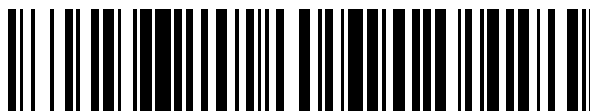


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 663 251**

51 Int. Cl.:

G05B 23/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.07.2013** E 13174839 (4)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.12.2017** EP 2682836

54 Título: **Método para realizar diagnósticos de una estructura sujeta a cargas y sistema para implementar dicho método**

30 Prioridad:

04.07.2012 IT TO20120588

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

11.04.2018

73 Titular/es:

**LEONARDO S.P.A. (100.0%)
Piazza Monte Grappa 4
00195 Roma, IT**

72 Inventor/es:

IANNONE, MICHELE

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 663 251 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método para realizar diagnósticos de una estructura sujeta a cargas y sistema para implementar dicho método

5 La presente invención se refiere, en general, a un método para realizar diagnósticos estructurales y, más específicamente, a un método para realizar diagnósticos de una estructura mecánica, en particular, una estructura de aeronave, adaptada para evaluar o monitorizar la presencia de daños o defectos causados en una estructura por cargas operativas y/o sucesos ocurridos mientras está en servicio.

10 En los métodos para llevar a cabo el mantenimiento de sistemas (partes de productos o productos complejos), es de particular interés poder reducir los fallos inesperados mediante la monitorización de ciertos parámetros que indican el estado del sistema.

15 De acuerdo a la técnica anterior, en el sector aeronáutico la presencia de daños o defectos en una estructura mecánica de una aeronave, tal como una estructura metálica o compuesta, por ejemplo, una estructura de fuselaje o ala, se diagnostica indirectamente mediante una reconstrucción histórica de sucesos, incluidos los sucesos que han dado como resultado daños debidos a un impacto accidental durante la producción (impacto de una herramienta) o mientras está en servicio (impacto debido a granizo u objetos extraños) y las cargas soportadas por la estructura, o mediante la estimación de la fatiga soportada por la estructura, basándose en el conocimiento de sus propiedades de resistencia mecánica en respuesta a las tensiones que habitualmente ocurren en las condiciones de servicio. En particular, en el caso de estructuras compuestas, los impactos accidentales producen efectos que no son muy visibles externamente, pero que pueden causar daños considerables dentro de la estructura (por ejemplo, delaminación).

25 Esta técnica, sin embargo, es laboriosa e imprecisa, porque no refleja en tiempo real los cambios y las condiciones físicas y mecánicas de la estructura monitorizada.

30 Un método para predecir el comportamiento de una estructura sujeta a cargas fue desarrollado por el mismo solicitante y descrito en la solicitud de patente europea EP 2.281.224 A1. El método comprende la provisión de un modelo matemático de la estructura, la detección del estado (deformación) de la estructura en una pluralidad de puntos primarios y en una pluralidad de puntos adicionales, la determinación de las cargas que actúan sobre la estructura, y asociadas al estado detectado en los puntos primarios sobre la base del modelo matemático antes mencionado, de la estimación, de la utilización de las cargas determinadas, del estado de la estructura en los puntos adicionales, y de la comparación entre el estado de la estructura estimada y la detectada en los puntos adicionales, de modo que se determine un estado intacto de la estructura si los valores estimados y detectados del parámetro de estado coinciden, o un estado defectuoso de la estructura si estos valores difieren.

40 El objeto de la presente invención es proporcionar un método mejorado para realizar diagnósticos estructurales, que sea tanto simple como flexible y que permita estimar las condiciones físicas y mecánicas de una estructura con continuidad de una manera confiable.

45 Un objeto adicional de la invención es proporcionar un método para realizar diagnósticos que pueda aplicarse sin necesidad de un cálculo excesivo y, en particular, sin necesidad de crear un modelo físico / matemático de la estructura, y que, por lo tanto, pueda implementarse a bordo de una aeronave también cuando esté en servicio o durante una misión. Los métodos de diagnóstico que no hacen uso de modelos físicos de una estructura se conocen, por ejemplo, a partir del artículo de M. Nakamura et al., "Un método para la detección de daños no paramétricos a través del uso de redes neuronales", Earthquake Engineering and Structural Dynamics [Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural], vol. 27, nº 9, páginas 997 a 1010.

50 De acuerdo a la presente invención, estos objetos se logran por medio de un método para realizar diagnósticos en una estructura mecánica que tenga los rasgos característicos definidos en la reivindicación 1.

55 Los modos de realización específicos son el objeto de las reivindicaciones dependientes, cuyo contenido ha de considerarse como parte integral o complementaria de la presente descripción. La invención también se refiere a un sistema y a un programa informático para realizar el diagnóstico de una estructura mecánica, como se reivindica.

60 En resumen, la presente invención se basa en la caracterización de una estructura mecánica examinada que está sujeta a cargas operativas capaces de provocar su deformación local (o modificar otro parámetro indicativo de su estado) y en la correlación en tiempo real de datos de deformación real (o, más generalmente, datos indicativos de la variación real del parámetro de estado pre-escogido) y de presuntos datos de deformación (o, más generalmente, de la supuesta variación del parámetro de estado pre-escogido), utilizándose una comparación de los mismos para deducir la condición intacta o defectuosa de la estructura.

65 Un defecto de la estructura puede consistir en un orificio, un orificio lleno u otras modificaciones en la superficie o volumen, por ejemplo, causadas por la inserción de un miembro de conexión, daño por impacto, delaminación, porosidad, o debido a una zona de la estructura que tiene una densidad diferente de resina o de fibra. Un defecto

puede concentrarse en un punto con coordenadas específicas o extenderse en una dirección o sobre un área o dentro de un volumen de la estructura.

5 En una realización actualmente preferida, la estructura que se está examinando está equipada con un número limitado de sensores de deformación ubicados en puntos relevantes.

10 Cabe señalar que, según la disposición pre-escogida de los puntos relevantes (o puntos de detección) en la estructura, un posible defecto concentrado, ubicado lejos de ellos, puede no causar ninguna variación en el estado de la estructura en los puntos relevantes, de modo que una carga, o vector de carga, dado da lugar a un vector de deformación que no se modifica en presencia de un defecto. Obviamente, el criterio para escoger los puntos de detección debe, preferiblemente, tener en cuenta la sensibilidad al defecto estructural en dichos puntos.

15 Una red neuronal, cuyo grado de complejidad depende de la complejidad morfológica de la estructura, se adapta sobre la base de las condiciones de estado detectadas en la estructura en los puntos relevantes por medio de la asociación con al menos una y, preferiblemente, una pluralidad de diferentes condiciones de carga. La red neuronal está diseñada para estimar una correlación entre el estado o las variaciones de estado, detectadas en un subconjunto de puntos relevantes, y el estado o la variación de estado en uno o más puntos relevantes residuales.

20 Una supuesta variación en el estado de la estructura bajo examen en un punto relevante, según una carga operativa dada, se estima por medio de la red neuronal, que ha sido entrenada adecuadamente, y se compara con el correspondiente valor real supuesto del parámetro de estado medido por el sensor asociado al punto relevante.

25 Ventajosamente, por medio de la red neuronal, para cada situación de carga, se asigna una predicción asociativa del estado, o modificación del estado, a un subconjunto de puntos relevantes y, preferiblemente, a cada punto relevante del conjunto completo de puntos relevantes, sobre la base del estado o de las modificaciones en el estado, detectadas en los otros puntos del conjunto. Por lo tanto, para cada punto y cualquier situación de carga, se puede realizar una comparación entre el valor del parámetro de estado predicho por la red neuronal para ese punto y el valor real del parámetro de estado, detectado por el sensor asociado, básicamente realizando una comparación entre el estado esperado de la estructura y el estado detectado.

30 La evaluación de diagnóstico de la estructura se realiza por medio de la identificación y la señalización de los puntos donde el valor asumido por el parámetro de estado detectado difiere del valor esperado en una magnitud mayor que un umbral de tolerancia predeterminado. Se determina un estado intacto de la estructura si los valores esperados y detectados del parámetro de estado coinciden dentro del umbral de tolerancia predeterminado, o se determina un estado defectuoso de la estructura si estos valores difieren más allá del umbral de tolerancia predeterminado.

35 La evaluación diagnóstica puede verificarse convenientemente considerando una pluralidad de diferentes situaciones de carga y, por lo tanto, mediciones de la supuesta variación del parámetro de estado, de modo que la existencia de una condición de desajuste entre los valores predichos por medio de la red neuronal y los valores detectados por los sensores en una pluralidad de situaciones de carga pueda interpretarse como una confirmación de la presencia de daños o de un defecto en la estructura, mientras que la existencia de una condición de desajuste entre valores predichos por medio de la red neuronal y valores detectados por los sensores en una situación de carga única, o en un número pequeño de situaciones de carga, junto con la existencia de una condición de coincidencia entre los valores predichos por medio de la red neuronal y los valores detectados por los sensores en una multiplicidad de diferentes situaciones de carga, puedan interpretarse como una señal ocasional.

La correlación de los puntos donde se estima la presencia de daños o de un defecto en la estructura puede interpretarse como una indicación útil del alcance del daño.

50 Ventajosamente, el método de acuerdo a la invención no requiere la construcción de un modelo complejo de la estructura de diagnóstico, por ejemplo, el modelo de elementos finitos, como se describe en el documento EP 2.281.224 A1.

55 Los rasgos y ventajas características adicionales de la invención se explicarán más claramente en la siguiente descripción detallada de un ejemplo no limitativo de una realización de la misma, proporcionada con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 muestra un ejemplo de un sistema de diagnóstico de acuerdo a la invención, aplicado a una aeronave;

60 la figura 2 muestra un ejemplo de estructura y un sistema de fuerzas que actúa sobre la misma;

la figura 3 es un diagrama de flujo del método de diagnóstico, de acuerdo a la invención; y

la figura 4 es un diagrama que ilustra un ejemplo de una red neuronal de acuerdo a la invención.

65 Un ejemplo de un sistema de diagnóstico estructural en la aplicación preferida para un avión se muestra

esquemáticamente en la figura 1.

Dicha figura muestra la aeronave, generalmente indicada con A, y algunas de sus partes estructurales, que se han de monitorizar con respecto a su condición intacta o defectuosa, por ejemplo, el fuselaje S1, la estructura de ala S2 y la unidad de cola S3. Una pluralidad de sensores, generalmente indicados con P, se muestran localizados en cada parte en N puntos de detección relevantes, adecuados para detectar un parámetro indicativo del estado de las estructuras de la aeronave, por ejemplo, en la descripción proporcionada aquí, la deformación estática local (cuando corresponda, en más de una dirección).

Los sensores están conectados a una unidad de procesamiento electrónico U, a la que se transmiten las señales respectivas que representan los parámetros detectados. Una base de datos DB está asociada a la unidad de procesamiento y está diseñada para almacenar una pluralidad de vectores que comprenden los valores asumidos por al menos un parámetro de estado predeterminado, detectado en los N puntos en diferentes condiciones de carga. Para el funcionamiento del sistema según la invención, convenientemente en una etapa de aprendizaje durante la primera etapa de funcionamiento de la estructura de diagnóstico, se registra un gran número de vectores.

La unidad de procesamiento U comprende una pluralidad de redes neuronales que están diseñadas para procesar datos con un enfoque del tipo asociativo, y el número de vectores que se registran convenientemente durante una etapa de aprendizaje depende del número de coeficientes usados por las redes neuronales que se describen a continuación y, preferiblemente, este número de vectores debería ser al menos cinco veces el número de coeficientes.

Para el i-ésimo punto P_i , donde P se encuentra entre 1 y N, una red neuronal está diseñada para determinar una correlación entre los valores asumidos por el parámetro de estado en los N-1 puntos diferentes del punto P_i y el valor asumido por el parámetro de estado en el punto P_i , en función de al menos una y, preferiblemente, una pluralidad de condiciones de carga.

Cada red neuronal es una red con Q niveles, con d_Q nodos por nivel, como se muestra en la figura 4. A modo de ejemplo, y con referencia a la figura, se describe una correlación del tipo neuronal establecida entre N puntos relevantes X_1, X_2, \dots, X_N en la entrada y un punto relevante X_F en la salida.

En primer lugar, se establece una caja neuronal que consiste en Q líneas sucesivas (por ejemplo 3), cada una con dimensiones d_1, d_2, \dots, d_Q (por ejemplo, 3 nodos por línea). El flujo lógico correlativo se muestra en la figura, de modo que cada nodo contribuya a todos los nodos del siguiente nivel.

Se define un respectivo parámetro de correlación C para cada punto de entrada relevante para cada neurona (nodo interno) y para cada punto de salida relevante. También se establece una función de correlación cruzada ϕ y se asocia a cada par de parámetros de correlación C_a, C_b un parámetro de correlación cruzada K, donde $K_{a,b} = \phi(C_a, C_b)$. Se define una función f (habitualmente, una función hiperbólica) y, para cada etapa sucesiva, se establece una correlación entre los N puntos de entrada relevantes y el punto de salida relevante de cada etapa de cálculo, indicada por $X_{i+1,j} = f((X_{i,1}, K_{(i,1),(i+1,j)}), (X_{i,2}, K_{(i,2),(i+1,j)}), \dots, (X_{i,N}, K_{(i,N),(i+1,j)})$.

Habiéndose definido esto, la adaptación de la red, basada en la disponibilidad de un número suficientemente grande de situaciones reales en las que se conocen los valores de los puntos relevantes flujo arriba de la red y el valor correspondiente del punto relevante flujo abajo de la red, consiste en definir los parámetros C que minimizan la diferencia entre el valor de salida calculado por la función f y los parámetros optimizados C, y su valor real. La minimización se puede realizar, por ejemplo, usando criterios del tipo de "mínimos cuadrados".

Por medio de N redes neuronales que han sido entrenadas adecuadamente, una para cada punto relevante, para cada situación de carga en la que se detectan deformaciones en N-1 puntos, la unidad de procesamiento puede proporcionar una predicción asociativa del valor del parámetro de estado para el punto restante.

La unidad de procesamiento está conectada además a una unidad de señalización D para indicar visualmente a un operador, tal como el piloto de la aeronave o un ingeniero de mantenimiento, por medio de información escrita y puntos correlacionados en una pantalla, o electrónicamente mediante la emisión de un informe, el estado intacto o defectuoso de las estructuras monitorizadas.

Un ejemplo de una estructura que está siendo examinada por un sistema de diagnóstico se muestra en la figura 2, en forma de un panel de fuselaje de una aeronave - generalmente indicado con 10 y mostrado en una vista plana superior y lateral - que comprende un elemento de fondo plano 20 que tiene en una superficie 22 una serie de nervaduras de refuerzo 24.

L_1 a L_K indican los vectores que representan las fuerzas que actúan sobre la estructura (que es esencialmente bidimensional) en una condición operativa predeterminada, a modo de ejemplo y por simplicidad, con componentes solo en el plano en el que se encuentra la estructura.

P_i indica puntos relevantes en la superficie de la estructura, que habitualmente se eligen basándose en un criterio de periodicidad sustancial, a excepción de cualquier agrupamiento en la vecindad de áreas que sean más críticas desde un punto de vista estructural (por ejemplo, la zona de unión de forro / contrafuerte, con el fin de diagnosticar cualquier posible desprendimiento de los contrafuertes).

5 Los sensores de deformación del tipo conocido per se se encuentran en los N puntos de detección (o puntos relevantes de la estructura) P_i ; estos sensores pueden consistir, por ejemplo, en sensores de superficie o sensores que están integrados en la estructura y que están conectados (eléctrica, óptica o inalámbricamente) a la unidad de procesamiento del sistema de diagnóstico a bordo de la aeronave, diseñado para asociar las señales adquiridas por los sensores a valores de deformación de la estructura.

10 Los sensores conocidos pueden ser, por ejemplo, del tipo de calibre de tensión, concretamente, con una señal de resistencia eléctrica que es variable según la deformación, o del tipo de fibra óptica con un enrejado de Bragg en el que la detección de la deformación se basa en la lectura de la longitud de onda que interfiere con el enrejado, directamente correlacionada con la deformación.

15 El método de diagnóstico de acuerdo a la invención se describe en detalle con referencia al diagrama de flujo que se muestra en la figura 3. El método de diagnóstico es implementado por la unidad de procesamiento U a bordo, diseñada para ejecutar grupos o módulos de programas de procesamiento y cálculo, almacenados en un disco o accesibles en la red, para realizar los procedimientos descritos.

20 En primer lugar, en la etapa 100, se determina la ubicación de los puntos relevantes en la estructura y los sensores de estado de la estructura se sitúan en estos puntos. Los sensores pueden ubicarse en la estructura después de la determinación de la topología de los puntos relevantes, o viceversa, usando una red de sensores preexistentes en la estructura; un subconjunto (o incluso todo el conjunto) de puntos relevantes correspondientes se identifica en la estructura.

25 Durante una primera etapa, por ejemplo, por medio de la misma unidad de procesamiento a bordo, y de manera definitiva (a excepción de las actualizaciones del sistema), M vectores de estado $V_{Sj} = [S_{1j}, S_{2j}, \dots, S_{Nj}]$ son adquiridos en la etapa 200 para N puntos relevantes y M diferentes condiciones de carga, con $1 < j < M$, que se almacenan en la base de datos DB.

Un vector de estado V_S de la estructura, con dimensión N , se indica como:

$$35 \quad V_S = (S_1, S_2, \dots, S_N)$$

40 donde S_1, \dots, S_N indican, cada uno, en forma abreviada, un valor del parámetro de estado (en ciertos casos, el conjunto de tres valores de los componentes de un parámetro de estado vectorial en un sistema de referencia espacial cartesiano pre-escogido) o una t -upla de valores de los parámetros de estado escogidos para indicar la condición operativa de la estructura.

45 El vector V_S puede asumir valores teóricamente infinitos, en vista de la naturaleza infinita de las cargas que pueden actuar sobre la estructura en las diferentes condiciones operativas posibles, o en un número infinito de pluralidades de puntos relevantes de rango N de la estructura, y con una pluralidad de posibles valores de intensidad.

Para los fines de la invención, se considera que cada elemento de V_S puede asumir un número discreto finito de valores, por ejemplo, debido a la discretización de la medición de los sensores que se emplean en la estructura.

50 En la realización actualmente preferida, para cada situación de carga, la unidad de procesamiento U adquiere N valores de deformación de entrenamiento $[\epsilon_{1i}, \epsilon_{2i}, \dots, \epsilon_{Ni}]$, uno para cada punto relevante P_i . Para M diferentes condiciones de carga, la unidad de procesamiento adquiere M vectores de deformación, cada uno con N puntos. Los M vectores de N puntos se almacenan en la base de datos DB.

55 Luego, en la etapa 300, se realiza una etapa para entrenar las N redes neuronales (una para cada punto relevante), configurando, para la red neuronal asociada al i -ésimo punto P_i , una condición de valores de entrada iguales a los valores de la deformación detectada en los $N-1$ puntos relevantes diferentes al P_i y almacenados en DB, y un valor de salida que representa el valor de la deformación detectada en el i -ésimo punto relevante P_i , que también se almacena en DB. Cada red neuronal crea una asociación entre las deformaciones en $N-1$ puntos y la del punto relevante P_i al que está asociada, de modo que la unidad de procesamiento tenga a su disposición N leyes asociativas, del tipo descrito anteriormente, para el valor de la deformación de un punto P_i y cada uno de los otros $N-1$ puntos, para cada valor de i que esté entre 1 y N .

60 Cada red neuronal se configura durante una etapa de entrenamiento realizada ventajosamente durante la primera etapa operativa de la estructura. Con fines de entrenamiento, preferiblemente, se usan los datos de M diferentes condiciones de carga, donde M puede elegirse en función del número de coeficientes C utilizados por la red

neuronal y, convenientemente, debería ser al menos cinco veces el número de coeficientes C para lograr un entrenamiento satisfactorio.

- 5 En el caso de una pluralidad de condiciones de carga, se puede hacer una comparación, para cada punto, entre la deformación predicha, obtenida por medio de la red neuronal durante el entrenamiento, usando como valor de entrada las otras N-1 deformaciones en la nueva condición de carga, y la efectivamente detectada en el punto en esta condición. Con este enfoque, es posible evaluar el grado de progreso del entrenamiento, que puede prolongarse, si es necesario, para condiciones de carga adicionales.
- 10 Ventajosamente, para un entrenamiento eficaz, los puntos relevantes se seleccionan basándose en criterios estructurales y estadísticos (de variabilidad).

- 15 Al final del procedimiento de entrenamiento, el funcionamiento de las redes neuronales puede verificarse en la etapa 400 comparando los valores de salida previstos por la red entrenada, para valores de entrada dados, con los valores de salida utilizados durante el entrenamiento, y evaluando si la diferencia, considerada en un punto específico y como un promedio, supera un umbral fijo y, en el caso donde se establece un funcionamiento incorrecto (es decir, la diferencia supera, en un punto específico y/o como promedio, el umbral fijo de al menos uno, o un número mínimo predeterminado, de los mismos), se aumenta el número de diferentes condiciones de carga a utilizar para realizar la detección de las condiciones de estado en los puntos relevantes, generando nuevos vectores de deformación de
- 20 entrenamiento $[\epsilon_{11}, \epsilon_{21}, \dots, \epsilon_{N1}]$ que se almacenan en la base de datos DB (etapa 200) y en los que se lleva a cabo el entrenamiento de las redes neuronales (300) nuevamente.

- 25 En el caso donde el funcionamiento incorrecto de al menos una red neuronal, o donde se determina un número mínimo predeterminado de tales redes, varias veces mayor que un umbral predeterminado, la topología de los puntos relevantes se modifica (etapa 100), mediante la adición o sustitución de puntos y, a continuación, las etapas para la adquisición de M' vectores de deformación de entrenamiento $[\epsilon_{11}, \epsilon_{21}, \dots, \epsilon_{N1}]$ para N' puntos relevantes y M' diferentes condiciones de carga, el almacenamiento de los mismos en la base de datos DB y el entrenamiento de las N' redes neuronales se repiten en la etapa 300. En el caso de que persista un funcionamiento incorrecto, además de prolongar el período de entrenamiento, es posible prever la modificación del número de niveles y/o de nodos por
- 30 nivel de la red neuronal y/o la modificación de la función (tipo de función) f y ϕ .

- 35 Si se establece el funcionamiento correcto de las redes neuronales, la unidad de procesamiento está configurada para realizar diagnósticos de la estructura, sujeto a cualquier actualización (por ejemplo, periódica) de los vectores de deformación, y al correspondiente entrenamiento nuevo de las redes neuronales, por ejemplo, a continuación de modificaciones en la estructura o del envejecimiento de la misma.

Las operaciones para realizar diagnósticos de la estructura se describen a continuación.

- 40 Suponiendo que para una carga dada, o una pluralidad dada de cargas, haya una distribución de deformaciones ϵ_P en la cuadrícula de N puntos relevantes P_i de la estructura, donde $1 < i < N$, $(\epsilon_P)_q$ indica una distribución de deformaciones en la cuadrícula, inducida por la misma carga, o la pluralidad de cargas, en presencia de un defecto estructural y, más generalmente, $(\epsilon_P)_d$ indica una distribución de las deformaciones detectadas por los sensores.

- 45 En cada instante, en la etapa 500 se detecta el estado actual $(\epsilon_P)_d$ de la estructura en los puntos relevantes para una condición de carga actual dada, por ejemplo, se detecta el vector de deformaciones actuales $[\epsilon_{1d}, \dots, \epsilon_{id}, \dots, \epsilon_{Nd}]$.

- 50 Luego, en la etapa 600, para cada punto P_i , con $1 < i < N$, el valor de la deformación ϵ'_i se calcula por medio de la red neuronal asociada previamente entrenada, usando entradas que incluyen los valores de deformación detectados en los otros puntos $(\epsilon_{1d}, \dots, \epsilon_{(i-1)d}, \epsilon_{(i+1)d}, \dots, \epsilon_{Nd})$.

- 55 A continuación, en la etapa 700, para cada punto y cualquier situación de carga, se lleva a cabo una comparación entre el valor del parámetro de estado predicho por la red neuronal y el valor del parámetro de estado detectado por el sensor. Específicamente, se realiza la comparación entre el valor de la deformación ϵ_{id} detectada en el punto P_i y el valor de la deformación ϵ'_i calculada por la red neuronal respectiva en el mismo punto, repitiendo la comparación para cada i, donde $1 < i < N$.

- 60 Por lo tanto, se realiza una evaluación de diagnóstico efectiva mediante la comparación, en cada punto, entre el estado estructural esperado y el estado estructural detectado. La identificación de defectos en la estructura se realiza para aquellos puntos en los que el estado estructural detectado difiere del estado esperado, calculado por medio de la red neuronal respectiva (es decir, existe un desajuste), más allá de un umbral porcentual predeterminado.

5 Si el resultado de la comparación es el reconocimiento de una condición en la que hay una coincidencia significativa de los valores, teniendo en cuenta una tolerancia predeterminada, el método de diagnóstico concluye que la estructura está intacta (800), señalizando esta condición, por medio de una unidad de señalización D, a un operador, tal como el piloto de la aeronave o un ingeniero de mantenimiento, visualmente por medio de información escrita y puntos correlacionados en una pantalla, o electrónicamente por medio de la emisión de un informe, a fin de indicar el estado intacto de la estructura monitorizada.

10 Si el resultado de la comparación es el reconocimiento de una condición en la que existe una falta de coincidencia significativa entre los valores, que supera una tolerancia predeterminada, el método de diagnóstico interpreta una posible condición defectuosa de la estructura (900). En consecuencia, el método repite la etapa 500 para detectar el estado de la estructura en los puntos relevantes seleccionados, durante un instante sucesivo, para la condición de carga actual. Luego repite la etapa 600 para cada punto P_i , donde $1 < i < N$, calculando el valor del parámetro de estado por medio de la red neuronal asociada, previamente entrenada y, finalmente, de nuevo en la etapa 700, se realiza la comparación entre el valor de el parámetro de estado detectado en el punto P_i y el valor del parámetro de estado calculado por la red neuronal en el mismo punto, para cada i , donde $1 < i < N$.

20 El ciclo de operaciones en las etapas 500 a 700 se repite un número predeterminado de veces, verificando si se ha alcanzado un número predeterminado de repeticiones en la etapa de comparación 1000, a menos que sea reconocida definitivamente una condición en la que haya una coincidencia significativa entre los valores y, por lo tanto, una condición intacta de la estructura.

25 Si en la etapa de comparación 1000 se determina que se ha alcanzado el número predeterminado de repeticiones y permanece la indicación de un estado defectuoso de la estructura, se emite una señal (1100), por medio de la unidad de señalización D, a un operador, tal como el piloto de la aeronave o un ingeniero de mantenimiento, visualmente en forma de información escrita y puntos correlacionados en una pantalla, o electrónicamente por medio de la emisión de un informe, a fin de indicar el estado defectuoso de la estructura monitorizada y su ubicación (esto es, la identificación del punto P_i donde no hay ninguna coincidencia entre el valor del parámetro de estado detectado y el valor de este parámetro calculado por la red neuronal).

30 La evaluación del diagnóstico se puede verificar adicionalmente considerando diferentes situaciones de carga y, por lo tanto, mediciones del estado de la estructura: si la falta de coincidencia se repite para diferentes condiciones de carga, esto puede interpretarse como una confirmación de la presencia de daños o un defecto en la estructura que induce una variación en el estado. Si la falta de coincidencia no se repite, esto puede interpretarse como una señal ocasional o espuria, no causada por factores físicos reales.

40 La evaluación de diagnóstico descrita anteriormente se realiza para cada punto relevante de la estructura. La correlación de los puntos donde se determina la presencia de daños o de un defecto en la estructura proporciona una indicación de la magnitud del daño. Por ejemplo, la determinación de daños o de un defecto en varios puntos adyacentes es una indicación de un área delaminada.

45 Obviamente, como será evidente para una persona experta en la técnica, el método, concluido como se ilustra en el diagrama de flujo mostrado en la figura, puede repetirse cíclicamente, por ejemplo, a intervalos periódicos predeterminados de acuerdo a un programa de monitorización predeterminado.

50 Ventajosamente, para permitir el funcionamiento del sistema también en el caso de daños a la estructura en la proximidad de algunos de los puntos de detección, es decir, allí donde hay daños en los sensores, se crea un excedente aumentando el número de puntos de detección relevantes a fin de tener una cierta cantidad de sensores de respaldo adicionales.

Obviamente, sin afectar al principio de la invención, las realizaciones y los detalles de construcción pueden modificarse en gran medida con respecto a los descritos e ilustrados meramente a modo de ejemplo no limitativo, sin apartarse por ello del alcance de la invención según lo definido en las reivindicaciones que se acompañan.

REIVINDICACIONES

1. Método para realizar diagnósticos de una estructura (S1 a S3) sujeta a cargas, particularmente, una estructura de aeronave (A), por medio de una disposición de sensores que está asociada a dicha estructura (S1 a S3) y diseñada para detectar al menos un estado de la estructura, y que comprende una matriz de sensores (P) que están ubicados en puntos relevantes (P_i) de la estructura (S1 a S3) y cada uno de los cuales es capaz de detectar un parámetro físico indicativo del estado local de la estructura (S1 a S3) y de emitir una respectiva señal de respuesta eléctrica, correlacionada con el valor asumido por dicho parámetro, comprendiendo el método:
- 5 en una etapa de aprendizaje (100 a 300):
- (a) basándose en una pluralidad de datos de entrenamiento indicativos del estado de la estructura (S1 a S3) en una pluralidad de puntos de detección relevantes (P_i) por asociación con al menos una condición de carga, establecer (300) una relación asociativa, por medio de al menos una red neuronal, entre los valores asumidos por dicho parámetro, indicativos del estado de la estructura en un subconjunto de dicha pluralidad de puntos de detección relevantes, y los valores del parámetro de estado en al menos un punto de detección relevante residual; y
- 15 en una etapa operativa:
- (b) detectar (500) los valores asumidos por dicho parámetro, indicativos del estado de la estructura en una pluralidad de puntos de detección relevantes (P_i) en dicha al menos una condición de carga;
- (c) basándose en la relación asociativa preestablecida, usando los valores asumidos por dicho parámetro, indicativos del estado de la estructura en un subconjunto de dicha pluralidad de puntos de detección, estimar (600) los valores del parámetro de estado en al menos un punto de detección residual;
- 25 (d) comparar (700) los valores estimados y los valores detectados del parámetro de estado en dicho al menos un punto de detección residual; y
- (e) determinar un estado intacto de la estructura (800) si los valores detectados y estimados del parámetro de estado coinciden esencialmente, teniendo en cuenta las tolerancias predeterminadas, o determinar un estado defectuoso de la estructura (900, 1000) si dichos valores del parámetro de estado difieren, teniendo en cuenta las tolerancias predeterminadas.
- 30 2. Método de acuerdo a la reivindicación 1, en el que la comparación (700) entre los valores estimados y detectados del parámetro de estado se lleva a cabo para cada punto de detección relevante (P_i).
3. Método según la reivindicación 1 o 2, en el que dicha etapa de aprendizaje (100 a 300) y dicha etapa de funcionamiento (500 a 1000) se llevan a cabo en una pluralidad de diferentes condiciones de carga, por lo que se determina un estado defectuoso de la estructura cuando hay una condición de desajuste entre los valores estimados y detectados del parámetro de estado en una pluralidad de condiciones de carga, mientras que la señalización ocasional ocurre cuando hay una condición de desajuste entre los valores estimados y detectados del parámetro de estado en una sola condición de carga o en un número de condiciones donde hay una carga menor que un umbral.
- 40 4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la etapa de aprendizaje incluye recoger (200) una pluralidad de datos de entrenamiento en forma de vectores que comprenden los valores asumidos por al menos un parámetro de estado predeterminado, detectado en los puntos relevantes, en al menos una condición de carga.
- 45 5. Método de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que una pluralidad de redes neuronales están asociadas respectivamente con dichos puntos relevantes (P_i) y la etapa de aprendizaje comprende, para cada red neuronal, determinar una relación asociativa entre los valores asumidos por dicho parámetro indicativo del estado de la estructura en al menos una condición de carga en el punto de detección relevante, correspondiente a dicha red, y los valores asumidos por el parámetro de estado en la pluralidad restante de puntos de detección relevantes.
- 50 6. Método según la reivindicación 5, en el que la etapa de aprendizaje comprende, en el caso de una pluralidad de condiciones de carga, una comparación entre el valor del parámetro de estado, estimado por medio de la red neuronal durante el entrenamiento en al menos un punto relevante, y el valor asumido por el parámetro de estado en dicho al menos un punto relevante, en una nueva condición de carga.
- 60 7. Método según la reivindicación 6, que comprende monitorizar (400) el aprendizaje de las redes neuronales mediante una comparación entre el valor del parámetro de estado, estimado en al menos un punto relevante residual, basándose en datos de entrenamiento indicativos del estado de la estructura para un subconjunto de dicha pluralidad de puntos de detección relevantes, y el valor del parámetro de estado de entrenamiento en dicho punto relevante residual, considerándose el aprendizaje como completado si la diferencia entre los valores mencionados
- 65

anteriormente es menor que un umbral predefinido, o insatisfactorio de otro modo, por lo que se aumenta el número de diferentes condiciones de carga en las que se lleva a cabo la etapa de aprendizaje, o se modifica la topología de los puntos relevantes, o se modifica al menos uno entre el número de niveles, el número de nodos por nivel y una función característica de las redes neuronales.

5 8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que se determina un estado defectuoso de la estructura si dichos valores del parámetro de estado difieren, teniendo en cuenta las tolerancias predeterminadas, después de una secuencia temporal de un número predeterminado de iteraciones de las etapas (b), (c) y (d).

10 9. Método de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, caracterizado porque se repite a intervalos periódicos predeterminados de acuerdo a un plan de monitorización preestablecido.

15 10. Método de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que la correlación de los puntos relevantes (P_i), durante la cual se estima la condición defectuosa de la estructura, se interpreta como una indicación del alcance de dicha condición defectuosa.

20 11. Método de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dicho parámetro indicativo del estado de la estructura es la deformación local de la estructura.

12. Método de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en el que dichos puntos de detección relevantes (P_i) se eligen en base a un criterio de periodicidad, excepto por cualquier agrupamiento en la proximidad de áreas de mayor criticidad estructural.

25 13. Sistema para realizar diagnósticos de una estructura (S1 a S3) sujeta a cargas, particularmente, una estructura de aeronave (A), que comprende:

30 - una disposición de sensores que está asociada a dicha estructura y diseñada para detectar al menos un estado de la estructura, y que comprende una matriz de sensores (P) que están ubicados en puntos relevantes (P_i) de la estructura (S1 a S3), y cada uno de los cuales es capaz de detectar un parámetro físico indicativo del estado local de la estructura, y de emitir una respectiva señal de respuesta eléctrica, correlacionada con el valor asumido por dicho parámetro; y

35 - medios de procesamiento de aprendizaje electrónico (U) del tipo de red neuronal, dispuestos para implementar un método de acuerdo a una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

40 14. Sistema según la reivindicación 13, en el que dichos medios de procesamiento (U) comprenden una pluralidad de redes neuronales asociadas respectivamente a dichos puntos relevantes (P_i), en donde cada red neuronal es una red con Q niveles, con d_Q nodos por nivel, estando definido para cada nodo un respectivo parámetro de correlación C, asociando una función de correlación cruzada ϕ un parámetro de correlación cruzada K con cada par de parámetros de correlación C_a, C_b , con $K_{a,b} = \phi(C_a, C_b)$, determinando una función hiperbólica f una correlación entre cada nodo de un nivel $X_{i+1, j}$ y los nodos del nivel precedente $X_{i,j}$, como una función de dicho parámetro de correlación cruzada, como:

45
$$X_{i+1,j} = f((X_{i,1}, K_{(i,1),(i+1,j)}), (X_{i,2}, K_{(i,2),(i+1,j)}), \dots, (X_{i,N}, K_{(i,N),(i+1,j)}),$$

incluyendo el entrenamiento de la red la determinación de los parámetros C que minimizan la diferencia entre el valor de salida calculado y su valor real.

50 15. Sistema según una cualquiera entre las reivindicaciones 13 o 14, en el que dichos medios de procesamiento (U) están conectados a una unidad de señalización (D) para indicar a un operador el estado defectuoso o intacto de las estructuras monitorizadas.

55 16. Sistema según una cualquiera de las reivindicaciones 13 a 15, en el que dichos sensores de detección (P) incluyen sensores para detectar la deformación de la estructura.

60 17. Programa de procesamiento o grupo de programas que pueden ejecutarse mediante un sistema de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones 13 a 16, que comprende uno o más módulos de código para implementar un método para realizar diagnósticos de una estructura sujeta a cargas, de acuerdo a una cualquiera cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12.

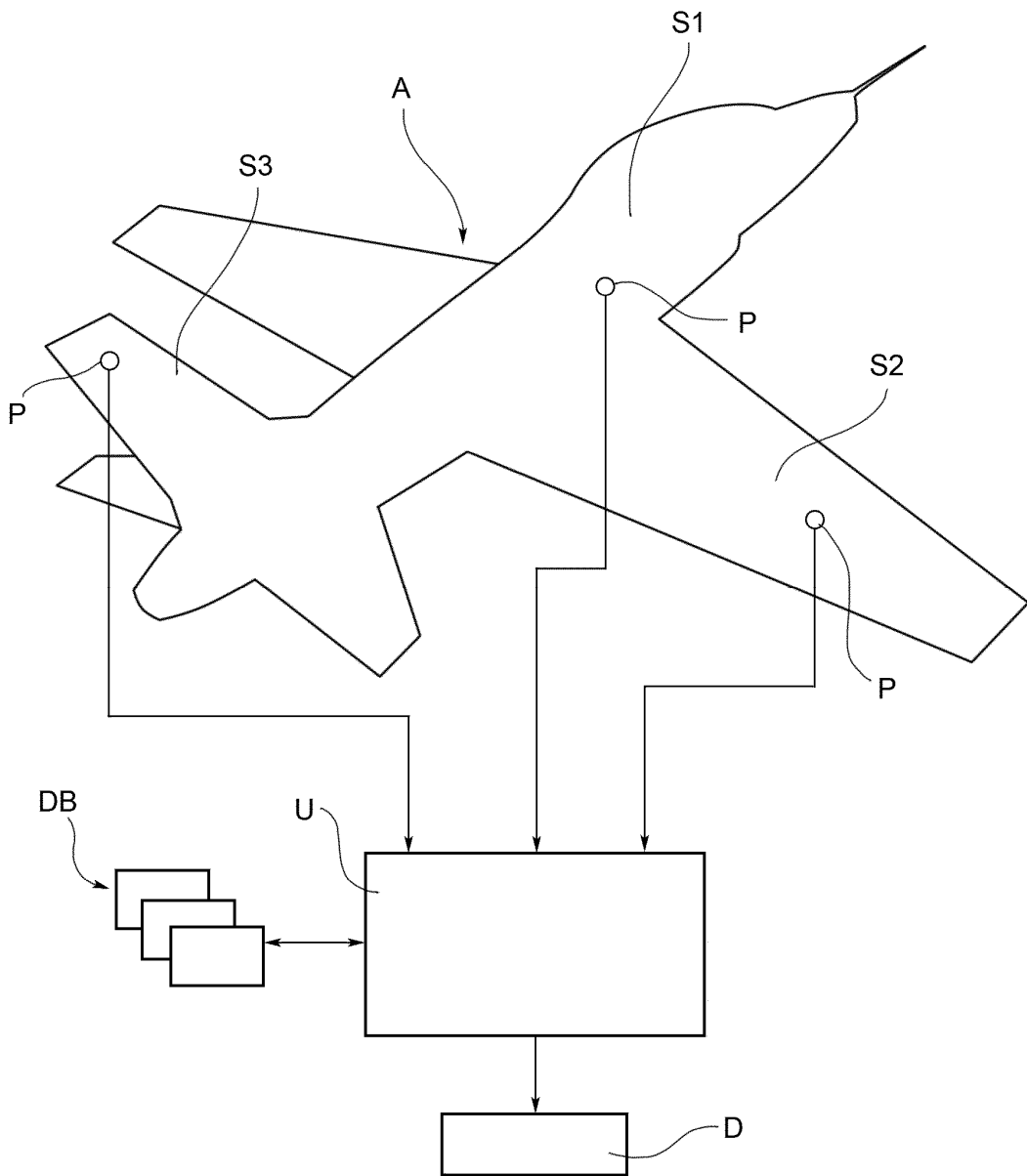


FIG. 1

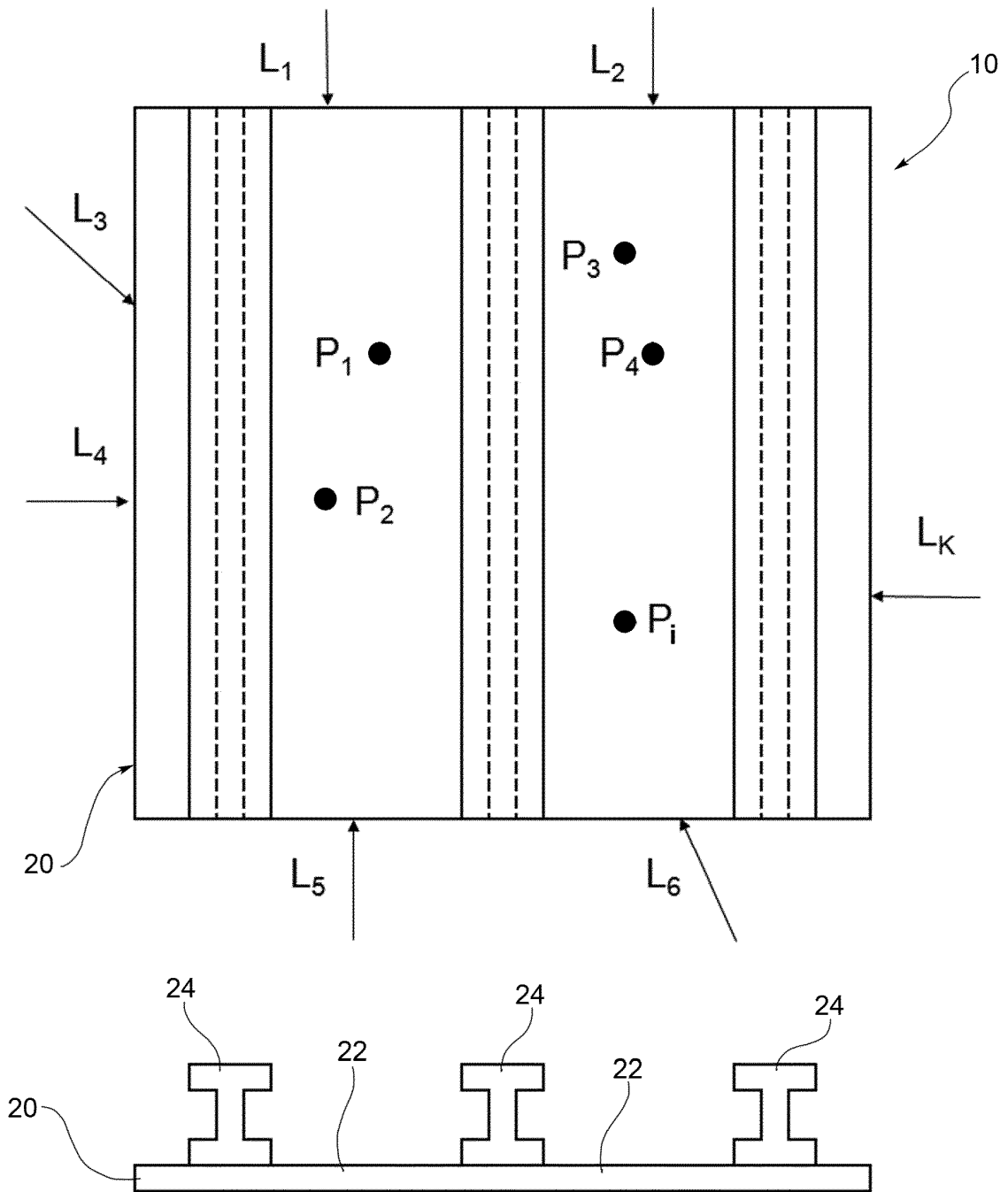


FIG. 2

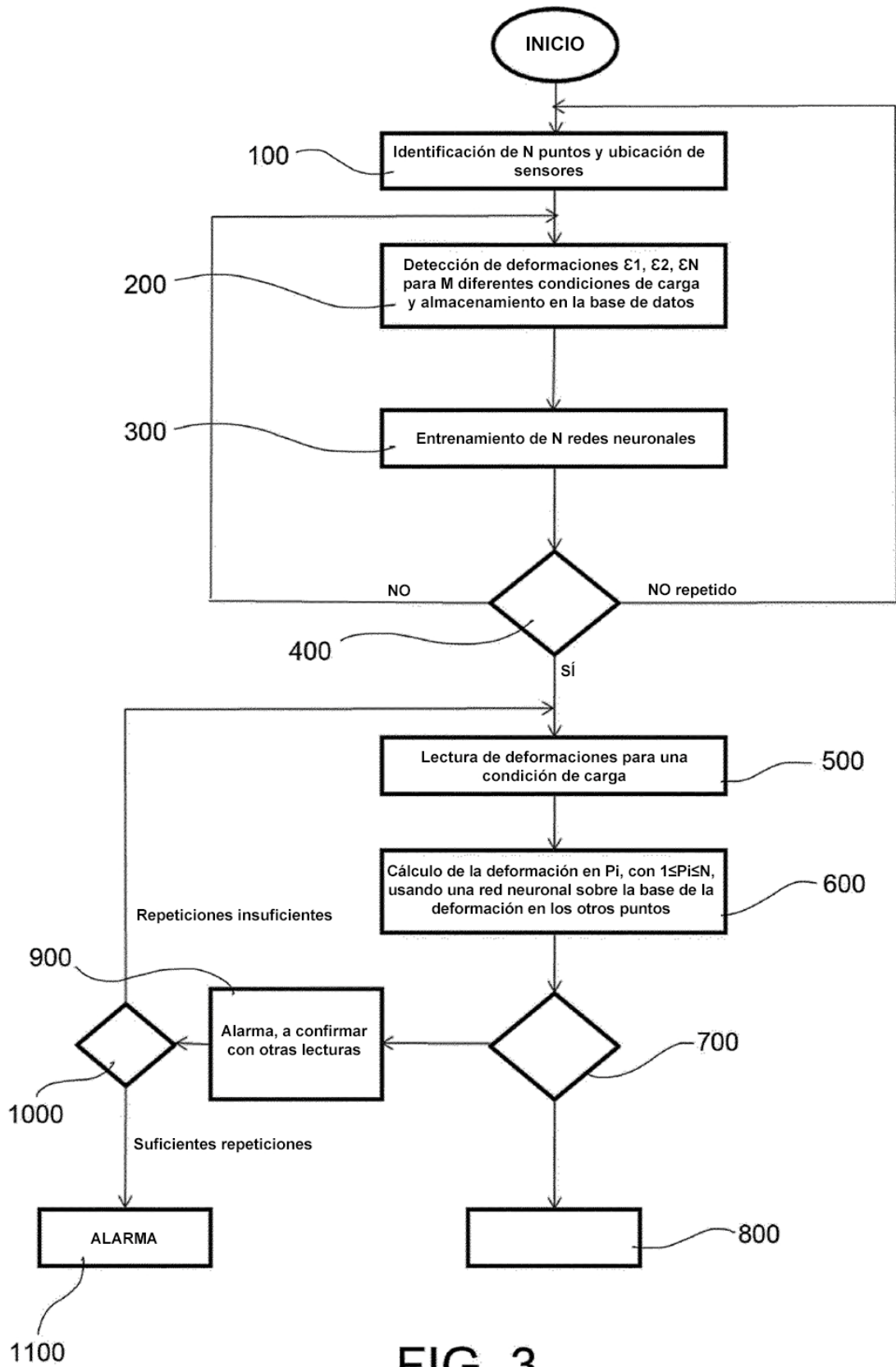


FIG. 3

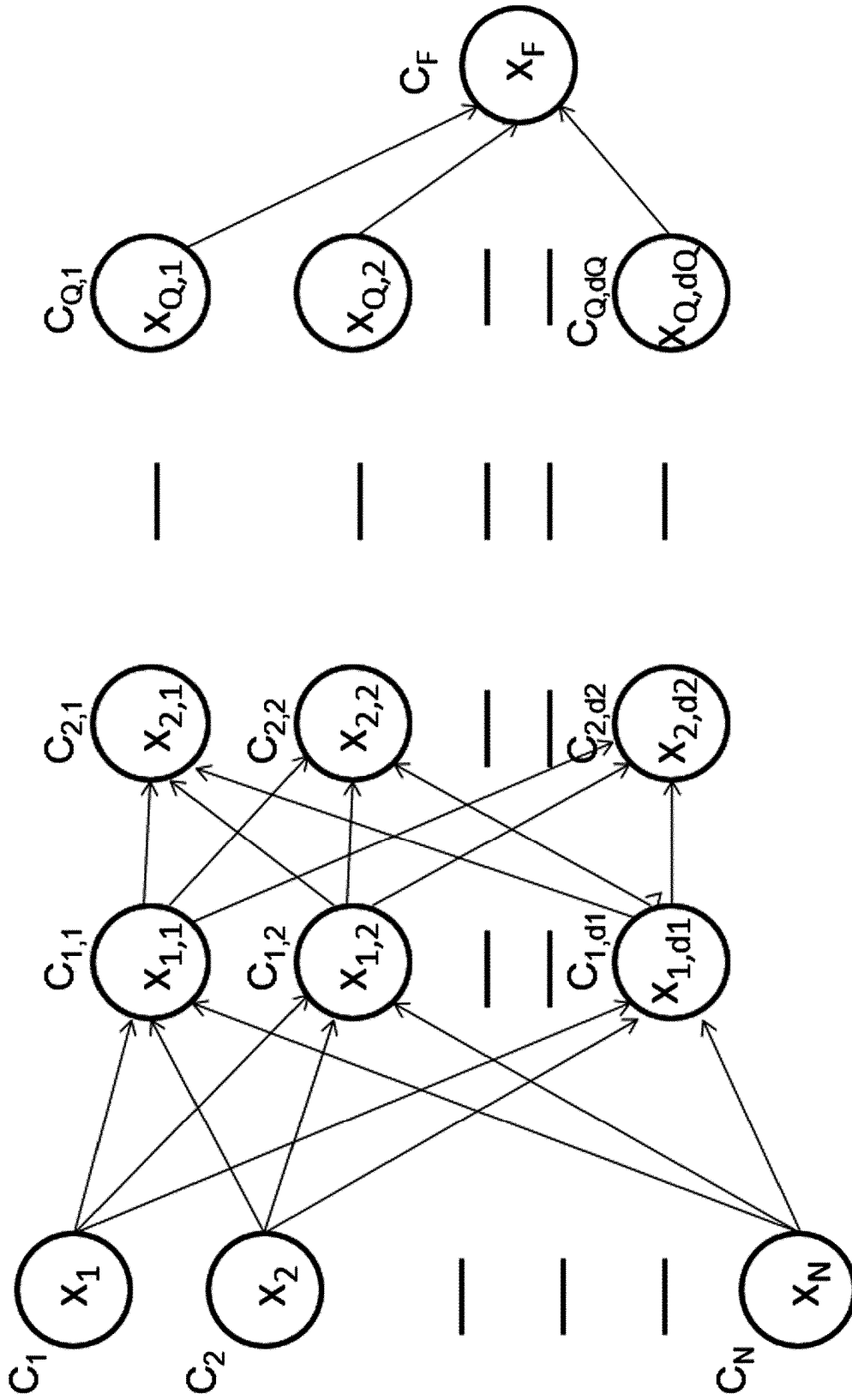


FIG. 4