si se presenta un cambio de nivel, por regla general, es ventajoso tomar como base una cantidad comparativamente reducida de datos de medición para formar a partir de ello la suma en la función de prueba, porque en la comparación de manera correspondiente tampoco es necesario que el punto en el que potencialmente se realiza un salto de datos se sitúe en el intervalo de tiempo o de lugar que va a comprobarse. Esta estadística de prueba va seguida de una distribución determinada. Para la prueba de hipótesis nula puede comprobarse ahora la probabilidad de la estadística de prueba indicada. Por debajo de una cierta probabilidad o significancia, puede suponerse que la hipótesis nula no es aplicable. El nivel de significancia  $\alpha$ , que no debería superarse puede suponerse, p.ej. en 1 %, ya que de lo contrario se desviaría demasiado de la estadística de prueba y debería emitirse una advertencia.

Si la volatilidad de la función modelo es  $= 0$ , entonces se presenta un comportamiento estacionario que está sometido en todo caso a un ruido.

Para la comprobación del segundo criterio de si se presenta un curso de tendencia o de si los datos de medición “van a la deriva” continuamente, por regla general, es necesario evaluar y comparar más puntos de medición. Por lo demás, para este criterio también puede aplicarse la prueba KPSS. Como condiciones en la función modelo siempre se requiere que  $\delta = 0$ , ya que de lo contrario ha de suponerse un comportamiento de tendencia y se dejan de lado las autocorrelaciones.

Si ahora la significancia es menor que un valor determinado, especificado y se ha empleado un gran número de datos de medición, puede suponerse un comportamiento de tendencia, que el segundo criterio se cumple.

Sin embargo, la comprobación del primer y segundo criterio puede diferenciarse únicamente en el número de los datos de prueba o del intervalo de tiempo medido. A este respecto, se comprueba de manera correspondiente:

- la volatilidad del término paseo aleatorio difiere de cero o es mayor que la magnitud de un valor especificado y/o

- la estadística de prueba de la prueba KPSS estacionaria se cumple o no con una cierta probabilidad, especificada.

Para comprobar el tercer criterio de si el ancho de oscilación o susceptibilidad de fluctuación aumenta continuamente, basta con comparar las varianzas en dos fases de prueba o intervalos de valores medidos diferentes entre sí. La hipótesis nula que va a comprobarse consiste en que las varianzas siempre coinciden o al menos se desvían solo con una probabilidad especificada. Si el ancho de oscilación aumenta, se incrementa también la varianza en un intervalo de tiempo o medición subsiguiente. La cantidad de datos de prueba puede ser menor que en la comprobación del segundo criterio con respecto al curso de la tendencia.

Por consiguiente, desde el punto de vista estadístico, puede determinarse de nuevo la significancia con respecto a un valor de probabilidad establecido, en donde, cuando la significancia queda por debajo de este valor de probabilidad, el ancho de oscilación aumenta y se cumple el tercer criterio.

#### Ejemplos de realización

Ejemplos de realización de la invención se han descrito en los dibujos y se explican con más detalle a continuación, indicando otros detalles y ventajas. Muestran en detalle:

La Fig. 1: una representación esquemática de un procedimiento de supervisión para la detección de fallos y predicción de fallos según la invención,

la Fig. 2-4: distintas series de datos de medición, que están superpuestas por un ruido, para aclarar la detección de fallos,

la Fig. 5: una serie de datos de medición a lo largo de un intervalo de tiempo mayor con diferentes fallos incluida una representación de los términos de fallo,

la Fig. 6: una representación esquemática de un sistema que se utiliza para la supervisión de máquina de varias bombas de vacío,

la Fig. 7: una representación esquemática de la evaluación paralela de tres criterios antes de la emisión de la señal de advertencia, así como

la Fig. 8: una representación esquemática de la evaluación por niveles antes de la emisión de la señal de advertencia.

La figura 1 muestra una representación esquemática de un procedimiento 1 de supervisión implementado por ordenador para la detección de fallos y predicción de fallos según la invención. Se supervisa una instalación 2 mediante un sensor 3, que envía los datos medidos a una unidad 4 de evaluación controlada por ordenador. Esta unidad 4 de evaluación puede ser una unidad de control o control, por ejemplo, dentro de la máquina, puede funcionar también por separado en un ordenador.

La unidad 4 de evaluación evalúa los datos medidos estadísticamente:

Especifica inicialmente un nivel de significancia estadístico, p.ej. 1 % y, además, al menos un criterio. En este caso, la unidad 4 de evaluación comprueba el criterio de base, así como tres criterios adicionales I, II y III para averiguar:

- ¿Según el criterio de base, se presenta una desviación causada por los fallos porque los datos de medición no son constantes dentro de una tolerancia especificada?

- Primer criterio I:

¿Se presenta un cambio de nivel en el curso de los datos de medición?

- Segundo criterio II:

¿Se presenta un curso de tendencia?

- Tercer criterio III:

¿Se presenta un cambio de la volatilidad o susceptibilidad de fluctuación?

Si se ha cumplido uno de los criterios, se determina mediante una denominada hipótesis nula.

Para ello, se toma como base una función modelo, que reproduce errores estadísticos, por ejemplo, a través de un paseo aleatorio, pero también presenta un término, que puede describir el comportamiento de tendencia básicamente indeseado.

El comportamiento de tendencia se considera inicialmente ausente, es decir, el término que describe la tendencia se fija en cero.

Para un incremento de la volatilidad III, basta con examinar las varianzas de dos secuencias parciales registradas mediante sensores (consecutivas cronológicamente). Su relación sería en el caso ideal = 1. También para el comportamiento pueden utilizarse estadísticas de prueba y comprobarse si el comportamiento de valor medido de la estadística de prueba se aproxima lo suficiente.

En el comportamiento de cambio de nivel (criterio I) se modifica el valor esperado. También en este caso puede trabajarse con una estadística de prueba. En este caso, no se necesitan tantos datos de medición, porque el cambio de nivel ocurre más bien rápidamente tal como se espera y, por lo tanto, no debe promediarse durante un periodo más prolongado para poder registrar de manera fiable el cambio de señal.

En el comportamiento de tendencia que también puede transcurrir muy lentamente, han de realizarse mediciones a lo largo de un periodo más prolongado para constatar el cambio.

La evaluación de la significancia y la determinación de la desviación de la hipótesis nula respectiva puede realizarse en el bloque 4a de realización.

Si los datos de medición no son lo suficientemente constantes dentro de un límite de tolerancia (criterio K de base) y se cumple uno de los criterios I, II, III, entonces mediante la unidad 4 de evaluación se emite un primer nivel WI de advertencia. De manera análoga, en el caso de dos criterios, se señala un segundo nivel WII de advertencia más crítico y, en el caso de tres criterios, se señala un nivel WIII de advertencia especialmente alto. En la figura 1 se muestra el curso 5 en el tiempo de los datos de medición, donde se muestran los intervalos WI, WII, WIII en los cuales en cada caso se cumplen hasta tres criterios. También es concebible que se determine una medida para la desviación de la hipótesis nula respectiva y, por consiguiente, se seleccionan los niveles WI, WII, o WIII de advertencia.

Los niveles WI, WII, WIII de advertencia pueden indicarse o solo, p.ej. a través de un semáforo de señalización o columna 6 de señalización, pero también según la forma de realización es concebible que la unidad 4 de evaluación

envíe instrucciones de regulación correspondientes a la instalación 2. Estas instrucciones también pueden estar adaptadas a las fuentes de error, que se representan normalmente en determinados criterios I, II, III.

Normalmente hay que partir del hecho de que los datos de medición recogidos de una serie de datos de medición están superpuestos por un ruido, tal como es el caso en las figuras 2-4 en cada caso. Debido a este ruido superpuesto, los datos de medición están distribuidos en secciones individuales de la serie de datos de medición con una amplitud tal, que se dificulta la detección de errores como un curso de tendencia o un cambio de nivel. Precisamente la susceptibilidad a la fluctuación o volatilidad también es más difícil de reconocer en términos puramente gráficos, cuando la varianza de los datos de medición debida al ruido es comparativamente alta y los valores medidos pueden variar con la misma probabilidad por término medio a valores muy altos o muy bajos, en comparación con un valor medio o valor esperado.

La figura 2 muestra una señal que está claramente superpuesta por un ruido, grabada como serie de datos de medición. Sin embargo, por término medio los datos de medición permanecen a un nivel constante, que se representa como línea de puntos. Por tanto, a pesar de la alta varianza de los valores medidos, en este caso, se presenta una volatilidad constante; pues tampoco la varianza aumenta en el curso temporal, sino que los datos de medición permanecen en esta sección en dispersión esencialmente constante entorno al valor medio/esperado. Por lo tanto, a lo largo del periodo por término medio, a parte de los valores atípicos estadísticos de los valores medidos, no se presentan fluctuaciones de señal. Según una evaluación de acuerdo con el tercer criterio III, se detectaría una volatilidad constante.

La figura 3 muestra también una señal superpuesta por ruido. Sin embargo, si en el curso temporal, los valores medidos aumentan continuamente, se presenta un curso de tendencia. La línea de puntos que reproduce los promedios de los datos de medición es una recta con pendiente positiva e indica el nivel ascendente. Sin embargo, dado que también en este caso las fluctuaciones estadísticas o la varianza de los datos es demasiado alta, esta tendencia es difícil de detectar sin evaluación de un valor medio o valor esperado. Este curso de tendencia se detecta según el segundo criterio II.

La figura 4 muestra una situación análoga con respecto a las figuras 2-3, es decir, se presenta una señal sometida a ruido, en donde en la evaluación del valor medio o valor esperado se pone de manifiesto que en el curso se produce un salto repentino de los valores medidos (cambio de nivel) a un nivel superior. El valor medio o valor esperado está representado con una línea de puntos, que presenta un salto repentino (cambio de nivel). Antes y después de este salto, los datos de medición por término medio en cada caso son constantes en estos intervalos parciales de tiempo. Para este caso, de manera correspondiente es relevante una evaluación según el primer criterio I.

Un curso de una serie de datos de medición a lo largo de un periodo más prolongado de 19 días se representa en la primera línea de la figura 5 ("valor"). Las otras líneas describen en cada caso en una escala de 0 a 1 los términos en la función modelo, que describen el curso de tendencia (criterio II), el cambio de nivel (criterio I) y la volatilidad (criterio III).

En el curso de datos de medición ("valor") puede distinguirse que los valores medidos están superpuestos por un ruido estadístico a lo largo de todo el periodo. También este ruido fluctúa en su intensidad, es decir, la varianza por ejemplo en la franja en torno al 4 de julio es claramente mayor que en la franja del 17 a aproximadamente el 20 de junio. Sin embargo, por término medio los valores son constantes en la franja del 17 de junio a aproximadamente el 20 de junio y las fluctuaciones están limitadas en un rango más pequeño estadísticamente, lo que se muestra en la última línea de la figura 5 muestra, por el hecho de que la volatilidad hasta el 20 de junio aumenta el valor 0. También en el curso de tendencia en la segunda línea, el valor hasta el 20 de junio se sitúa en 0 de manera constante, ya que el nivel de señal por término medio no se modifica.

El comportamiento de los datos de medición del 30 de junio al 5 de julio es diferente. En este caso, las desviaciones fluctúan continuamente, mientras que el nivel de señal permanece constante en término medio. La varianza aumenta. El crecimiento de las desviaciones aumenta el valor de la volatilidad a partir del 30 de junio. El nivel de señal constante por término medio se muestra mediante un valor de tendencia en la franja de 0 en este periodo.

En dos puntos discretos, concretamente, en un momento en torno al 22.123 de junio y en torno al 30 de junio, el nivel de señal cambia bruscamente, lo que se refleja en la tercera línea mediante un pico aislado en cada caso exactamente en ese momento. También tendencia y volatilidad muestran en estos momentos en cada caso cambios, también como picos singulares en el curso de señal, porque con el salto también ha cambiado el curso de señal (tendencia) o se ha realizado una desviación que en este caso también sobrepasa la varianza.

Entre el 22/23 de junio y el 30 de junio la señal de medición aumenta continuamente y sube ligeramente. Por lo tanto, en este periodo en la línea 2 de la figura 5 está el valor de tendencia en los valores en la franja 1, porque se presenta un curso de tendencia ascendente.

La tercera línea de la figura 5 muestra el término del cambio de nivel en el que, como se ha descrito antes, sobre todo llaman la atención los picos en la franja en torno al 22.123. de junio y el 30 de junio. Fuera de estos dos picos, el

término nivel permanece en la franja alrededor de 0, muestra no obstante desviaciones irregulares. Esto es debido a que la señal de medición ("valor") por término medio estadísticamente, en función de qué franja se contemple no siempre es constante, es decir, el nivel de señal, que de todos modos está sometido a ruido cambia algo.

Además, las fluctuaciones estadísticas más altas que aparecen entre tanto y/o una variación del nivel como en torno al 22.123. de junio y en torno al 30 de junio pueden llevar a que también en la franja del término de volatilidad el valor cambie brevemente y no sea igual a 0, porque la señal experimenta un cambio en la forma de un salto, que también es mayor que la varianza causada por el ruido, es decir, la susceptibilidad de fluctuación de la señal también ha experimentado un cambio en este caso.

La figura 6 muestra un esquema de un sistema para la supervisión de bombas de vacío con sensores de vibración con electrónica de diagnóstico para la supervisión de procesos. En este caso, se trata de sensores de vibración del tipo de fabricante "ifm VSE". Las señales se envían a un procesador para la evaluación. Varios ciclos del proceso sincronizado se combinan para formar un ciclo de máquina. Asistido por un *software* de evaluación numérico, se realiza un análisis de los datos de medición continuamente (*continuous pattern monitoring*), para analizar la volatilidad, cambios de nivel (*level shifts*) o evoluciones de tendencia. Para ello, se calculan también valores medios o esperados. Con métodos del cálculo de probabilidad para la predicción del desarrollo de datos, se realiza una extrapolación de los últimos datos de medición o se prueba si los datos de medición con una probabilidad determinada se sitúan en franjas establecidas de una banda de confianza o fuera de la banda de confianza.

Selectivamente puede tomarse como base una parametrización, que prevé un análisis más concreto según determinados criterios o parámetros (opciones de parametrización detallada), p. ej.:

- selección de datos de referencia a partir de la cantidad de datos y/o
- configuración de objetos en el análisis de vibraciones y/o
- análisis con ayuda de bandas de confianza estrechas, para averiguar ya pequeñas desviaciones o estabilidad de datos de medición.

El usuario por regla general tiene dos posibilidades, según la variante de realización de la invención de entrenar el monitor de patrones:

- Variante A: "Supervisada": El usuario marca patrones presentes manualmente en datos históricos, por ejemplo, una tendencia que se presentó en un periodo específico en los datos históricos (o análogamente a la volatilidad o un salto). A continuación, se parametriza el algoritmo de manera que precisamente este periodo se hubiera reconocido y el resto de los otros periodos no, en el caso de que sea posible con los procedimientos de prueba. En este sentido, se comprueba también si el usuario ha olvidado o ha marcado una franja que no presenta ningún patrón.

- Variante B: "No supervisada": El usuario carga un periodo que es estacionario y no contiene ninguno de los patrones. Después el algoritmo se entrena para que en el periodo seleccionado no se haya emitido ninguna alarma/señal de advertencia, pero se parametrize para que sea lo más sensible posible (por ejemplo, una banda de confianza estrecha), es decir, que funcione en el caso de los cambios/patrones más pequeños. En este sentido, se comprueba también si hay patrones en los datos que el usuario simplemente ha olvidado marcar.

Las figuras 7 y 8 muestran dos variantes de la determinación de los criterios. Según la figura 7 se determinan tres criterios, en paralelo, entre ellos el criterio K de base, así como el análisis de una tendencia II y la aparición de saltos I. Según qué criterio sea relevante, se emite una de las indicaciones de advertencia (o dado el caso también varias indicaciones de advertencia) WK, WI, WII.

La figura 8 muestra una determinación de criterios por niveles: Inicialmente se comprueba el criterio K de base, después cuando en este sentido se ha constatado una desviación, siguen los otros dos criterios I, II paralelos entre sí. En este caso, como salida basta una señal WI, WII de advertencia de dos niveles, dependiendo de si los datos de medición no constantes muestran saltos o tendencias de evolución.

Ventajosamente, el procedimiento de supervisión según la invención permite realizar una evaluación estadística de datos de medición, que estén sometidos en parte, entre otras cosas, también a errores estadísticos, por ejemplo, superpuestos por un ruido, y detectar posibles fallos de este modo. El procedimiento según la invención utiliza principalmente métodos estadísticos y es en gran medida universal, independientemente del tipo de máquina/tipo de *hardware* que se vaya a supervisar, porque básicamente diferencia entre la aparición de errores estadísticos y los errores causados por mal funcionamiento. Según la invención, esto sucede bajo la determinación de desviaciones de una hipótesis nula y de la evaluación de una significancia estadística con respecto a un nivel de significancia predeterminado. La clasificación en distintas categorías en función del número de criterios de error cumplidos y/o en función del grado de la desviación permite la clasificación de la gravedad de la situación en un perfeccionamiento.



**Lista de referencias**

|    |          |                                                           |
|----|----------|-----------------------------------------------------------|
|    | 1        | Procedimiento de supervisión                              |
| 5  | 2        | Instalación que va a supervisarse                         |
|    | 3        | Sensor                                                    |
|    | 4        | Unidad de evaluación                                      |
| 10 | 4a       | Cálculo de significancia con respecto a la hipótesis nula |
|    | 5        | Datos de medición con categorización de errores           |
| 15 | 6        | Columna de señalización                                   |
|    | I        | Criterio (volatilidad)                                    |
|    | II       | Criterio (cambio de nivel)                                |
| 20 | III      | Criterio (comportamiento de tendencia)                    |
|    | WI       | Primer nivel de advertencia                               |
| 25 | WII      | Segundo nivel de advertencia                              |
|    | WIII     | Tercer nivel de advertencia                               |
|    | WK       | Nivel de advertencia base                                 |
| 30 | $\alpha$ | Nivel de significancia                                    |
|    | K        | Criterio de base                                          |

# REIVINDICACIONES

1. Procedimiento (1) de monitorización implementado por ordenador para el análisis de vibraciones para la detección de fallos de un fallo de máquina y/o fallo de *hardware* en la automatización de procesos en un proceso de producción asistido y/o que funciona por máquina:

- Registrar al menos una serie en el proceso de datos (5) de sensor medidos en una secuencia temporal /o local,
- en donde se efectúa una evaluación (4) estadística de la al menos una serie o al menos de una parte de la al menos una serie, para determinar en cada caso una desviación de los datos (5) de sensor medidos según al menos tres criterios (K, I, II, III), en donde la valoración estadística:
- proporciona una hipótesis nula,
- proporciona un valor esperado para los datos de sensor medidos,
- prevé el cálculo de la significancia estadística en cuanto a la desviación de la hipótesis nula especificada y
- emite un aviso cuando la significancia estadística se desvía de la hipótesis nula y/o cuando en el caso de un nivel  $\alpha$  de significancia predeterminado la probabilidad de una desviación de la hipótesis nula es mayor que el nivel  $\alpha$  de significancia,

**caracterizado por que**

- en la valoración (4) estadística las desviaciones de los datos de sensor medidos se determinan según los siguientes criterios (K, I, II, III) antes de que se emita el aviso, en donde:

- i.en la evaluación (4) estadística para comprobar un criterio (K) de base se comprueba si el nivel de datos de sensor medio en la secuencia temporal y/o local permanece dentro de una tolerancia especificada por el criterio (K) de base y
- ii.en la valoración (4) estadística para probar el segundo de los criterios (II) se comprueba si una tendencia de una modificación continua del nivel de datos de sensor medio se presenta en la secuencia temporal y/o local y/o
- iii.en la evaluación (4) estadística para probar el primero de los criterios (I) se comprueba si se presenta un salto del nivel de datos de sensor medio en secuencia temporal y/o local, en donde el salto ha tenido lugar, cuando el salto desplaza los valores medidos hasta un punto en total, que la desviación del valor esperado en el caso de una varianza determinada a consecuencia de un ruido subyacente ya no puede aclararse mediante el comportamiento de ruido, y/o
- iv.en la evaluación estadística para probar el tercero de los criterios (III) se comprueba si la susceptibilidad de fluctuación en la serie cambia en una secuencia temporal y/o local, en donde
- v.en la evaluación (4) estadística se comprueba siempre el criterio (K) de base, en donde en la evaluación (4) estadística la desviación de los datos de sensor medidos según el criterio (K) de bases se efectúa en primer lugar y después se determina al mismo tiempo o de manera solapada en el tiempo según dos de los otros criterios (I, II, III).

2. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la evaluación estadística prevé la emisión de una advertencia al menos de tres niveles, en particular, de cuatro niveles (WK, WI, WII, WIII), en donde a cada número de criterios cumplidos de los criterios (K, I, II, III) se asocia en cada caso un nivel (WK, WI, WII, WIII) de advertencia.

3. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según la reivindicación 1, **caracterizado por que** la evaluación estadística prevé la emisión de una advertencia al menos de dos niveles, en función de sí además del criterio de base el primer o segundo criterio todavía revela una desviación.

4. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** como función modelo para el comportamiento de los datos (5) de sensor se emplea la siguiente función en la serie:

$$y_t = c_t + \delta t + u_t,$$

en donde  $y_t$  describe los datos de sensor modelados dependiendo de  $t$ ,  $c_t$  un paseo aleatorio,  $\delta$  una tendencia y  $\delta t$  un comportamiento de tendencia lineal, así como  $u_t$  un comportamiento estacionario, cuando los datos de sensor de la serie se trazan con respecto a  $t$ , en donde  $t$  describe el curso temporal y/o local.

5. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** para comprobar el primer criterio (I) se emplea la

hipótesis nula, porque la varianza como desviación cuadrática media con respecto al valor esperado y la volatilidad del término de paseo aleatorio  $c_t$  es cero, en donde en particular en cuanto a la función modelo se supone que la tendencia  $\delta = 0$ .

6. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** para la comprobación del primer y/o segundo criterio (I) se lleva a cabo una prueba KPSS estacionaria, en donde como hipótesis nula se comprueba si una estadística de prueba se cumple con una probabilidad especificada, en donde como estadística de prueba se emplea en particular:

$$\frac{\sum_{t=1}^T S_t^2}{s^2 T^2}$$

como suma de los cuadrados de la suma  $S_t$  sobre la parte T de la secuencia, en donde  $S_t$  a su vez es la suma de los residuos con respecto a la curva de regresión de los datos de sensor medidos en puntos individuales t, en relación con el producto de la varianza  $s^2$  multiplicado por el cuadrado del número de la parte de secuencia T, donde se emite una advertencia cuando con menos de una probabilidad especificada no se cumple la estadística de prueba.

7. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** para la comprobación del primer y/o del segundo criterio y/o del criterio (I, II, K) de base autocorrelaciones que se tienen en cuenta y/o se calculan y/o se ignoran, en particular, en el caso de retardos de señal en forma de datos de sensor influidos por el retardo.

8. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** para la comprobación del segundo criterio (II) se emplea una parte mayor de la secuencia con más datos de sensor que para la comprobación del primer criterio (I).

9. Procedimiento (1) de vigilancia implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** para la comprobación del tercer criterio (III) se efectúan al menos dos secuencias parciales de datos de sensor.

10. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** para la comprobación del tercer criterio (III) como hipótesis nula se emplea una estadística F de prueba, que forma la relación de las varianzas de las dos secuencias de prueba, y como hipótesis nula se supone que  $F=1$ .

11. Procedimiento (1) de supervisión implementado por ordenador para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** las advertencias se transmiten a una columna de señalización, en donde:

•a cada nivel de advertencia dependiendo del número de los avisos se asocia otro símbolo luminoso en la columna de señalización y/o en función de la desviación de la hipótesis nula se asocia otro símbolo luminoso a la columna de señalización.

12. Procedimiento (1) de monitorización implementado por ordenador

para el análisis de vibraciones según una de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** durante el registro se cargan los datos de un periodo que es estacionario y, en particular, no contiene ninguno de los patrones, en donde a continuación el algoritmo se entrena de manera que en el periodo seleccionado no se hubiera emitido ninguna alarma y/o señal de aviso, pero que al mismo tiempo esté parametrizado de la manera más sensible posible, por ejemplo, mediante una banda de confianza estrecha, es decir, que funcione en el caso de modificaciones correspondientemente pequeñas y/o patrones.

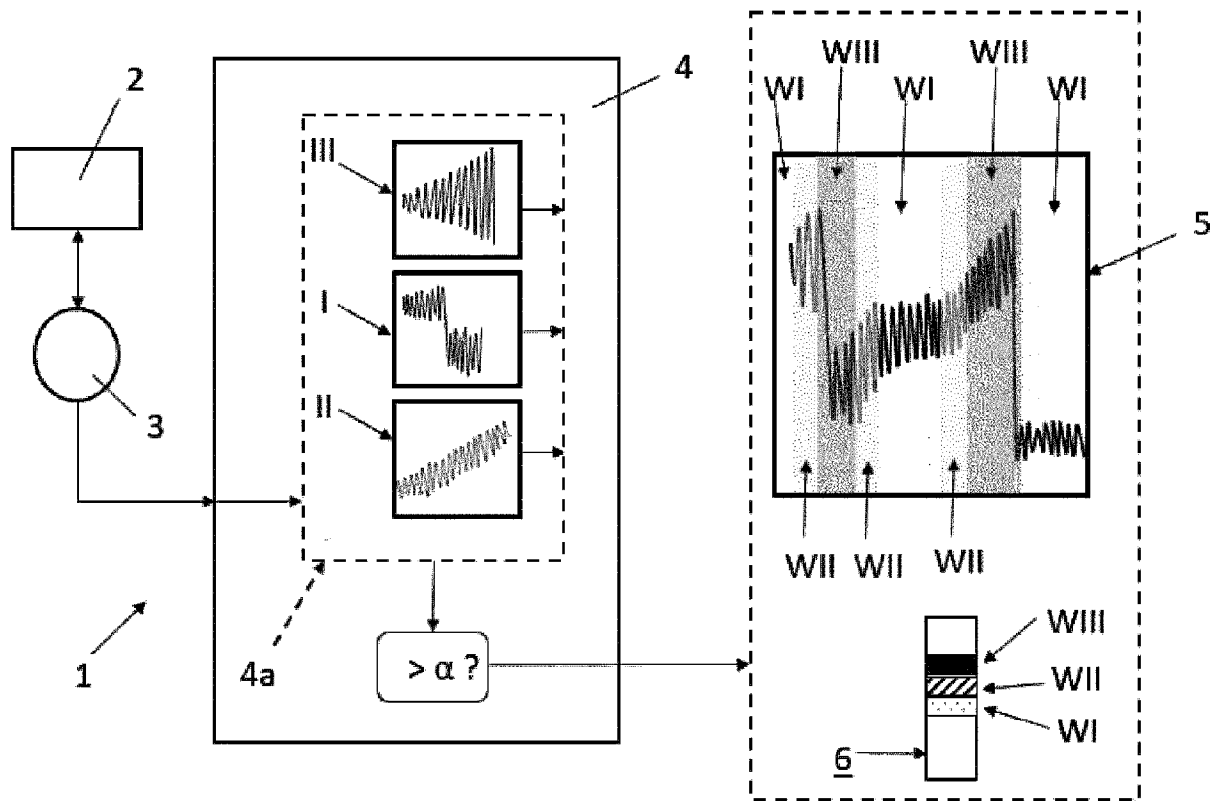


Figura 1

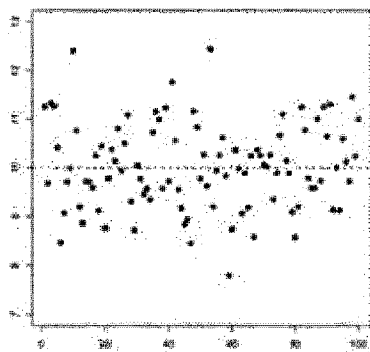


Figura 2

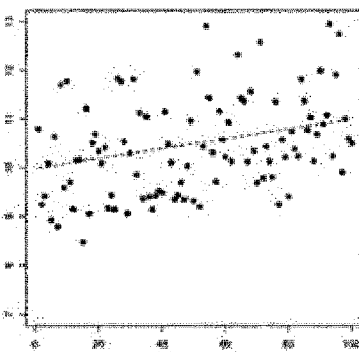


Figura 3

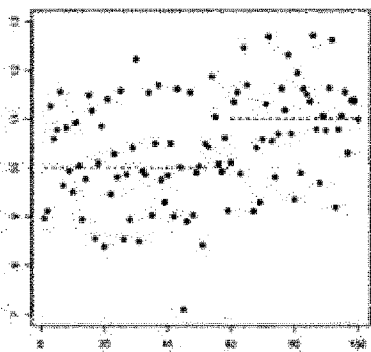


Figura 4

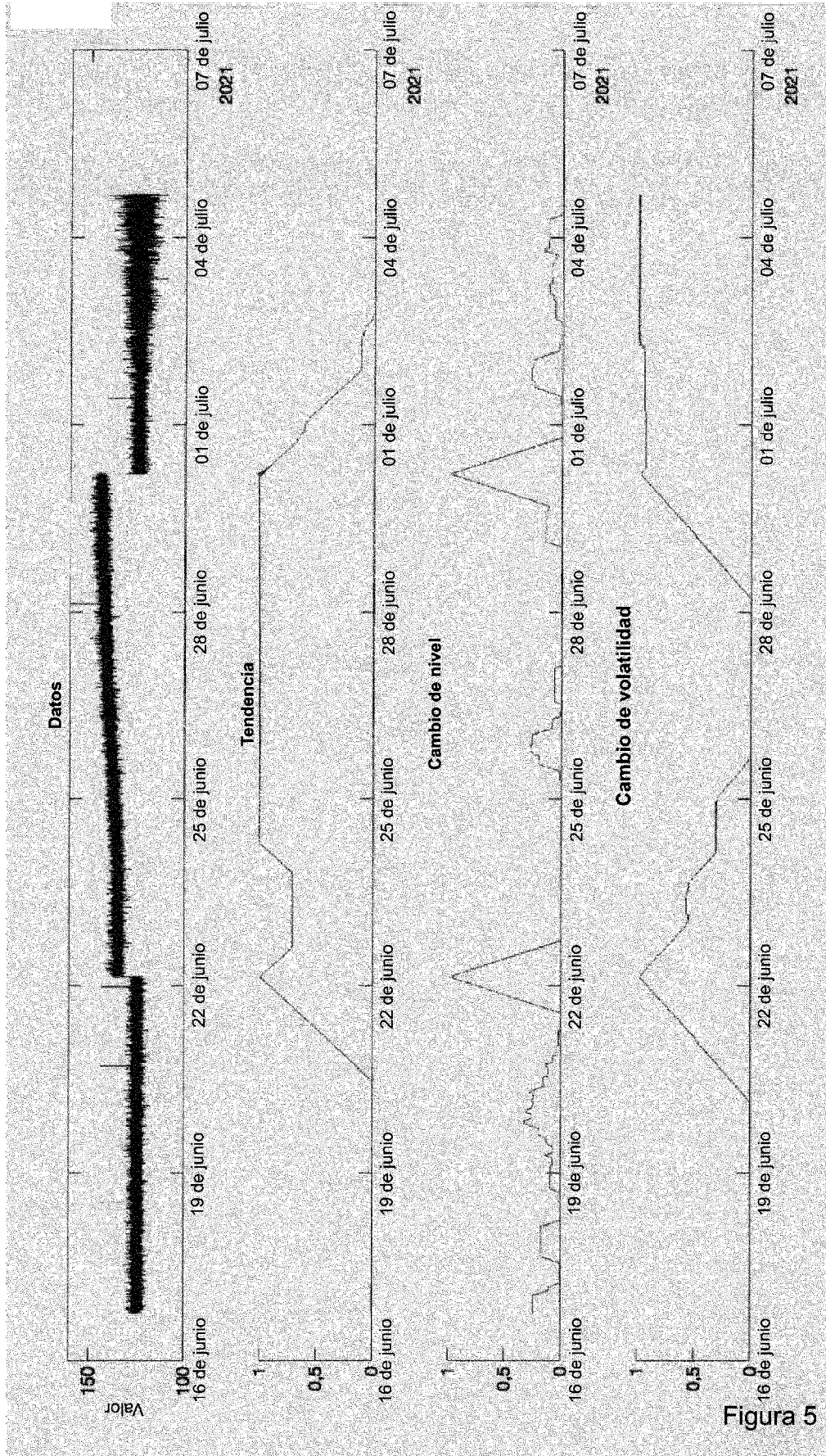
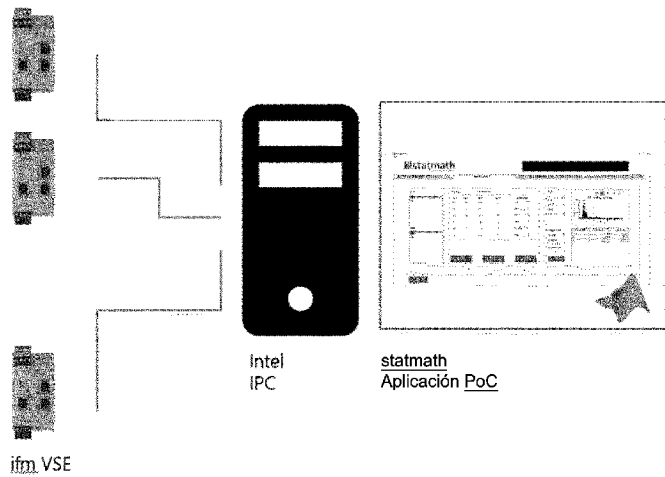


Figura 5



- **Monitorización continua de patrones**
  - Volatilidad
  - Cambios de paso
  - Tendencias
- **Predicciones probabilísticas**
  - Extrapolación predictiva de mediciones recientes
  - Límites de confianza probabilística
- **Opciones de parametrización detallada**
  - Selección de datos de referencia
  - Configuración de objeto VSE
  - Análisis de banda estrecha

Figura 6

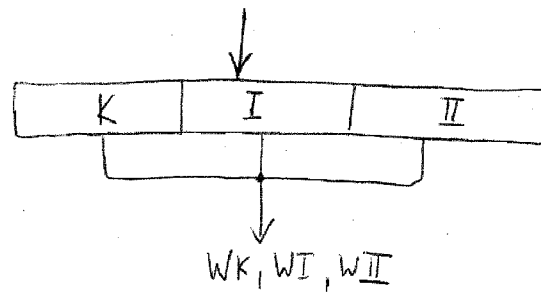


Figura 7

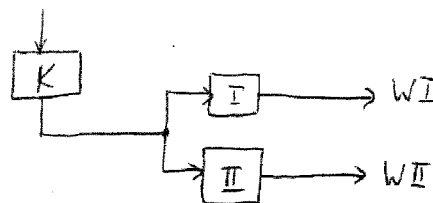


Figura 8