

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 988 866**

51 Int. Cl.:

G06Q 10/04 (2013.01)

G06F 30/23 (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **06.11.2020** **PCT/IB2020/060441**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **03.06.2021** **WO21105803**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.11.2020** **E 20807508 (5)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2024** **EP 4066178**

54 Título: **Métodos y sistemas para modelado de orden reducido basado en componentes para gemelos digitales estructurales de escala industrial**

30 Prioridad:

25.11.2019 US 201916694080

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
22.11.2024

73 Titular/es:

AKSELOS S.A. (100.0%)
EPFL Innovation Park, Building D
1015 Lausanne, CH

72 Inventor/es:

KNEZEVIC, DAVID JOHN y
SABBEY, BRIAN GEORGE

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 988 866 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

Métodos y sistemas para modelado de orden reducido basado en componentes para gemelos digitales estructurales de escala industrial

Antecedentes

5 El enfoque tradicional de gestión de maquinaria e infraestructura industrial desde el punto de vista de la integridad estructural consiste en realizar un análisis exhaustivo durante el diseño para intentar evaluar todas las condiciones operativas relevantes y, con base en este análisis, decidir (i) la vida útil operativa del activo, y (ii) un esquema prescriptivo (a menudo basado en intervalos de tiempo fijos) para la inspección, el mantenimiento y la reparación. Una observación clave de este trabajo es que esta metodología prescriptiva basada en el diseño está fundamentalmente limitada por la gran cantidad de incertidumbre sobre cuáles serán las verdaderas condiciones de operación del activo. Por ejemplo, consideremos el caso de un buque de alta mar. El buque está diseñado con base en suposiciones sobre las condiciones ambientales (olas, viento, agua de mar corrosiva) y las condiciones de operación (carga, número y frecuencia de los ciclos de carga/descarga) a las que estará sometido. Pero, por supuesto, las condiciones operativas futuras se desconocen en el momento del diseño, por lo que la única opción es hacer suposiciones conservadoras e incorporar factores de seguridad importantes para compensar la incertidumbre. En la práctica, cuando se confía plenamente en este tipo de análisis de tiempo de diseño, se produce un diseño excesivo de los activos (con los correspondientes gastos de capital excesivos) o un desmantelamiento prematuro en comparación con la capacidad real de una estructura, o ambas cosas. Además, incluso con suposiciones de diseño conservadoras, existe un riesgo constante de que se produzcan circunstancias imprevistas durante las operaciones que vayan más allá del "peor de los casos" asumidos durante el diseño, como condiciones meteorológicas extremas o accidentes. Además, hay un movimiento cada vez mayor hacia el diseño eficiente, especialmente en campos como el de las energías renovables, donde la viabilidad económica de los proyectos suele estar cerca del punto de equilibrio, donde los márgenes de seguridad son lo más limitados posible para reducir los costes, lo que aumenta aún más la probabilidad de que un activo supere su capacidad operativa aprobada. Esto conlleva riesgos para la salud y la seguridad y también puede provocar daños que acorten la vida útil de los activos o requieran costosas intervenciones correctivas. Por lo tanto, se necesitan soluciones que proporcionen modelos de condiciones y recomendaciones para el mantenimiento y la seguridad a lo largo de la vida operativa de un activo físico.

Con respecto al estado de la técnica, el artículo "Gemelo Digital Basado en RB-FEA para la Evaluación de la Integridad Estructural de Estructuras Marinas" de Sharma y otros describe un sistema de simulación para ciertas estructuras que permite modelar los defectos y evaluar los daños.

Breve compendio

En un aspecto, un método para mantener un activo físico basado en las recomendaciones generadas al analizar un modelo del activo físico, el modelo comprende una pluralidad de componentes y forma un gemelo digital basado en la física del activo físico, incluye construir, mediante un dispositivo informático, usando una aproximación de elementos de base reducidos con condensación estática reducida en puertos de al menos una parte de una ecuación diferencial parcial, un modelo compuesto de una pluralidad de modelos, cada uno de la pluralidad de modelos representando al menos uno de una pluralidad de componentes, cada uno de la pluralidad de componentes representando al menos una región de un activo físico. El método incluye analizar, mediante el dispositivo informático, para al menos un modelo de la pluralidad de modelos, un indicador de error que identifica un nivel de error asociado con el al menos un modelo, para determinar que el nivel de error identificado supera un nivel de tolerancia. El método incluye aumentar, mediante el dispositivo informático, un número de funciones básicas en la aproximación de elementos de base reducidos por condensación estática reducida en puertos, con base en la determinación de que al menos un modelo tiene un nivel de error que supera el nivel de tolerancia. El método incluye repetir el análisis de errores y aumentar las funciones de base para cada modelo de la pluralidad de modelos hasta que el nivel de error de cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel de tolerancia. El método incluye recibir, mediante el dispositivo informático, desde una primera fuente de datos operativos asociada con el activo físico, los primeros datos operativos asociados con al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro de al menos un componente en la pluralidad de componentes. El método incluye actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los primeros datos operativos recibidos. El método incluye proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado.

Breve descripción de los dibujos

Lo anterior y los objetos, características y ventajas de uno o más aspectos son evidentes a partir de la siguiente descripción detallada, tomada junto con los dibujos adjuntos, en los que:

La FIG. 1A es una ilustración que representa cómo se puede obtener un modelo de elementos finitos a nivel de sistema conectando una pluralidad de componentes;

la FIG. 1B representa un modelo de casco, actualizado con base en al menos un valor dentro de un informe de inspección;

la FIG. 1C representa modelos de casco actualizados usados para generar informes de verificación de pandeo automatizados;

la FIG. 2A es un diagrama de bloques que representa una modalidad de un sistema para mantener un activo físico con base en las recomendaciones generadas al analizar un modelo del activo físico, comprendiendo el modelo una pluralidad de componentes y formando un gemelo digital basado en la física del activo físico;

Haciendo referencia ahora a la FIG. 2B, un diagrama de bloques representa una visualización del método 200 que da como resultado un hilo digital para una estructura flotante en alta mar.

Haciendo referencia ahora a la FIG. 2C, un diagrama de bloques representa una visualización del método 200 que da como resultado un hilo digital para una estructura flotante en alta mar.

la FIG. 3 es un diagrama de flujo que representa una realización de un método para mantener un activo físico con base en las recomendaciones generadas analizando un modelo del activo físico, comprendiendo el modelo una pluralidad de componentes y formando un gemelo digital basado en la física del activo físico; y

las FIG. 4A-4C son diagramas de bloques que representan realizaciones de ordenadores útiles en relación con los métodos y sistemas descritos en el presente documento.

Descripción detallada

Los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan funcionalidad para mantener un activo físico con base en las recomendaciones generadas al analizar un modelo del activo físico, comprendiendo el modelo una pluralidad de componentes y formando un gemelo digital del activo físico basado en la física. Además de mantener el activo físico, los métodos y sistemas descritos en el presente documento pueden proporcionar una funcionalidad para identificar uno o más aspectos del activo físico que deben inspeccionarse (por ejemplo, estar sujeto a una inspección física). Además de mantener el activo físico, los métodos y sistemas descritos en el presente documento pueden proporcionar una funcionalidad para determinar el nivel de viabilidad de una modificación propuesta del activo físico. Además de mantener el activo físico, los métodos y sistemas descritos en el presente documento pueden proporcionar una funcionalidad para determinar el nivel de viabilidad del activo físico.

Los métodos y sistemas descritos en el presente documento pueden proporcionar la funcionalidad para realizar la monitorización y la reevaluación de la integridad estructural durante la operación, lo que puede permitir la identificación de la capacidad adicional presente en el activo (y, por lo tanto, puede evitar el desmantelamiento anticipado) o regímenes de mantenimiento demasiado onerosos, al tiempo que rastrean el impacto de eventos extremos o impredecibles para garantizar la seguridad y la confiabilidad. En algunos casos, este objetivo de seguimiento de activos y monitorización de integridad durante las operaciones motiva el concepto de un gemelo digital estructural. El término gemelo digital puede referirse a una réplica informática de un activo físico que se mantiene sincronizada con el activo durante su vida operativa, con base en los datos de inspección y sensores, por ejemplo. Un gemelo digital estructural puede referirse al caso específico en el que el propósito del gemelo digital es evaluar la integridad estructural con base en el estado "tal como es" del activo. Las actualizaciones de un gemelo digital estructural pueden capturar cualquier cambio estructural relevante en el activo y pueden basarse, por ejemplo, en datos de inspección (por ejemplo, inspección visual, mediciones de espesor por ultrasonidos, escaneos láser) o mediciones de sensores (por ejemplo, acelerómetros, galgas extensométricas, monitorización ambiental). Esta inspección e instrumentación reducen significativamente, si no eliminan, la incertidumbre asociada con las condiciones de operación, ya que permiten actualizar continuamente el gemelo digital para reflejar el verdadero estado del activo y su entorno. Por lo tanto, mediante este enfoque, los usuarios de los métodos y sistemas descritos en este documento pueden desarrollar planes de gestión de activos actualizados informados por el gemelo digital estructural (por ejemplo, para la inspección, el mantenimiento, la reparación, los cambios en las condiciones operativas permitidas, la respuesta a daños o accidentes o la prolongación de la vida útil de los activos) en lugar de confiar en los planes que se desarrollaron en el momento del diseño. Además, cabe señalar que se pueden proporcionar gemelos digitales estructurales para activos físicos dentro de sistemas industriales, como estructuras marinas fijas o flotantes, aeronaves, maquinaria minera, maquinaria rotativa o recipientes a presión. Los métodos y sistemas descritos en el presente documento, por lo tanto, incluyen un marco de trabajo de modelado de orden reducido basado en componentes con base en el método de Elementos de Base Reducidos por Condensación Estática (SCRBE) que permite un análisis estructural rápido, holístico, detallado y paramétrico de sistemas industriales a gran escala. Esta metodología apoya las necesidades de modelado de los gemelos digitales estructurales, donde un gemelo digital estructural es un modelo detallado basado en la física de un sistema estructural que rastrea el estado "tal como es" del sistema durante su vida operativa. A continuación se analizará con más detalle una serie de ejemplos numéricos que ilustran las capacidades únicas del enfoque SCRBE para incorporar datos de inspección y/o sensores, realizar de manera eficiente análisis detallados de integridad estructural y permitir el postprocesamiento y la generación de informes para respaldar la toma de decisiones basada en datos durante la operación de sistemas estructurales críticos.

Los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan funcionalidad para generar y actualizar gemelos digitales estructurales que satisfacen cuatro propiedades: modelado holístico y detallado, velocidad, modelado paramétrico y cumplimiento de estándares y precisión certificable.

Los gemelos digitales estructurales deberían permitir la "detección" de todo un sistema para identificar las "ubicaciones de fallo" más probables, por ejemplo, en los puntos críticos de estrés y fatiga, para que estos lugares puedan priorizarse en la planificación de las inspecciones, por ejemplo. Para permitir este tipo de evaluación, se usa un modelo holístico y detallado para resolver con precisión el estrés en todos los componentes del activo físico. Para obtener el máximo conocimiento de los datos de inspección y los datos de sensores, un gemelo digital estructural debe representar un activo completo como un modelo holístico y debe proporcionar un nivel de detalle suficiente de manera que todos los datos relevantes puedan mapearse de manera precisa en el gemelo digital. Mediante este enfoque, el gemelo digital puede capturar los efectos locales, no locales y acumulativos de todas las actualizaciones (por ejemplo, modificaciones, defectos, daños) que se han medido u observado. Este es un aspecto de la evaluación del estado "tal cual" del activo que permite al sistema garantizar que el efecto acumulado de todas las actualizaciones hasta la fecha no genere puntos críticos de estrés nuevos e inesperados ni modos de falla previstos. El modelado holístico y detallado también es deseable desde el punto de vista de la eficiencia del flujo de trabajo, en el sentido de que un modelo que incorpore en detalle todos los datos de activos actualizados proporciona una "fuente única de verdad" sobre el estado actual del activo y evita la necesidad de gestionar una multitud de modelos localizados independientes.

Un informe de estado de un gemelo digital estructural normalmente implica resolver miles de casos de carga diferentes, por ejemplo, realizar una estimación de la vida útil de las piezas críticas o realizar una comprobación de resistencia con base en los estándares industriales pertinentes en una amplia gama de escenarios "y si". Para que un operador pueda usar el gemelo digital para informar la toma de decisiones basada en datos, toda la batería de resultados del análisis debe completarse con la suficiente rapidez de modo que el informe de situación esté disponible a tiempo para el proceso de toma de decisiones. Por lo tanto, los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan una funcionalidad para generar y actualizar gemelos digitales estructurales dentro de un período de tiempo requerido para que el gemelo digital estructural generado o actualizado informe la toma de decisiones.

Un aspecto de un gemelo digital estructural es que puede evolucionar (y en algunos casos evoluciona continuamente), ya sea con base en el estado actualizado del activo o debido a las modificaciones impuestas por el operador, que puede querer evaluar los diferentes cambios propuestos o escenarios hipotéticos. Por lo tanto, los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan una funcionalidad para generar y actualizar gemelos digitales estructurales que se pueden modificar de manera fácil y eficiente. Un enfoque de modelado paramétrico puede facilitar tales modificaciones, ya que el modelado paramétrico permite modificar las propiedades cambiando los "diales", por ejemplo, para variar la rigidez, las densidades, las cargas, la geometría, etc., y resolverlas de manera automática y eficiente. El modelado paramétrico también facilita la cuantificación de la incertidumbre, ya que los parámetros del modelo se pueden muestrear estadísticamente para evaluar la incertidumbre en las predicciones del gemelo digital, como la evaluación de la fatiga estructural en una variedad de escenarios de carga o tasas de corrosión. Este tipo de análisis estadístico de incertidumbre permite una planificación de la gestión de activos basada en el riesgo con base en un gemelo digital.

Los gemelos digitales estructurales generalmente se implementan para activos críticos para la seguridad y de alto valor, y existen muchos códigos de reguladores y organismos de normalización que rigen el tipo de análisis que debe usarse en este contexto. Por lo tanto, los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan la funcionalidad para generar y actualizar gemelos digitales estructurales que cumplan con estos estándares para que los reguladores y los operadores tengan plena confianza en los resultados que proporciona, al tiempo que proporcionan resultados de análisis que pueden verificarse para confirmar su precisión y fiabilidad.

Una herramienta convencional para el análisis de integridad estructural de equipos industriales es el método de Elementos Finitos (FE). No cabe duda de que FE cumple con los requisitos relacionados con el cumplimiento de las normas y la precisión certificable, pero tiene limitaciones importantes para los otros tres elementos. En cuanto a la velocidad y el modelado holísticos y detallados, los requisitos de velocidad y memoria de cálculo de FE suelen crecer de manera superlineal con el número de grados de libertad y, por lo tanto, en la mayoría de las circunstancias prácticas, el modelado detallado y holístico no es factible para sistemas a gran escala con FE. Este problema con FE ha llevado al desarrollo de muchos flujos de trabajo basados en el submodelado (modelos globales aproximados y modelos locales finos separados), pero el enfoque de submodelado ignora los efectos acumulativos y no locales que pretendemos captar al actualizar un gemelo digital estructural. En cuanto al modelado paramétrico, la FE no es intrínsecamente paramétrica, en el sentido de que cualquier cambio paramétrico requiere una nueva solución (a menudo intensiva desde el punto de vista computacional) para realizarla desde cero.

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático (AI/ML), y los métodos relacionados, como las superficies de respuesta, son otro conjunto de metodologías candidatas que a menudo se promueven para los gemelos digitales. AI/ML permiten un análisis rápido de los sistemas, por lo general mediante la evaluación de cantidades de interés (QoI) específicas en función de los parámetros. Como resultado, la AI/ML cubre bien la velocidad de los elementos y el modelado paramétrico, pero se queda corta en los dos elementos restantes. En el caso de la modelización holística y detallada, la evaluación de cantidades específicas de interés no es coherente con el concepto de un modelo holístico y detallado en el que todos los detalles de un activo deben estar plenamente representados, ya que los resultados específicos de la QoI no proporcionan una imagen de todo el activo. En cuanto al cumplimiento de los estándares y la precisión certificable, los modelos de AI/ML son bien conocidos por ser "cajas negras" que son difíciles de interpretar y que no se basan en los principios básicos de la física ni cumplen con los estándares de integridad de activos basados en la física.

Existe una amplia gama de métodos de modelado de orden reducido (ROM) que se han desarrollado y que podrían ser candidatos para el tipo de gemelo digital estructural discutido anteriormente. incluida la Descomposición Ortogonal Parabólica (POD), la Descomposición Generalizada Adecuada (PGD) o el Método Certificado de Base Reducida: Las ROM ciertamente proporcionan velocidad y, según el tipo de ROM, también pueden proporcionar modelado paramétrico y precisión certificable. Sin embargo, los ROM generalmente no permiten el modelado holístico y detallado de sistemas a gran escala; por lo tanto, no suelen proporcionar una metodología que se aplique a los sistemas industriales más grandes, por ejemplo, equivalente a más de 10^8 grados de libertad FE, como se requiere para modelos completamente detallados de estructuras flotantes a gran escala o aeronaves, por ejemplo. Los enfoques de ROM mencionados anteriormente no son adecuados para este tipo de modelo a gran escala, ya que los ROM deben "entrenarse" resolviendo el modelo de pedido completo muchas veces para diferentes configuraciones, y esto es prohibitivamente caro cuando el modelo de pedido completo es a gran escala.

Por lo tanto, los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan un enfoque de ROM basado en componentes con base en el marco de trabajo de Elemento de Base Reducida por Condensación Estática (SCRBE). La metodología SCRBE se basa en el método certificado de base reducida para proporcionar un ROM basado en física de ecuaciones diferenciales parciales (PDE) paramétricas. Como es habitual en los enfoques de ROM, el SCRBE implica una descomposición Fuera de Línea/En Línea en la que los datos del modelo se "entrenan" durante la etapa Fuera de Línea y, posteriormente, se evalúan para determinar la elección de parámetros específicos durante la etapa en línea. La etapa Fuera de Línea requiere muchos cálculos, pero una vez finalizada, la etapa En Línea se puede evaluar muy rápidamente (normalmente órdenes de magnitud más rápido que la resolución de FE correspondiente) para cualquier nueva elección de parámetro dentro de un rango predefinido. Sin embargo, el aspecto clave de la metodología que la diferencia de los métodos ROM discutidos anteriormente es que se basa en componentes, en el sentido de que el sistema general se descompone en componentes más pequeños y se entrena un ROM separado para cada componente. Esto permite una mayor escalabilidad que otros enfoques, ya que con SCRBE el sistema no necesita resolver todo el sistema con un solucionador de órdenes completo (por ejemplo, FE) durante la etapa Fuera de Línea - es suficiente con resolver los componentes aislados y los subsistemas locales para generar los datos de entrenamiento. El ROM resultante para cada componente consiste en representaciones de orden reducido tanto del interior del componente (mediante el método de base reducida estándar) como de las interfaces de los componentes mediante la "reducción de puertos". El método SCRBE de referencia se aplica a las PDE lineales, ya que la formulación aprovecha la condensación estática, pero se puede ampliar de forma natural para incorporar no linealidades incluyendo regiones FE no lineales en el modelo cuando sea necesario. Dicho marco de trabajo SCRBE aborda las cuatro propiedades de los gemelos digitales estructurales descritas anteriormente.

Si bien los métodos y sistemas descritos en el presente documento se centran en gemelos digitales estructurales basados en la metodología SCRBE, en algunos casos, estos métodos y sistemas se combinan con la funcionalidad para SCRBE, FE y/o AI/ML. Por lo tanto, los métodos descritos en el presente documento pueden incluir recibir la salida de un sistema AI/ML e incorporar esa salida en los análisis; dichos métodos pueden incluir devolver la salida al sistema AI/ML con el que el sistema AI/ML puede mejorar automáticamente su ejecución posterior. En particular, la AI/ML puede ser muy eficaz como "canario", ya que puede generar rápidamente una posible "bandera roja" con base en una QoIs específica durante las operaciones, y luego se puede aplicar el SCRBE para realizar un análisis completamente detallado a fin de evaluar el escenario de bandera roja con más detalle y prescribir medidas adicionales si es necesario. Otra combinación de SCRBE y AI/ML usa SCRBE para generar datos basados en física que se pueden usar para aumentar las mediciones del mundo real, y luego los conjuntos de datos aumentados se pueden usar para entrenar un modelo AI/ML más rico. Esto es particularmente importante para permitir que un modelo AI/ML clasifique con precisión los comportamientos poco frecuentes (como los fallos, que suelen ser poco frecuentes en los activos bien gestionados), ya que los conjuntos de datos del mundo real sobre eventos poco frecuentes son, por definición, limitados. Para abordar este problema, los ROM basadas en física, como SCRBE, se pueden usar para generar de manera eficiente una amplia gama de datos de modos de fallo mediante la simulación de escenarios de fallo específicos y la extracción de lecturas de sensores virtuales para aumentar y enriquecer los conjuntos de entrenamiento de AI/ML. Del mismo modo, SCRBE y FE se complementan bien, ya que SCRBE permite el modelado rápido y paramétrico de sistemas a gran escala, que se pueden usar para identificar regiones localizadas en el sistema que pueden tener problemas de integridad estructural. Una vez que se identifica una región, se puede someter a un análisis exhaustivo de FE localizado para realizar una evaluación adicional y, dado que el SCRBE se basa en mallas de FE, el sistema puede ejecutar FE usando cualquier subconjunto de los componentes de un modelo SCRBE.

Si bien los gemelos digitales estructurales considerados en este trabajo se basan en el SCRBE, se requiere una amplia capa de preprocesamiento y postprocesamiento para proporcionar un flujo de trabajo completo que sea útil para los operadores que administran sistemas críticos en el día a día. Un sistema de este tipo debería actualizar automáticamente y sin problemas un gemelo digital estructural con base en los nuevos datos y generar informes que resuman los hallazgos clave bajo demanda. Este flujo de datos actualizados a un gemelo digital y a nuevos informes y recomendaciones a menudo se denomina "hilo digital", donde el "hilo" conecta todas las partes relevantes del marco de trabajo de integridad de los activos digitales. A continuación se describen con mayor detalle ejemplos de un hilo digital - creado en torno a gemelos digitales estructurales basados en SCRBE - para activos físicos.

El modelado basado en componentes ha sido durante mucho tiempo un enfoque estándar para el análisis de sistemas estructurales a gran escala. El punto de partida de una formulación basada en componentes suele ser definir un conjunto de n_{com} componentes, donde el componente i corresponde a un dominio espacial Ω_i y contiene un conjunto

de superficies de interfaz - a las que denominamos puertos - en las que el componente i se puede conectar a los componentes vecinos. Sea que n_{puerto} indique la cantidad total de puertos conectados en un sistema general. con base en este marco de trabajo de componentes/puertos, se puede obtener el modelo FE equivalente a nivel de sistema conectando los componentes para formar el dominio $\Omega = \bigcup_{i=1}^{n_{\text{comp}}} \Omega_i$, como se ilustra en la FIG.1. Como se muestra en la FIG. 1, los componentes de un casco (arriba) se ensamblan en un modelo a nivel de sistema completamente conectado (abajo). El enfoque de SCRBE para desarrollar ROM paramétricos que aprovechen la descomposición basada en componentes de los modelos a nivel de sistema presentado anteriormente se describirá con mayor detalle a continuación.

Sea que el sistema:

$$KU = F, \quad (1)$$

denote un problema FE de análisis estructural de equilibrio (después de aplicar la discretización basada en un espacio de elementos finitos) planteado en Ω , como la elasticidad lineal estática o cuasiestática. Aquí $K \in R^{N_{FE} \times N_{FE}}$ es la matriz de rigidez (simétrica), $U \in R^{N_{FE}}$ el vector de desplazamiento y $F \in R^{N_{FE}}$ el vector de carga, donde N_{FE} indica el número de grados de libertad (DOF) FE en la discretización FE en Ω . El sistema de (1) puede denominarse la formulación FE estándar de este problema y, en el contexto de los ROM, a menudo se denomina formulación de la "verdad".

En cuanto a la función de los componentes, y con fines ilustrativos, en un caso muy simplificado con $n_{\text{comp}} = 2$ y $n_{\text{puerto}} = 1$, el dominio a nivel de sistema es $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, y p indica el único puerto que conecta Ω_1 y Ω_2 . Sea $N_{FE,1}$ y $N_{FE,2}$ el número de DOF FE asociados a la región interior (no puerto) de los componentes 1 y 2, respectivamente, y sea que $N_{FE,p}$ indique el número de DOF FE en p . Tengamos en cuenta que los DOF de p pueden ser funciones estándar basadas en FE Lagrange asociadas a nodos individuales de la malla FE, o pueden ser funciones generales compatibles con todo el puerto; este último caso es necesario en el caso de la "reducción de puertos", que se analizará con más detalle más adelante. Entonces (1) puede reescribirse en forma de bloque:

$$\begin{bmatrix} K_{p,p} & K_{p,1} & K_{p,2} \\ K_{p,1}^T & K_{1,1} & 0 \\ K_{p,2}^T & 0 & K_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_p \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

La estructura matricial aquí sugiere resolver U_1 y U_2 en términos de U_p de la siguiente manera:

$$U_i = K_{ii}^{-1} (F_i - K_{p,i}^T U_p), \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

La sustitución de (3) por (2) produce entonces un sistema con solo U_p como desconocido:

$$K_{p,p} U_p + \sum_{i=1}^2 K_{p,i} K_{ii}^{-1} (F_i - K_{p,i}^T U_p) = F_p. \quad (4)$$

o equivalentemente

$$(K_{p,p} - \sum_{i=1}^2 K_{p,i} K_{ii}^{-1} K_{p,i}^T) U_p = F_p - \sum_{i=1}^2 K_{p,i} K_{ii}^{-1} F_i. \quad (5)$$

Se puede usar la siguiente notación para la matriz de rigidez subestructurada y el vector de carga:

$$\mathbb{K} = (K_{p,p} - \sum_{i=1}^2 K_{p,i} K_{ii}^{-1} K_{p,i}^T), \quad \mathbb{F} = F_p - \sum_{i=1}^2 K_{p,i} K_{ii}^{-1} F_i. \quad (6)$$

donde $K \in R^{N_{FE,p} \times N_{FE,p}}$, y $F \in R^{N_{FE,p}}$. Por lo tanto:

$$\mathbb{K} U_p = \mathbb{F}. \quad (7)$$

Aquí (7) es una reformulación exacta de (1), donde el punto clave es que al realizar una secuencia de soluciones locales de componentes como en (3), el sistema se reduce al tamaño $N_{FE,p} \times N_{FE,p}$ en lugar del tamaño original $N_{FE} \times N_{FE}$. Este procedimiento recibe varios nombres diferentes en la bibliografía, como subestructuración, superelementos, condensación estática o eliminación Gaussiana en bloque. El nombre subestructuración puede usarse para referirse a este enfoque.

El enfoque de (2)-(5) se basa en la linealidad de (1) y, por lo tanto, la formulación basada en componentes que se analiza en esta sección es solo lineal. Los enfoques que se aplican al análisis no lineal se analizan con mayor detalle a continuación.

Para implementar (2)-(5) de manera eficiente, en una modalidad, no hay un cálculo explícito de K_{ii}^{-1} . En cambio, (3) se reescribe como una secuencia de $N_{FE,p} + 1$ se resuelve - uno para cada DOF del puerto p más uno para F_i - de la siguiente manera:

$$K_{i,i} X_i^j = F_i, \quad K_{i,i} X_i^j = -K_{p,i}^T e_j, \quad j = 1, \dots, N_{FE,p}. \quad (8)$$

donde e_j es el vector unitario canónico con 1 en la j -ésima entrada, y una vez que hayamos completado esta secuencia podemos reconstruir $K_{i,i}^{-1}F_i$ y $K_{i,i}^{-1}K_{p,i}^T$, y por lo tanto, obtener los términos de (5) mediante la premultiplicación de $K_{p,i}$. $\square$

Los vectores X en (8) no tienen ningún significado físico, su función es solo usarse en el ensamblaje de K y F .

5 En la derivación anterior, asumimos que $n_{\text{comp}} = 2$ y que solo había un puerto p , pero todo se generaliza de forma natural al caso de cualquier número de componentes y puertos. Como resultado, a continuación entenderemos que $N_{\text{FE},p}$ hace referencia al número de DOF FE en todos los puertos del sistema.

10 El enfoque de subestructuración descrito anteriormente se usa ampliamente y ofrece algunas eficiencias y comodidades computacionales atractivas. Una ventaja, como se indicó anteriormente, es que el sistema de (5) suele ser considerablemente más pequeño que el sistema de (1). Otra ventaja es que si se realiza un cambio dentro del componente i , para ensamblar la matriz de rigidez y el vector de carga $N_{\text{FE},p} \times N_{\text{FE},p}$ actualizados, solo necesitamos resolver (3) para el componente i en lugar de para todos los componentes, por lo que los cambios locales en el sistema basado en componentes se pueden realizar de forma eficiente de componentes locales. Si bien estas ventajas son atractivas en algunos casos, en general las ventajas computacionales de la subestructuración en comparación con la formulación estándar de FE en (1) son bastante limitadas debido a dos cuestiones clave. En primer lugar, el procedimiento descrito anteriormente para incorporar un cambio dentro de un componente es, de hecho, modular, pero puede resultar oneroso, ya que cada cambio en un componente requiere que se lleve a cabo una nueva solución de FE local del componente. En la práctica, esto puede resultar costoso, especialmente si se requieren muchas actualizaciones (por ejemplo, cuando se realizan modificaciones para que coincidan con las mediciones de los sensores en tiempo real o dentro del ciclo interno de una optimización) o cuando usamos mallas de componentes de alta resolución. En segundo lugar, la matriz $K_{N_{\text{FE},p} \times N_{\text{FE},p}}$ es de hecho más pequeña que (1), ya que los DOF interiores se han reducido, pero en general (en el caso de que $n_{\text{comp}} > 2$) está dispersa en bloques, con bloques potencialmente grandes y densos con tamaños correspondientes al número de DOF de los puertos en las interfaces de los componentes. Debido a la densidad adicional en esta estructura matricial, en muchos casos de interés, es posible que se requieran recursos de cálculo similares o incluso más para resolver (7) que el escaso sistema (1) FE original. Este es un problema bien conocido en la subestructuración, y el consejo habitual para solucionarlo es asegurarse de que los puertos contengan la menor cantidad posible de DOF (por ejemplo, ubicando los puertos en regiones pequeñas o con una malla gruesa) para limitar el tamaño de los bloques densos. En la práctica, estos requisitos imponen limitaciones muy severas a la aplicación de la subestructuración y, en muchos casos (según la geometría del modelo o la densidad de la malla) no es posible cumplir los requisitos.

30 La esencia de la dificultad aquí es que la subestructuración no es un ROM. En cambio, como se señaló anteriormente, es una reformulación exacta del problema de FE original. Esto garantiza la retención de una precisión total en el análisis, pero, por otro lado, tiene limitaciones (posiblemente graves) debido a los problemas de cálculo mencionados anteriormente. Los métodos y sistemas descritos en el presente documento, por lo tanto, desarrollan una formulación de ROM que se basa en el enfoque de subestructuración para abordar las limitaciones de cálculo del enfoque de subestructuración estándar. En particular, el objetivo aquí (como con cualquier enfoque ROM) es introducir una pequeña aproximación adicional en comparación con el enfoque no reducido a cambio de una gran ventaja de cálculo. Para abordar el primer problema mencionado anteriormente, en un ejemplo, desarrollamos ROM paramétricas locales de los componentes usando el Método de Base Reducida Certificada (RB) para reemplazar las soluciones FE de (3) por soluciones RB parametrizadas. Introducimos el vector de parámetros que codifica las propiedades parametrizadas de cada componente, como la rigidez, el grosor de la carcasa, las densidades, las impedancias, las cargas o la geometría. El dominio D de parámetros define el valor mínimo/máximo de μ_i , $i = 1, \dots, D_y$, según el marco de trabajo RB, este dominio se establece antes de ejecutar el algoritmo RB Voraz en la etapa Fuera de Línea, ya que el algoritmo RB Voraz muestreará los parámetros dentro de D . En todos los desarrollos posteriores aquí y en las secciones siguientes, asumiremos que los sistemas en cuestión están parametrizados por μ . Luego creamos una representación RB para cada componente para que podamos reemplazar las soluciones FE del interior del componente - una solución por DOF de puerto, como se indica en la observación 2.1) - con soluciones RB paramétricas del interior del componente. El primer paso de este proceso es introducir la expansión afín en el componente i de la siguiente manera:

$$K_{i,i}(\mu) = \sum_{q=1}^{Q_A} \theta_i^{K,q}(\mu) K_{i,i}^q, \quad (K_{p,i}(\mu))^T = \sum_{q=1}^{Q_A} \theta_i^{K,q}(\mu) (K_{p,i}^q)^T, \quad F_i(\mu) = \sum_{q=1}^{Q_F} \theta_i^{F,q}(\mu) F_i^q, \quad (9)$$

50 donde nos separamos en funciones dependientes de los parámetros (es decir, los θ s) y operadores independientes de los parámetros (es decir, las matrices K y los vectores F); esto es crucial para la eficiencia En Línea del método RB, como se explica a continuación. Luego podemos usar (9) para reformular la secuencia de soluciones de (8) en el componente i de la siguiente manera:

$$\sum_{q=1}^{Q_A} \theta_i^{K,q}(\mu) K_{i,i}^q X_i^q(\mu) = \sum_{q=1}^{Q_F} \theta_i^{F,q}(\mu) F_i^q, \quad \sum_{q=1}^{Q_A} \theta_i^{K,q}(\mu) K_{i,p}^q X_i^q(\mu) = - \sum_{q=1}^{Q_A} \theta_i^{K,q}(\mu) (K_{p,i}^q)^T e_p, \quad i = 1, \dots, N_{\text{FE},p}, \quad (10)$$

A continuación, generamos un "espacio RB" para cada una de las ecuaciones paramétricas NFE, $p + 1$ de (10). Esto

se realiza durante la etapa "Fuera de Línea" usando un algoritmo RB Voraz para generar un conjunto de funciones de base reducida que representan con precisión la gama completa de soluciones para cada una de las ecuaciones en (10) en todo el dominio D de parámetros. El algoritmo RB Voraz lo logra mediante el uso de límites de error a posteriori basados en residuos para guiar el muestreo adaptativo en el espacio de parámetros y generar modelos RB eficientes que sean precisos en todo el dominio de parámetros de interés.

Esto da como resultado $N_{FE, p+1}$ bases RB. En particular, denotemos una "matriz de funciones básicas RB" para el componente i, donde $N_{RB, i}$ indica el número de funciones básicas RB y la columna j de Z_i es la j-ésima función base. Luego podemos "reducir" los operadores independientes de los parámetros de (10) de la siguiente manera:

$$K_{ij}^{q, RB} = (Z_{RB, i}^T)^T K_{ij}^q Z_{RB, i} \in \mathbb{R}^{N_{RB, i} \times N_{RB, i}}, \quad F_i^{q, RB} = (Z_{RB, i}^T)^T F_i^q \in \mathbb{R}^{N_{RB, i}}, \quad (11)$$

y estos operadores reducidos se almacenan para usarlos posteriormente durante las resoluciones en línea. Los tamaños típicos de $N_{FE, i}$ y $N_{RB, i}$ podrían ser $O(10^5)$ y $O(10)$, respectivamente, por lo que (11) representa una reducción de matrices grandes y dispersas a matrices densas muy pequeñas, como es familiar en el marco de trabajo RB.

En la etapa "En Línea", para recopilar la contribución del interior de cada componente, los operadores reducidos previamente almacenados de (11) se combinan con los θ s, evaluados en el vector de parámetros μ solicitado en línea, para ensamblar y resolver el sistema reducido para cualquier μ de interés en particular. Este montaje y resolución es muy rápido, ya que depende únicamente de cantidades de tamaño $N_{RB, i}$, no $N_{FE, i}$. Esta independencia En Línea de $N_{RB, i}$ se denomina descomposición Fuera de Línea/En Línea del método RB, y se habilita mediante la expansión afín desde (10). En el contexto del SCRBE, la descomposición Fuera de Línea/En Línea nos permite volver a montar rápidamente el sistema (5) después de modificar las propiedades paramétricas de cualquier componente (o de todos los componentes simultáneamente), lo que aborda directamente el primer problema anterior.

El método de interpolación empírica (EIM) se puede aplicar para permitir una descomposición afín aproximada incluso en los casos en que no se disponga de una descomposición afín exacta. Esto se usa a menudo en la práctica para permitir ciertos tipos de parametrizaciones complicadas, incluidos las correspondencias geométricas que "transforman" la forma de un componente.

Es bien sabido en el contexto de los ROM paramétricos en general, y del método RB en particular, que el coste de cálculo Fuera de Línea y En Línea de los ROM generalmente aumenta rápidamente a medida que aumenta el número de parámetros; esto es lo que se conoce como la "maldición de la dimensionalidad". Sin embargo, el marco de trabajo SCRBE evita este problema mediante la localización basada en componentes de los RB voraces y parámetros: el algoritmo RB Voraz en el componente i solo involucra el subconjunto de parámetros que afectan al componente i. Esto significa que podemos configurar sistemas grandes con muchos (por ejemplo, miles) de parámetros sin que nos afecte la "maldición de la dimensionalidad", ya que el modelo a nivel de sistema se puede construir a partir de muchos componentes, donde cada componente solo tiene unos pocos parámetros.

Con respecto a la segunda cuestión anterior, observamos que la fuente de la dificultad de cálculo es que la subestructuración convencional usa, en la notación de (2), DOF $N_{FE, p}$ en los puertos. La solución natural a este problema es reducir la cantidad de DOF en los puertos mediante el desarrollo de ROM para los DOF de los puertos. Este proceso de desarrollo de "ROM de puertos" se denomina en la literatura del SCRBE "reducción de puertos" (en algunos artículos, "SCRBE con reducción de puertos" se abrevia como "PR-SCRBE", pero en este trabajo asumimos que siempre aplicamos la reducción de puertos y, por lo tanto, usamos el nombre más corto "SCRBE" en todas partes). Utilizamos varios esquemas de reducción de puertos de la bibliografía, como el entrenamiento por pares y los modos empíricos, que implican la reducción de modelos basados en puertos mediante una descomposición ortogonal (POD) adecuada, o los "modos óptimos", que resuelven un problema propio de transferencia para obtener un conjunto óptimo de DOF de puerto. El objetivo de estos esquemas es construir un conjunto reducido de DOF $N_{PR, p} \ll N_{FE, p}$ en cada puerto y, al mismo tiempo, conservar la precisión en comparación con una resolución de pedidos completa, garantizando que el conjunto reducido de DOF de puertos capture de manera eficiente la transferencia de información dominante entre los componentes adyacentes. Además, los esquemas de reducción de puertos funcionan con base en pequeños submodelos de un sistema general durante la etapa Fuera de Línea, por lo que no es necesario realizar una solución a nivel de sistema de orden completo.

El conjunto reducido de modos de puerto significa que, en lugar de (7), obtenemos un sistema. :

$$\mathbb{K}(\mu) \tilde{U}_p(\mu) = \tilde{F}(\mu). \quad (12)$$

de tamaño $N_{PR, p} \times N_{PR, p}$, donde también $\mathbb{K}$ es menos denso que K debido al tamaño reducido de los bloques densos. (Tenga en cuenta que ahora también incluimos la dependencia de los parámetros en (12), debido a la formulación RB en el interior de los componentes, como se presentó anteriormente). Además, la reducción de puertos reduce el coste Fuera de Línea y En Línea asociado con las aproximaciones de RB en el interior de los componentes, ya que sustituimos $N_{FE, p}$ in (10) por $N_{PR, p}$.

La reducción de puertos aumenta considerablemente la aplicabilidad del marco de subestructuración, ya que podemos usar puertos de cualquier forma o tamaño y ubicarlos en cualquier parte del modelo y, siempre que podamos generar un ROM eficaz para los puertos, podremos resolver el modelo general de manera eficiente. En particular, al usar SCRBE con reducción de puertos para modelos a gran escala, normalmente obtenemos una aceleración de órdenes de magnitud en comparación con una resolución FE estándar, mientras que con la subestructuración estándar, en muchos casos, el tiempo de resolución del sistema subestructurado es comparable o incluso más lento que el tiempo de resolución de la resolución FE estándar, como se indicó anteriormente.

Quizás más importante que la aceleración en comparación con el FE convencional es la escalabilidad que brinda el SCRBE con reducción de puertos. El coste de cálculo de resolver modelos estructurales a gran escala con FE, por supuesto, aumenta en función de NFE, donde la tasa de crecimiento depende del tipo de preconditionador, el tipo de solucionador y el número de condiciones de K. En la práctica, la mayoría de los problemas estructurales asociados con los sistemas industriales implican un mal acondicionamiento de una forma u otra, por ejemplo, elementos de carcasa, elementos sólidos delgados, conectores rígidos o vigas rígidas, y este mal acondicionamiento significa que es muy poco probable que los solucionadores iterativos con preconditionamiento como el método de gradiente conjugado preconditionado, o GMRES, o los métodos algebraicos de múltiples cuadrículas, convergerán. Los solucionadores directos dispersos son confiables para las formulaciones de FE para los tipos de problemas que se muestran a continuación. Una ventaja de un solucionador directo es que evita cualquier problema de convergencia, pero una desventaja es que presenta importantes problemas de escalabilidad para problemas a gran escala, especialmente los relacionados con los requisitos de memoria. Por el contrario, como se describe a continuación, el SCRBE con reducción de puertos permite resolver de manera eficiente modelos a gran escala y, al mismo tiempo, evita las dificultades de convergencia, ya que, como se indicó anteriormente, no requiere la ejecución de soluciones completas de pedidos a nivel del sistema durante la etapa Fuera de Línea, y en la etapa En Línea se puede construir un sistema reducido que consista únicamente en DOF con puertos reducidos que sea lo suficientemente pequeño como para resolverlo rápida y eficientemente con un solucionador directo. Por lo tanto, SCRBE resuelve una importante limitación de cálculo que existe con los solucionadores FE convencionales para problemas estructurales a gran escala. Por lo tanto, para resumir, el marco SCRBE que se presenta aquí combina el método RB en los interiores de los componentes y la reducción de puertos en las interfaces de los componentes para resolver el primer y el segundo problema descritos anteriormente. Esto permite un análisis rápido, detallado y paramétrico de sistemas a gran escala, que es un conjunto de capacidades que son ideales para los gemelos digitales estructurales de los sistemas industriales.

Otra clase de problemas de gran relevancia para los gemelos digitales estructurales es el análisis de vibraciones forzadas en el dominio de la frecuencia, como la acústica de Helmholtz o la elastodinámica de Helmholtz. En este caso, el sistema FE adopta la forma

$$(K(v) - \omega^2 M(v))U(\omega, v) = F(\omega, v), \quad (13)$$

donde ahora M denota la matriz de masa discretizada con FE, ω es la frecuencia y U es un vector de solución de valores complejos que representa, por ejemplo, la presión (acústica) o la respuesta estructural (elastodinámica). En (13), sea que v denote el vector de parámetros especificado por el usuario (por ejemplo, propiedades del material, geometría, carga, impedancias) y, a continuación, el vector de parámetros completo μ , como se indicó anteriormente, viene dado por $\mu = (\omega, v)$. Sea que $H(\mu) = K(v) - \omega^2 M(v)$, para que podamos reescribir (13) como:

$$H(\mu)U(\mu) = F(\mu), \quad (14)$$

Se podría aplicar el marco de trabajo subestructuración estándar (2), (5) a (14) usando el mismo enfoque descrito anteriormente y con los mismos inconvenientes identificados en los problemas primero y segundo. El problema de la densidad adicional en la estructura matricial es tan restrictivo en este caso como en el caso anterior, mientras que la cuestión del coste cuando los componentes cambian suele ser mucho más restrictiva en el caso del dominio de la frecuencia, ya que es muy raro que una evaluación de (14) para una sola frecuencia sea suficiente; por lo general, el objetivo de un análisis del dominio de la frecuencia es realizar un "barrido" en un rango de frecuencias.

El marco de trabajo SCRBE presentado anteriormente se puede implementar una vez más para resolver estos problemas. Esto aporta las mismas ventajas que las anteriores y también garantiza que podamos realizar barridos de frecuencia altamente eficientes con (14), ya que la frecuencia ω se incorpora a la ROM paramétrica del SCRBE de forma natural: simplemente se trata como una de las entradas del vector μ de parámetros.

El marco de trabajo SCRBE se puede aplicar casi sin cambios a (14). Una diferencia es que ahora desarrollamos una expansión afín de $H(\mu)$ en lugar de $K(\mu)$, pero esto se deduce directamente del enfoque presentado anteriormente, ya que el único requisito adicional es que también debemos crear una expansión afín de la matriz de masas en cada componente, de la siguiente manera:

$$\omega^2 M_{i,i}(\mu) = \sum_{q=1}^{Q_M} \theta_i^{M,q}(\mu) M_{i,i}^q, \quad i = 1, \dots, n_{comp}, \quad (15)$$

Además, para garantizar que todas las soluciones interiores de los componentes de (3) sean estables, debemos imponer un límite en el rango de parámetros de ω tal que $\omega \in [0, \lambda_{comp})$, donde λ_{comp} denota el valor propio más pequeño

de todos los componentes del modelo del problema de valores propios generalizado, es decir, $\lambda_{comp} = \min_{i=1}^{n_{comp}} \min_{\mu \in D} \lambda_i^1(\mu)$, donde

$$K_{i,i}(\mu) V_i^j(\mu) = \lambda_i^j(\mu) M_{i,i}(\mu) V_i^j(\mu), \quad j = 1, \dots, N_{FE,i}, \quad (15)$$

y donde asumimos que los valores propios están ordenados tal que $\lambda_i^1(\mu) \leq \lambda_i^2(\mu) \leq \dots \leq \lambda_i^{N_{FE,i}}(\mu)$. Esta restricción garantiza la estabilidad de las soluciones locales del componente porque, por debajo de λ_{comp} , la ecuación de Helmholtz aislada de cada componente es coercitiva, mientras que por encima de λ_{min} nos enfrentamos a la inestabilidad, ya que la constante inf-sup decae a cero en las resonancias. Sin embargo, es importante señalar que el máximo impuesto a ω por λ_{comp} no suele ser muy restrictivo en el contexto de los valores propios y modos propios a nivel del sistema, ya que normalmente los componentes individuales son pequeños en comparación con el sistema en general, por lo que λ_{comp} normalmente corresponde a una frecuencia alta a nivel del sistema. Una vez que se crea y entrena un modelo SCRBE para un problema en el dominio de la frecuencia, normalmente podemos realizar un "barrido" rápido en una amplia gama de frecuencias con un muestreo denso en ω para resolver respuestas vibratorias complicadas con gran precisión.

A continuación, consideremos el modelo dinámico parametrizado:

$$M(\mu) \ddot{U}(\mu, t) + C(\mu) \dot{U}(\mu, t) + K(\mu) U(\mu, t) = F(\mu, t), \quad (17)$$

que denota la ecuación de movimiento de un sistema estructural, después de aplicar espacialmente la discretización de FE, donde C es la matriz de amortiguamiento y ahora el campo de desplazamiento $U(\mu, t) \in R^{N_{FE}}$ es una función del tiempo. Entonces, se puede discretizar en el tiempo y aplicar esquemas estándar de marchas temporales explícitas o implícitas para resolver este sistema, pero este puede ser un enfoque muy intensivo desde el punto de vista computacional, especialmente para sistemas a gran escala. Como resultado, una alternativa común es resolver los primeros N_{modos} de valores propios y modos propios del problema de valores propios correspondiente (donde normalmente $N_{modos} \ll N_{FE}$):

$$K(\mu) V^j(\mu) = \lambda^j(\mu) M(\mu) V^j(\mu), \quad j = 1, \dots, N_{modos}, \quad (18)$$

y luego representamos la solución dinámica mediante la superposición modal en el conjunto truncado de modos propios:

$$U(\mu, t) = \sum_{j=1}^{N_{modos}} W_j(\mu, t) V^j(\mu), \quad (19)$$

donde $W(\mu, t) \in R^{N_{modos}}$ es el vector de coeficientes. De manera equivalente, podemos escribir $U(\mu, t) = V(\mu) W(\mu, t)$, donde $V(\mu) \in R^{N_{FE} \times N_{modos}}$ denota la matriz en la que la columna j es el vector propio. Sustituimos (19) por (17) y aplicamos la ortogonalidad de los modos propios con respecto a $M(\mu)$ para obtener:

$$\ddot{W}(\mu, t) + (V(\mu))^T C(\mu) V(\mu) \dot{W}(\mu, t) + \Lambda(\mu) W(\mu, t) = (V(\mu))^T F(\mu, t), \quad (20)$$

donde $\Lambda(\mu) = \text{diag}(\lambda_1(\mu), \dots, \lambda_{N_{modos}}(\mu))$. (20) es un sistema de N_{modos} ODE que, si N_{modos} es lo suficientemente grande, generalmente captura bien la dinámica global del sistema.

Sin embargo, si el sistema estructural es grande y/o complejo, es posible que no sea factible a nivel de cálculo resolver el problema propio global (18). Como resultado, se han desarrollado ampliamente marcos de trabajo de reducción de modelos basados en componentes para permitir un cálculo eficiente de (18) y, por lo tanto, (20). El enfoque más conocido es el método Craig-Bampton, en el que formamos un conjunto reducido de DOF para cada componente en función de (i) modos de restricción de interfaz, que son idénticos a los X_i^f de (8), y (ii) un conjunto de l modos normales de interfaz fija, que se obtienen mediante un problema propio local de componente sin imponer restricciones a todos los puertos. La combinación de (i) y (ii) corresponde a reemplazar $U^i \in R^{N_{FE,i} + N_{FE,p}}$ el componente i por las "coordenadas generalizadas" $\varepsilon^i \in R^{l + N_{FE,p}}$ de la siguiente manera:

$$\varepsilon^i = \begin{bmatrix} \Phi_i^f(\mu) & -K_{i,i}(\mu)^{-1} \{K_{p,i}(\mu)\}^T \\ 0 & I_{p,p} \end{bmatrix} \xi^i, \quad (21)$$

donde $\Phi_i^f(\mu)$ es la matriz de los primeros l modos normales de interfaz fija del componente i , $K_{i,i}(\mu)$ y $K_{p,i}(\mu)$ provienen de (2), y $I_{p,p} \in R^{N_{FE,p} \times N_{FE,p}}$ es la matriz de identidad. Esta transformación corresponde a una reducción del número de DOF interiores en el componente i debido al truncamiento de los modos normales de interfaz fija, como solemos elegir $l \ll N_{FE,i}$. Esta transformación DOF se puede aplicar a (17) directamente, o primero al problema modal (18) y luego al sistema dinámico, como en (20)

Se han propuesto muchas ampliaciones al método Craig-Bampton y, por lo general, se agrupan en la familia de métodos de Síntesis de Modo de Componente (CMS). La CMS implica aumentar la representación de Craig-Bampton con DOF adicionales en el interior del componente. Métodos CMS (incluida Craig-Bampton) son ROM basados en componentes eficaces y ampliamente utilizadas, ya que capturan el comportamiento modal y dinámico dominante de los sistemas estructurales y, al mismo tiempo, proporcionan una reducción significativa del número de DOF al truncar los DOF del interior de los componentes. Sin embargo, consideremos ahora las consideraciones computacionales para la CMS y, en particular, revisemos la primera y la segunda cuestiones anteriores, en el contexto de los métodos de CMS.

En primer lugar, con respecto a los mismos recursos de cálculo o adicionales necesarios para resolver (7) debido a la densidad adicional en la estructura matricial, observamos que la formulación estándar de CMS no implica la reducción de puertos, es decir, como se muestra arriba, el bloque $I_{p,p}$ en (21) tiene un tamaño $N_{FE,p} \times N_{FE,p}$. Sin embargo, se han propuesto enfoques para abordar este problema con la CMS mediante la reducción del número de DOF de los puertos que usan representaciones de modo propio truncadas en los puertos, aunque la convergencia bastante lenta de las expansiones automodales es una limitación de este enfoque y, por lo tanto, los enfoques de entrenamiento por pares, modos empíricos o "modos óptimos" pueden proporcionar una ventaja sobre el truncamiento de modo propio en este contexto. Sin embargo, CMS no aborda este problema. De la dependencia de μ en (17) — (21) se desprende claramente que las cantidades necesarias para implementar la formulación de la CMS tendrían que recalcularse cada vez que se cambiara μ . Al igual que en los casos estáticos, cuasistáticos y Helmholtz, esta es una limitación importante de la CMS para los casos en los que queremos analizar una amplia gama de configuraciones de modelos cambiando los parámetros, por ejemplo, en el contexto de la optimización del diseño, o para actualizar los modelos en tiempo real para que coincidan con los datos de los sensores o de inspección en el contexto de los gemelos digitales estructurales.

Para abordar el problema del coste de cálculo cuando los componentes cambian, anteriormente se desarrolló un solucionador propio ROM paramétrico basado en componentes con base en SCRBE. La idea central de este solucionador propio basado en SCRBE es reformular el problema propio (18) para incluir el vector μ de parámetros especificado por usuario, así como un parámetro σ de cambio, de tal manera que:

$$(K(\mu) - \sigma M(\mu))V(\mu) = \tau(\sigma, \mu)K(\mu)V(\mu), \quad (22)$$

donde τ es un valor propio desplazado que satisface

$$\tau(\lambda^i(\mu), \mu) = 0, \quad (23)$$

donde $\lambda^i(\mu)$ son de (18). El siguiente paso es desarrollar una aproximación de SCRBE para (22), que siga la misma línea que se discutió anteriormente para los problemas de Helmholtz, ya que la matriz del lado izquierdo de (22) es exactamente la matriz H de la sección 2.2. Tenga en cuenta que, como se indicó anteriormente, restringimos σ de tal $\sigma \in [0, \lambda_{comp})$ manera que, para garantizar la coercitividad y, por lo tanto, la estabilidad del componente, el interior resuelve H , y una vez más, se trata de una restricción modesta en la práctica, ya que normalmente λ_{comp} corresponde a una frecuencia alta a nivel del sistema.

Una vez que el ROM basado en SCRBE esté construido para (22), podemos usarla en la etapa En Línea para ensamblar y resolver un problema propio reducido. para cualquier valor del par (σ, μ) . En la práctica, usamos esta capacidad de la siguiente manera: dado un vector μ de parámetros especificado por usuario, encontrar valores σ_0^j tal que $\tau(\sigma_0^j, \mu) = 0$ para cada j . Aplicamos un algoritmo iterativo de búsqueda de raíces, como el método de Brent, para encontrar el σ_0^j . Estos valores luego producen valores propios del sistema original debido a (23). Con base en este marco de trabajo, podemos resolver de manera eficiente problemas de valores propios parametrizados a través de un ROM basado en SCRBE para muchos valores diferentes de μ y, después de (20), los modos propios resultantes también se pueden aplicar al análisis dinámico de sistemas parametrizados.

A continuación, consideramos la aplicación de ROM basadas en componentes a problemas de análisis estructural no lineal. Una clase específica de ROM basados en componentes no lineales es la dinámica multicuerpo flexible. Este enfoque generaliza la dinámica rígida de múltiples cuerpos, en la que un sistema consiste en múltiples componentes rígidos conectados, y se usa ampliamente en aplicaciones industriales, por ejemplo, en el modelado de trenes de transmisión y robótica. En la dinámica flexible de varios cuerpos, los componentes de un sistema de cuerpo rígido pueden reemplazarse por ROM (normalmente mediante CMS) que representan la respuesta elástica de los componentes. El análisis general es entonces geoméricamente no lineal debido a las rotaciones y traslaciones finitas de cada componente dentro del sistema multicuerpo, pero se supone que cada componente flexible tiene una respuesta elástica lineal dentro de su marco de referencia. La dinámica flexible de múltiples cuerpos basada en CMS es un enfoque eficaz dentro de su ámbito de aplicación, pero ese ámbito de aplicación es bastante específico y no aborda la gama de requisitos que se necesitan para los gemelos digitales estructurales, como el análisis detallado del estrés y la fatiga, incluyendo la elastoplasticidad, el contacto/fricción y la gran deformación. Como resultado, nos centramos en otros enfoques en este documento, pero observamos que los enfoques de dinámica de cuerpos rígidos o flexibles son un complemento natural de la reducción del modelo basado en SCRBE (lineal o no lineal) que se analiza aquí porque el análisis de dinámica de cuerpos múltiples puede proporcionar datos de carga que pueden imponerse al modelo basado en SCRBE para un análisis detallado de la integridad estructural.

De hecho, en general, la reducción del modelo de sistemas no lineales es un problema desafiante. Se han desarrollado varias estrategias denominadas de hiperreducción para permitir ROM no lineales eficientes, como la interpolación empírica (EIM), la interpolación empírica discreta (DEIM) o los métodos de "gappy POD", que permiten una descomposición completa Fuera de Línea/En Línea de modo que el ensamblaje y la resolución de ROM En Línea no dependan de NFE. Otro enfoque de ROM no lineales es el aprendizaje automático (ML), en el que podemos entrenar modelos de aprendizaje automático de forma no invasiva basados en enfoques de aprendizaje supervisado, en los que un solucionador de orden completo proporciona los datos "verdaderos". Sin embargo, cada uno de estos métodos viene intrínsecamente con limitaciones de precisión o complejidad computacional. Por lo que, en muchos casos, la ventaja de cálculo de una ROM para problemas no lineales puede ser discutible. Esto es especialmente cierto en el caso de las no linealidades "no lisas", como el análisis de contacto y la elastoplasticidad, en las que un pequeño cambio en la carga aplicada puede provocar un salto discreto en la superficie de contacto o el "frente plástico". Este tipo de respuesta no uniforme es intrínsecamente difícil de resolver para los ROM, ya que los ROM se basan en la construcción de una representación de baja dimensión de la respuesta y, si la respuesta no es uniforme, es posible que no exista una representación precisa de baja dimensión (en términos matemáticos, el ancho de Kolmogorov de la respuesta puede ser grande, por lo que no es posible una reducción eficiente del modelo). No cabe duda de que existen muchos métodos válidos y ventajosos desde el punto de vista del cálculo para los ROM no lineales que se aplican en casos específicos, pero en nuestra opinión no existe un enfoque ROM único que brinde una ventaja de cálculo significativa sobre los modelos de pedido completo para toda la gama de análisis no lineales que son relevantes para el análisis estructural, como el contacto/la fricción, la elastoplasticidad y la deformación finita (por ejemplo, para doblarse o doblarse).

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, nuestro enfoque para obtener un solucionador no lineal general que pueda usarse en sistemas estructurales a gran escala consiste en aplicar el denominado solucionador híbrido, que combina SCRBE en regiones lineales y FE en regiones no lineales dentro de una solución global totalmente acoplada. Lo formulamos subdividiendo primero Ω en dos subregiones Ω_{lin} y Ω_{nolin} , donde Ω_{nolin} contiene todas las no linealidades y Ω_{lin} no contiene ninguna no linealidad.

Aplicamos el marco de trabajo SCRBE de la Sección 2.1, que da como resultado el sistema reducido (12) de tamaño $N_{PR, p}$. En Ω_{nolin} introducimos el operador FE no lineal $G_{FE, nolin}(\cdot; \mu): R^{N_{FE, nolin}} \rightarrow R^{N_{FE, nolin}}$, donde $R^{N_{FE, nolin}}$ indica el número de DOF FE en Ω_{nolin} . Sea

$$U_{hibrido}(\mu) = \begin{bmatrix} \hat{U}(\mu) \\ U_{FE, nolin}(\mu) \end{bmatrix} \quad (24)$$

denota la solución global para el sistema híbrido SCRBE/FE, donde $\hat{U} \in \mathbb{R}^{N_{PR, p}}$ es la solución en Ω_{lin} y $U_{FE, nolin} \in R^{N_{FE, nolin}}$ es la solución en Ω_{nolin} . En general, esta definición de $U_{hibrido}$ permite la discontinuidad en la interfaz de Ω_{nolin} y Ω_{lin} . Por lo tanto, para reforzar la continuidad, introducimos una matriz C de restricciones, que restringe los DOF FE de la interfaz para que coincidan con los modos de puerto SCRBE. de modo que el $CU_{hibrido}(\mu)$ sea continuo. Entonces podemos escribir la formulación en todo el dominio Ω como:

$$G(U_{hibrido}(\mu); \mu) = C^T \begin{bmatrix} \hat{F}(\mu) - \hat{R}(\mu)\hat{U}(\mu) \\ G_{FE, nolin}(CU_{hibrido}(\mu)|_{\Omega_{nolin}}; \mu) \end{bmatrix}, \quad (25)$$

donde $G(\cdot; \mu): R^{N_{PR, p} + N_{FE, nolin}} \rightarrow R^{N_{PR, p} + N_{FE, nolin}}$ indica el operador no lineal/lineal global en Ω , y el prefactor C^T asegura que usemos las mismas funciones de prueba que las funciones de prueba, siguiendo el espíritu de una formulación de Galerkin.

Tratamos (25) como un sistema no lineal con un acoplamiento bidireccional completo entre las regiones lineales y no lineales y, por lo tanto, lo resolvemos aplicando el método de Newton a G. La matriz jacobiana $J_G(\mu) \in R^{(N_{PR, p} + N_{FE, nolin}) \times (N_{PR, p} + N_{FE, nolin})}$ de G viene dada por:

$$J_G(U_{hibrido}(\mu); \mu) = C^T \begin{bmatrix} -\hat{R}(\mu) & 0 \\ 0 & J_{G_{FE, nolin}}(U_{hibrido}(\mu)|_{\Omega_{nolin}}; \mu) \end{bmatrix} C, \quad (26)$$

y luego aplicamos la iteración de Newton:

$$J_G(U_{hibrido}^k(\mu); \mu) \Delta U_{hibrido}^k = -G(U_{hibrido}^k(\mu); \mu), \quad (27)$$

$$U_{hibrido}^{k+1}(\mu) = U_{hibrido}^k(\mu) + \Delta U_{hibrido}^k, \quad (28)$$

hasta que alcancemos la convergencia.

Usando las formulaciones de (25) y (26) en la implementación, podemos ensamblar las partes lineales y no lineales del residuo y el jacobiano de forma independiente basándonos en la formulación de SCRBE en y la formulación de FE en Ω_{nolin} , y luego el acoplamiento de las dos regiones lo gestiona en su totalidad la matriz C.

En el contexto de los gemelos digitales estructurales, el enfoque Solucionador Híbrido tiene varias características atractivas. En primer lugar, proporciona toda la generalidad de FE para representar con precisión las no linealidades. En segundo lugar, un gemelo digital puede requerir múltiples regiones no lineales separadas, por ejemplo, debido a daños, desgaste o fallas en varias partes separadas de un sistema grande. Debido a la naturaleza de la resolución no lineal global totalmente acoplada, el solucionador híbrido captura automáticamente los efectos acumulativos y no locales de todas estas regiones. (Por el contrario, los flujos de trabajo de "submodelado" convencionales ignoran los efectos acumulativos y no locales). En tercer lugar, en el caso de que tengamos un predominio lineal, el solucionador híbrido proporciona una gran ventaja computacional en comparación con una resolución de orden completo, por ejemplo, es típica una aceleración de 100 x veces o más; el predominio lineal se refiere al caso en el que el número de DOF en la región FE es significativamente menor que el número de DOF de orden completo en la región SCRBE. Observamos que el predominio lineal es común en las aplicaciones de gemelos digitales estructurales, en las que a menudo las no linealidades solo son necesarias en regiones con daños o fallos localizados, o en regiones de contacto localizadas, por ejemplo. En los casos en los que no tenemos un predominio lineal, como el análisis de grandes deformaciones del ala de un avión o una pala de turbina eólica, y en los que todo el modelo (o casi todo el modelo) debe tratarse como no lineal, se puede implementar una resolución FE global no lineal o, si corresponde, uno de los otros métodos de ROM no lineal citados anteriormente.

En cuanto a los indicadores de error y a un enfoque de enriquecimiento de ROM adaptativo, la evaluación de errores a posteriori es un ingrediente importante en el marco del SCRBE, para comprobar la precisión de las soluciones de SCRBE tanto durante la etapa Fuera de Línea como En Línea. Esto proporciona orientación sobre cuándo detener el entrenamiento sin conexión o cuándo es necesario enriquecer más la ROM durante la etapa En Línea. Se pueden desarrollar estimadores de error a posteriori para el método SCRBE (con reducción de puertos) con respecto a la formulación FE "verdadera" en Ω . Los estimadores de error para el SCRBE también se han desarrollado usando un enfoque basado en residuos y, para que el enfoque sea riguroso, se calculan varias constantes para limitar el error en términos del residuo (por ejemplo, un factor de estabilidad para el operador y las constantes necesarias para limitar la norma dual del residuo, como se requiere generalmente para los estimadores de errores basados en residuos). En los métodos y sistemas que se describen a continuación, calculamos el residuo con respecto al espacio FE "verdadero". Sin embargo, en aras de la simplicidad, omitimos el cálculo de las constantes adicionales necesarias para los estimadores de errores detallados y, en su lugar, utilizamos el residuo directamente como indicador de error a posteriori. Este enfoque de indicador de error basado en residuos encaja bien en el contexto de los gemelos digitales estructurales, ya que el residuo puede interpretarse como un criterio de "equilibrio de fuerzas", que para los ingenieros estructurales es una cantidad físicamente relevante para indicar la precisión de la solución. Además, calculamos el residuo con respecto al sistema discreto de pedidos completos y esta cantidad se usa normalmente para determinar un criterio de parada en el contexto de los solucionadores iterativos (ya sean métodos lineales del tipo subespacial de Krylov o métodos no lineales del tipo Newton), por lo que la idea de evaluar la precisión de la solución de SCRBE con base en esta cantidad es natural para los ingenieros que están familiarizados con los solucionadores iterativos.

Para que nuestra formulación del residuo sea precisa, primero debemos introducir cuál es la solución SCRBE que se reconstruye en todo el dominio Ω a nivel del sistema con base en una suma ponderada de los DOF de los puertos y los DOF del interior de los componentes escalados según los coeficientes de $\hat{\theta}_p(\mu)$. Luego definimos el residuo $R(\mu)$ con base en (1) de la siguiente manera:

$$R(\mu) = F(\mu) - R(\mu)\hat{\theta}(\mu). \quad (29)$$

$R(\mu)$ se puede evaluar de manera eficiente desde el punto de vista del cálculo tratando la contribución al residuo de los interiores y puertos de los componentes por separado. Finalmente, introducimos nuestro indicador de error $\mathcal{E}(\mu) := \|R(\mu)\| / \|F(\mu)\|$, que es la norma del residuo normalizada por la norma de la carga.

Utilizamos el indicador de error basado en residuos tanto en la etapa Fuera de Línea como en la etapa En Línea, tal y como se describe a continuación. Tenga en cuenta que en la descripción que sigue usamos la noción de modelo, que hace referencia a un conjunto de componentes SCRBE en el que se especifican todos los parámetros (materiales, geometría, cargas, etc.).

Como se ha observado, el uso del marco SCRBE en los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporciona un enfoque poderoso para habilitar gemelos digitales estructurales de sistemas a gran escala. Estas capacidades se desarrollan aún más al conectar los modelos basados en SCRBE a los datos de inspección y sensores y al configurar el postprocesamiento con el fin de generar informes automatizados sobre la integridad de los activos. El flujo de datos desde los datos de los activos operativos (por ejemplo, sensores o inspecciones) hasta la actualización y el análisis de los gemelos digitales estructurales y el postprocesamiento y la presentación de informes puede denominarse "hilo digital". Este hilo digital puede proporcionar a los operadores de activos una visión profunda de la integridad estructural que aproveche los datos de los activos y el gemelo digital basado en SCRBE.

En referencia ahora a la FIG. 2A, en conjunción con la FIG. 3, un método 200 para el mantenimiento de un activo físico

basado en recomendaciones generadas mediante el análisis de un modelo del activo físico, comprendiendo el modelo una pluralidad de componentes y forma un gemelo digital basado en la física del activo físico, incluye la construcción, por un dispositivo informático, usando una aproximación de elementos de base reducidos por condensación estática reducida en puertos de al menos una parte de una ecuación diferencial parcial, un modelo compuesto de una pluralidad de modelos, cada uno de la pluralidad de modelos que representan al menos uno de una pluralidad de componentes, cada uno de la pluralidad de componentes que representan al menos una región de un activo (202) físico. El método 200 incluye analizar, mediante el dispositivo informático, para al menos un modelo de la pluralidad de modelos, un indicador de error que identifica un nivel de error asociado con el al menos un modelo, para determinar que el nivel de error identificado supera un nivel (204) de tolerancia. El método 200 incluye aumentar, mediante el dispositivo informático, un número de funciones básicas en la aproximación de elementos de base reducidos por condensación estática reducida en puertos, con base en la determinación de que al menos un modelo tiene un nivel de error que supera el nivel (206) de tolerancia. El método 200 incluye repetir el análisis de errores y aumentar las funciones de base para cada modelo de la pluralidad de modelos hasta que el nivel de error de cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel (208) de tolerancia. El método 200 incluye recibir, mediante el dispositivo informático, desde una primera fuente de datos operativos asociada con el activo físico, los primeros datos operativos asociados con al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro de al menos un componente en la pluralidad de componentes (210). El método 200 incluye actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los primeros datos (212) operativos recibidos. El método 200 incluye proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo (214) compuesto actualizado.

El método 200, por lo tanto, proporciona una etapa Fuera de Línea que ejecuta una serie de pasos. El método 200 incluye especificar un conjunto de modelos de entrenamiento, M , una tolerancia de entrenamiento, TOL , y un número de iteraciones de entrenamiento, NM . El método 200 incluye, para cada modelo $M \in M$, realizar los siguientes pasos: (a) Resolver con el ROM del SCRBE actual y calcular el indicador de error y (b) Si $\epsilon(\mu) > TOL$, realizar el enriquecimiento de los componentes y puertos de la ROM del SCRBE, como se describió anteriormente. El método 200 incluye repetir los pasos (a) y (b) veces, o hasta que $\epsilon \leq TOL$ para todos los $M \in M$. El método 200 también incluye una etapa En Línea. En la etapa En Línea, para cualquier modelo M , el método 200 resuelve el sistema usando el ROM SCRBE que se generó en la etapa Fuera de Línea. Opcionalmente, también podemos evaluar $\epsilon(\mu)$ para validar la precisión de la solución SCRBE y, si descubrimos que $\epsilon(\mu)$ es mayor de lo deseado, podemos realizar un mayor enriquecimiento revisando el procedimiento desde la etapa Fuera de Línea cuando sea necesario - esto se puede realizar de forma totalmente automática (según el indicador de error), o el usuario puede optar por guiarlo si y/o cuándo se va a realizar un mayor enriquecimiento. Por lo tanto, la disponibilidad del indicador de error proporciona un método sólido para garantizar la precisión de nuestras soluciones en la etapa En Línea. Además, si se lleva a cabo una etapa completa sin conexión, normalmente rara vez necesitamos volver a realizar los cálculos sin conexión y, en la mayoría de los casos, tendremos un ROM exclusivamente En Línea que proporciona soluciones rápidas y precisas para toda la gama de sistemas de interés. Nos referimos al procedimiento offline o en línea descrito anteriormente como enriquecimiento adaptativo de ROM (ARE).

En referencia ahora a la FIG. 2A, en conjunción con la FIG. 3, un método 200 para el mantenimiento de un activo físico basado en recomendaciones generadas mediante el análisis de un modelo del activo físico, comprendiendo el modelo una pluralidad de componentes y forma un gemelo digital basado en la física del activo físico, incluye la construcción, por un dispositivo informático, usando una aproximación de elementos de base reducidos por condensación estática reducida en puertos de al menos una parte de una ecuación diferencial parcial, un modelo compuesto de una pluralidad de modelos, cada uno de la pluralidad de modelos que representan al menos uno de una pluralidad de componentes, cada uno de la pluralidad de componentes que representan al menos una región de un activo (202) físico. El dispositivo 306 informático puede ejecutar un componente 308 Fuera de Línea (que puede proporcionarse como un componente de hardware o de software) que usa la estructura SCRBE para construir el modelo compuesto de la pluralidad de modelos, M . Como se indicó anteriormente, en algunas realizaciones, se usa un solucionador híbrido para construir el modelo compuesto; en tales realizaciones, al menos una primera parte de la ecuación diferencial parcial se aproxima utilizando el enfoque SCRBE, mientras que la FEA se aplica a al menos una segunda parte de la ecuación diferencial parcial.

El método 200 incluye analizar, mediante el dispositivo informático, para al menos un modelo de la pluralidad de modelos, un indicador de error que identifica un nivel de error asociado con el al menos un modelo, para determinar que el nivel de error identificado supera un nivel (204) de tolerancia. El componente 308 Fuera de Línea puede resolverse con la ROM SCRBE actual y calcular el indicador de error.

El método 200 incluye aumentar, mediante el dispositivo informático, un número de funciones básicas en la aproximación de elementos de base reducidos por condensación estática reducida en puertos, con base en la determinación de que al menos un modelo tiene un nivel de error que supera el nivel (206) de tolerancia. Si el indicador de error es mayor que el nivel de tolerancia, entonces el componente 308 fuera de línea enriquece el ROM SCRBE (por ejemplo, vuelve a agregar al menos una función básica), como se describió anteriormente. Las funciones básicas (o grados de libertad, tal como también se describen en el presente documento) pueden añadirse tanto en las interfaces como en el interior de los componentes. Las funciones de base interior de componentes pueden añadirse siguiendo el algoritmo voraz de base reducida, tal como se describió anteriormente, en el que los límites de error a posteriori basados en residuos se limitan a fin de guiar el muestreo adaptativo en el espacio de parámetros a fin de generar modelos de RB eficientes que sean precisos en todo el dominio de parámetros de interés. Las funciones básicas de la interfaz de componentes se pueden agregar con base en la adición de datos que capturen la

transferencia de información dominante entre componentes adyacentes.

El método 200 incluye repetir, para cada modelo en la pluralidad de modelos, el análisis del indicador de errores y el aumento del número de funciones base hasta que el nivel de error de cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel (208) de tolerancia. En una realización, el método 200 incluye repetir, para cada modelo de la pluralidad de modelos, el análisis del indicador de error y el aumento del número de funciones básicas hasta que el nivel de error para cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel de tolerancia o hasta que se alcance un número umbral de iteraciones. Como ejemplo, el método 200 puede terminar (208) después de determinar que cada modelo de la pluralidad de modelos cumple con el nivel de tolerancia. Como otro ejemplo, el método 200 puede terminar (208) después de un número predefinido de iteraciones; de esta manera, si cada uno de la pluralidad de modelos no puede cumplir con el nivel de tolerancia, el método 200 no continúa iterando sin cesar.

En relación con el método 200, (202) - (208) se puede denominar etapa fuera de línea. En relación con el método 200, (202) - (208) pueden realizarse antes de la generación de una representación visual del modelo compuesto. En relación con el método 200, (202) - (208) pueden realizarse antes de la recepción, por el dispositivo informático, desde la primera fuente de datos operativos asociada con el activo físico, de los primeros datos operativos asociados con al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro de al menos un componente de la pluralidad de componentes.

En algunas realizaciones, antes de generar una representación visual opcional del modelo compuesto o recibir datos operativos, el método 200 incluye recibir la entrada del usuario (por ejemplo, para modelar un escenario "y si"). Por lo tanto, el método 200 puede incluir recibir, mediante el dispositivo informático, la primera entrada de usuario, que identifica un valor de entrada indicativo de al menos una condición física en la que se evaluará el activo físico y usar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto para generar al menos un valor de salida basado, al menos en parte, en el al menos un valor de entrada. en donde al menos un valor de salida es indicativo de un comportamiento del sistema físico en al menos una condición física, en donde al menos un valor de salida comprende una pluralidad de valores de salida en un dominio N-dimensional. El dominio N-dimensional puede ser un dominio tridimensional o cualquier otro valor de N. La entrada del usuario puede ser cualquiera de una variedad de tipos de entrada. Por ejemplo, la entrada de usuario puede identificar un valor de entrada extraído de un informe de inspección con base en una inspección física del activo físico. Como otro ejemplo, la entrada del usuario puede identificar un valor de entrada extraído de los datos operativos recibidos de un sensor asociado con el activo físico. Como ejemplo adicional, la entrada de usuario puede identificar un valor de entrada para modelar un componente en una condición operativa particular, tal como para realizar una estimación de la vida útil a la fatiga de las piezas críticas o para realizar una verificación de resistencia basada en un estándar industrial en al menos una condición operativa.

En algunas realizaciones, el método 200 puede incluir generar, mediante una herramienta de simulación ejecutada por el dispositivo informático, una representación visual del modelo compuesto. incluida la visualización de al menos un resultado de un análisis del activo físico basado en la física. En algunas realizaciones, la herramienta 304 de simulación genera la representación visual del modelo compuesto. La herramienta 304 de simulación puede generar una representación visual de todo el modelo compuesto, incluidas las visualizaciones de todos los resultados del análisis basado en la física del activo físico. Alternativamente, la herramienta 304 de simulación puede visualizar un subconjunto de los valores resultantes; por ejemplo, la herramienta 304 de simulación puede visualizar un nivel de tensión en un único punto de soldadura en lugar de un nivel de tensión en todo el activo físico. La herramienta 304 de simulación (que puede proporcionarse como un componente de hardware o como un componente de software) puede generar la representación visual. La herramienta 304 de simulación puede incluir una interfaz de usuario con la que un usuario del sistema 300 puede interactuar con la representación visual del modelo compuesto y proporcionar la entrada de usuario. Por ejemplo, la interfaz 314 de usuario puede permitir al usuario construir un modelo para un sistema físico especificando uno o más aspectos del sistema físico, como la geometría, el material y/o cualquier otra característica física adecuada. Una vez construido dicho modelo, el usuario puede, nuevamente a través de la interfaz 314 de usuario, ordenar a la herramienta 304 de simulación que realice una simulación basada en el modelo para predecir cómo puede comportarse el sistema físico en una o más condiciones seleccionadas. Los resultados de la simulación pueden entregarse al usuario a través de la interfaz 314 de usuario de cualquier manera adecuada, tal como renderizando visualmente uno o más valores de salida de la simulación. Por lo tanto, se proporciona una herramienta de simulación mejorada que permite al usuario modificar uno o más aspectos de un sistema físico y obtener resultados de simulación actualizados en tiempo real. Por ejemplo, se pueden proporcionar funciones de interfaz de usuario para que el usuario realice diversas modificaciones, incluyendo, entre otros, la modificación de uno o más parámetros de un componente, la adición de un componente (por ejemplo, clonando un componente existente), la eliminación de un componente, la desconexión de componentes previamente conectados, el traslado de un componente de una parte del sistema físico a otra parte del sistema físico y la rotación de un componente. En respuesta a dichos cambios solicitados por el usuario, la herramienta de simulación puede entregar rápidamente resultados de simulación actualizados al aprovechar los datos previamente calculados. Por ejemplo, en algunas implementaciones, la herramienta de simulación puede actualizar ciertos cálculos relacionados con componentes cuyos parámetros y/o conexiones se modifican, pero puede reutilizar datos calculados previamente para componentes que no se ven afectados directamente por los cambios. De acuerdo con otras realizaciones, una herramienta de simulación mejorada puede realizar una o más comprobaciones de coherencia para determinar si los cambios solicitados por un usuario son compatibles con otros aspectos de un sistema físico. La herramienta de simulación puede alertar al usuario si se detecta alguna incompatibilidad. Además, o alternativamente, la herramienta de

simulación puede proponer cambios adicionales en el sistema físico para eliminar una o más incompatibilidades introducidas por los cambios solicitados por el usuario. De acuerdo con otras realizaciones, se proporciona una herramienta de simulación mejorada que calcula automáticamente un error asociado con un resultado de simulación. En algunas implementaciones, un error puede ser un límite de error calculado rigurosamente, tal como una diferencia máxima posible entre el resultado de la simulación y un resultado que se habría obtenido si se hubiera calculado una solución FEA completa. Por ejemplo, en una modalidad en la que las aproximaciones de RB se calculan para las funciones interiores de los componentes, se puede calcular un límite de error "local" para cada función de burbuja, donde el límite de error local indica una diferencia entre un modelo de orden reducido calculado para la función de burbuja y una solución FEA completa correspondiente. Dichos límites de error local pueden combinarse entonces para obtener un límite de error global para todo un sistema físico o una parte del mismo. En otras implementaciones, un error puede ser una estimación del error que se puede calcular en menos tiempo en comparación con un límite de error riguroso. En algunas otras implementaciones, un usuario puede elegir qué tipo de error (por ejemplo, límite de error riguroso o estimación de error) va a ser calculado por la herramienta de simulación.

El método 200 incluye recibir, mediante el dispositivo informático, desde una primera fuente de datos operativos asociada con el activo físico, los primeros datos operativos asociados con al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro de al menos un componente en la pluralidad de componentes (210). El componente 310 en línea que se ejecuta en el dispositivo 306 informático puede recibir los primeros datos operativos. El dispositivo 306 informático puede recibir de la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los primeros datos operativos generados por un sensor asociado al activo físico. El dispositivo 306 informático puede recibir de la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los primeros datos operativos extraídos de un informe de inspección asociado al activo físico; por ejemplo, los datos de inspección pueden incluir un resultado de una inspección visual de un activo (por ejemplo, una observación de que hay una grieta o corrosión en una tubería y que la información debe estar integrada en el gemelo digital). El dispositivo 306 informático puede recibir de la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los primeros datos operativos generados por un sensor asociado al activo físico. Las entradas de datos operativos a un hilo digital pueden incluir los datos de inspección y sensor disponibles de los activos operativos. Los ejemplos incluyen, sin limitación, las mediciones de espesor basadas en la medición de espesor por ultrasonidos; la monitorización ambiental a intervalos de tiempo específicos, por ejemplo, los estados del viento y las olas en una estructura marina; la monitorización de la carga operativa, por ejemplo, las tasas de rendimiento, los niveles de llenado de los tanques y el número de ciclos de carga/descarga por intervalo de tiempo; las mediciones de sensores estructurales como acelerómetros y medidores de tensión; la monitorización de la presión y/o la temperatura.

El método 200 incluye actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los primeros datos (212) operativos recibidos. El dispositivo informático puede identificar, dentro de los primeros datos operativos recibidos, un valor de entrada indicativo de al menos una condición física en la que se evaluará el activo físico y usar el modelo compuesto para generar al menos un valor de salida basado, al menos en parte, en el al menos un valor de entrada. en donde al menos un valor de salida es indicativo de un comportamiento del sistema físico en al menos una condición física, en donde al menos un valor de salida comprende una pluralidad de valores de salida en un dominio N-dimensional. El dispositivo informático puede ejecutar una aplicación importadora que recibe datos de medición, formatea los datos y actualiza el modelo para incorporar datos de medición; por ejemplo, para las mediciones de espesor, el dispositivo informático puede recibir datos de medición en un documento incluyendo los datos de medición en un formato de valores separados por comas (por ejemplo, en una hoja de cálculo) y puede actualizar el grosor del modelo SCRBE para que coincida con las medidas importadas. Para los datos del sensor, el dispositivo informático puede recibir los datos en un formato acordado e incorporar los datos recibidos en el modelo SCRBE. Las lecturas de los sensores pueden recibirse en un formato de texto y, a continuación, el software del importador puede configurarse para leer el formato de texto acordado y aplicar los datos al modelo. El dispositivo informático puede recibir una identificación de dónde están instalados los sensores en un activo físico. El dispositivo informático puede recibir una identificación de un formato para los datos de inspección que especifique de qué parte del activo físico proviene cada medición. El formato puede acordarse entre el operador o propietario del activo físico y el usuario que genera el gemelo digital cuando el gemelo digital se configura inicialmente de modo que el gemelo digital se configure de manera coherente con los datos operativos que se recibirán. Una vez que el dispositivo informático recibe los datos operativos de la fuente de datos operativos, ya sea una observación del operador o una lectura de un sensor o un informe de inspección, el dispositivo informático puede usar los datos operativos recibidos como entrada para el modelo SCRBE.

En algunas realizaciones, la herramienta 304 de simulación genera la representación visual del modelo compuesto. En tales realizaciones, la herramienta 304 de simulación puede actualizar la representación visual del modelo compuesto con base en los valores de salida actualizados generados por el modelo compuesto usando los primeros datos operativos recibidos.

El método 200 puede incluir actualizar el modelo compuesto no solo una vez al recibir los primeros datos operativos de una primera fuente de datos operativos, sino muchas veces al recibir una pluralidad de datos operativos de una pluralidad de fuentes de datos operativos. Por ejemplo, el gemelo digital puede actualizarse constantemente a lo largo de la etapa en línea para mantenerse "sincronizado" con el activo físico. El método 200 puede ejecutar etapas para actualizar el modelo y cualquier representación visual generada opcionalmente con base en la recepción de diferentes datos de la misma fuente de datos operativos o con base en la recepción de diferentes datos de una fuente de datos operativos diferente, o ambos. Por lo tanto, el método 200 puede incluir recibir, mediante el dispositivo informático, de

la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los segundos datos operativos asociados a al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro del al menos un componente de la pluralidad de componentes; actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los segundos datos operativos recibidos; y proporcionar, mediante el dispositivo informático, una segunda recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado. En las realizaciones en las que la herramienta 304 de simulación ha generado una representación visual del modelo compuesto, la herramienta 304 de simulación puede actualizar la representación visual del modelo compuesto con base en los valores de salida actualizados generados por el modelo compuesto usando los segundos datos operativos recibidos. Por lo tanto, el método 200 puede incluir recibir, mediante el dispositivo informático, de la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los segundos datos operativos asociados a al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro del al menos un componente de la pluralidad de componentes; actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los segundos datos operativos recibidos; y proporcionar, mediante el dispositivo informático, una segunda recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado. En las realizaciones en las que la herramienta 304 de simulación ha generado una representación visual del modelo compuesto, la herramienta 304 de simulación puede actualizar la representación visual del modelo compuesto en función de los valores de salida actualizados generados por el modelo compuesto usando los segundos datos operativos recibidos.

Como se indicó anteriormente, el método 200 puede incluir la actualización periódica de la etapa Fuera de Línea. La actualización puede incluir cambiar los valores dentro de al menos un modelo de la pluralidad de modelos. La actualización puede incluir reemplazar al menos un modelo de la pluralidad de modelos para reflejar las nuevas condiciones de operación que se han observado (por ejemplo, por parte de los operadores que generan informes de inspección o por sensores que generan datos de sensores).

Por lo tanto, el método 200 puede incluir recibir los segundos datos operativos desde la primera fuente de datos operativos; actualizar al menos un modelo de la pluralidad de modelos con base en los segundos datos operativos recibidos; analizar, mediante el dispositivo informático, para al menos un modelo de la pluralidad de modelos, un indicador de error que identifique un nivel de error asociado con el al menos un modelo, para determinar si el nivel de error identificado supera un nivel de tolerancia; aumentar, mediante el dispositivo informático, una serie de funciones de base en la aproximación de elementos de base reducida por condensación estática reducida en puertos, con base en la determinación de que al menos un modelo tiene un nivel de error que supera el nivel de tolerancia; repetir el análisis del indicador de error y aumentar el número de funciones básicas para cada modelo de la pluralidad de modelos hasta que el nivel de error de cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel de tolerancia; actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los datos recibidos; y proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado. En las realizaciones en las que la herramienta 304 de simulación ha generado una representación visual del modelo compuesto, la herramienta 304 de simulación puede actualizar la representación visual del modelo compuesto con base en los valores de salida actualizados generados por el modelo compuesto usando los segundos datos operativos recibidos. De manera similar, el método 200 puede incluir recibir los segundos datos operativos desde la primera fuente de datos operativos; actualizar al menos un modelo de la pluralidad de modelos con base en los segundos datos operativos recibidos; analizar, mediante el dispositivo informático, para al menos un modelo de la pluralidad de modelos, un indicador de error que identifique un nivel de error asociado con el al menos un modelo, para determinar si el nivel de error identificado supera un nivel de tolerancia; aumentar, mediante el dispositivo informático, una serie de funciones de base en la aproximación de elementos de base reducida por condensación estática reducida en puertos, con base en la determinación de que al menos un modelo tiene un nivel de error que supera el nivel de tolerancia; repetir el análisis del indicador de error y aumentar el número de funciones básicas para cada modelo de la pluralidad de modelos hasta que el nivel de error de cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel de tolerancia; actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los datos recibidos; y proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado. En las realizaciones en las que la herramienta 304 de simulación ha generado una representación visual del modelo compuesto, la herramienta 304 de simulación puede actualizar la representación visual del modelo compuesto con base en los valores de salida actualizados generados por el modelo compuesto usando los segundos datos operativos recibidos.

El método 200 incluye proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo (214) compuesto actualizado. El sistema 100 puede generar la recomendación con base en al menos un valor de salida calculado por el modelo compuesto actualizado. Los resultados típicos del hilo digital son las comprobaciones de código específicas de la industria para comprobar la integridad estructural, como los estándares de resistencia, fatiga y aptitud para el servicio realizados por organismos de normalización reconocidos. Los cálculos que exigen estas normas suelen incluir el procesamiento posterior de los datos de esfuerzo (a menudo basados en cientos o miles de casos de carga distintos) para calcular cantidades como las estimaciones de fatiga restante o la utilización del doblado.

El componente 310 en línea puede generar la recomendación para mantener el activo físico. El componente 310 en línea puede proporcionar la recomendación a la herramienta 304 de simulación para su visualización al usuario a través de la interfaz 314 de usuario. Además de, o en lugar de, proporcionar recomendaciones para mantener el activo físico, el dispositivo informático de neumáticos 306 puede proporcionar una recomendación para identificar una

pluralidad de aspectos del activo físico para inspeccionar la pluralidad de aspectos clasificados según un nivel de prioridad, con base en el modelo compuesto actualizado. Además de, o en lugar de, proporcionar recomendaciones para mantener el activo físico, el dispositivo 306 informático puede proporcionar una recomendación para determinar el nivel de viabilidad de una modificación propuesta del activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado.

5 Además de, o en lugar de, proporcionar recomendaciones para mantener el activo físico, el dispositivo 306 informático puede proporcionar una recomendación para determinar el nivel de viabilidad de una modificación propuesta del activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado.

La interfaz 314 de usuario puede incluir una interfaz de tablero en la que los usuarios pueden hacer clic en un botón que ejecutará las comprobaciones basadas en estándares relevantes con base en el estado actual del gemelo digital (es decir, incorporando los datos operativos actualizados) y generará un informe basado en la verificación. El informe puede 10 incluir una o más recomendaciones, como "todo está bien", "Hay un problema con la región XYZ del activo" o "No está bien operar el activo en el escenario XYZ". Este resultado también puede presentarse como un "semáforo" para cada activo, por ejemplo, "luz verde" significa que se han aprobado todas las comprobaciones, "luz roja" significa que al menos una comprobación ha fallado e indica que hay algo que necesita más atención o investigación por parte del operador, 15 quien puede consultar el informe completo para obtener más información. En algunas realizaciones, el sistema 100 incluye una funcionalidad para transmitir un informe. que incluye las recomendaciones generadas para otro dispositivo informático. En algunas realizaciones, el sistema 100 incluye una funcionalidad para implementar una recomendación.

Haciendo referencia ahora a la FIG. 2B, un diagrama de bloques representa una visualización del método 200 que da como resultado un hilo digital para una estructura flotante en alta mar. Las entradas son datos de sensores y datos de 20 inspección, que se usan para actualizar y analizar automáticamente el gemelo digital estructural. El análisis suele consistir en miles de soluciones de SCRBE para evaluar la fortaleza y la fatiga del activo en su estado "tal como es". Una vez finalizado el análisis, se generan automáticamente informes basados en los estándares de la sociedad de clasificación.

Haciendo referencia ahora a la FIG. 2C, un diagrama de bloques representa una visualización del método 200 que da como resultado un hilo digital para una estructura flotante en alta mar. Como se muestra en la FIG. 2C, una pluralidad 25 de acelerómetros en una estructura (por ejemplo, el activo físico) monitorizan la respuesta estructural a su entorno. El método 200 ejecuta y genera informes automatizados con base en los estándares de la industria.

Como se ha mostrado, el marco de trabajo SCRBE descrito anteriormente proporciona las cuatro propiedades para el modelado de gemelos digitales que se describieron anteriormente. En cuanto al modelado holístico y detallado, el marco de trabajo SCRBE resuelve los problemas del costoso cálculo informático, lo que permite resolver de manera 30 eficiente sistemas equivalentes a 0 (107) o 0 (108) DOF FE. Esto permite el modelado holístico y detallado de sistemas estructurales a gran escala. En cuanto a la velocidad, el marco de trabajo SCRBE satisface el requisito como consecuencia tanto de los modelos RB locales de los componentes como de la reducción de puertos; el RB local de componentes permite modificar rápidamente un modelo y la reducción de puertos permite soluciones rápidas a nivel del sistema. En cuanto al modelado paramétrico, los modelos RB locales de componentes introducen las capacidades 35 de ROM paramétricas de una manera conveniente y eficiente, y esto se adapta bien a una gran cantidad de parámetros, ya que cada RB por componente codicioso generalmente solo necesita tratar con unos pocos parámetros. En cuanto al cumplimiento de las normas y la precisión certificable, el SCRBE es fundamentalmente un método basado en la física, que se formula en términos del mismo enfoque basado en mallas como FE, excepto en lo que respecta a la aceleración debida a la proyección en un conjunto reducido de DOF de puertos y DOF de RB interior de 40 componentes; esto significa que todos los estándares de análisis de integridad estructural que normalmente se diseñaban para FE se aplican directamente a los modelos SCRBE. Además, como se describió anteriormente, podemos evaluar los estimadores o indicadores de error para el enfoque SCRBE, que garantiza la precisión de cualquier solución que calculemos en la etapa En Línea. Por lo tanto, el enfoque basado en SCRBE proporciona todas las capacidades clave de los gemelos digitales para permitir los flujos de trabajo estructurales de los gemelos digitales 45 que son de interés para los sistemas industriales a gran escala.

Los métodos y sistemas descritos en el presente documento proporcionan funcionalidad para implementar un marco de trabajo SCRBE que proporciona capacidades potentes y únicas para gemelos digitales estructurales de activos a gran escala. Una metodología de enriquecimiento de ROM adaptable permite el entrenamiento eficiente y confiable 50 de los modelos SCRBE en la etapa Fuera de Línea, así como la evaluación de la precisión y la orientación sobre el enriquecimiento (cuando sea necesario) en la etapa En Línea. Una variedad de ejemplos de análisis estructural demuestran las capacidades de escalabilidad, velocidad y parametrización que ofrece el marco de trabajo SCRBE y los conceptos básicos de un hilo digital creado en torno a gemelos digitales estructurales basados en SCRBE se describieron anteriormente. El hilo digital descrito en este documento permite un marco de trabajo automatizado que proporciona a los operadores una visión más profunda de la integridad estructural basada en el estado "tal como es" 55 de los activos críticos y, por lo tanto, permite operaciones más seguras y eficientes.

Las FIG. 1B y 1C proporcionan ejemplos no limitativos de los métodos y sistemas descritos anteriormente. Haciendo referencia ahora a la FIG. 1B, un diagrama de bloques representa un modelo de casco, actualizado en función de al menos un valor incluido en un informe de inspección. El informe de inspección especifica un grosor para cada entidad 60 (por ejemplo, placa o refuerzo) del casco, de modo que un programa pueda actualizar automáticamente los espesores de las entidades correspondientes del gemelo digital estructural a fin de incorporar los datos de inspección. Haciendo referencia ahora a la FIG. 1C, un diagrama de bloques representa modelos de casco actualizados utilizados para

generar informes de verificación de pandeo automatizados. Las figuras de la izquierda muestran cada entidad del casco (por ejemplo, placas y paneles rígidos). Los datos de tensión, que se muestran en la figura central inferior, se extraen para cada entidad y, a continuación, las normas de pandeo especifican una fórmula para evaluar si cada entidad proporciona un valor de utilización. En la figura central superior mostramos los valores de utilización como un "mapa térmico" en el casco y cualquier entidad con una utilización superior a 1 se consideraría un fallo. A continuación, el sistema genera un informe (a la derecha) que identifica a las entidades que no han pasado la comprobación de seguridad. Los operadores del activo físico pueden utilizar dichos informes para priorizar la inspección, el mantenimiento y la reparación, o para evaluar el estado estructural del activo.

Haciendo referencia ahora a las FIG. 4A, 4B y 4C, los diagramas de bloques representan detalles adicionales con respecto a los dispositivos informáticos que pueden modificarse para ejecutar la funcionalidad para implementar los métodos y sistemas descritos anteriormente. Haciendo referencia ahora a la FIG. 4A, se representa una modalidad de un entorno de red. En resumen, el entorno de red comprende uno o más clientes 102a-102n (también denominados generalmente como máquina o máquinas 102 locales, cliente o clientes 102, nodo o nodos 102 cliente, máquina o máquinas 102 cliente, ordenador u ordenadores 102 cliente, dispositivo o dispositivos 102 cliente, dispositivo o dispositivos 102 informáticos, punto o puntos extremos 102 o nodo o nodos 102 finales) en comunicación con una o más máquinas 106a-106n remotas (también denominadas generalmente servidor o servidores 106 o dispositivo o dispositivos 106 informático) a través de una o más redes 404.

Aunque la FIG. 4A muestra una red 404 entre los clientes 102 y las máquinas 106 remotas, los clientes 102 y las máquinas 106 remotas pueden estar en la misma red 404. La red 404 puede ser una red de área local (LAN), tal como la Intranet de una empresa, una red de área metropolitana (MAN) o una red de área amplia (WAN), como Internet o la red mundial. En algunas realizaciones, hay múltiples redes 404 entre el cliente o clientes y las máquinas 106 remotas. En una de estas realizaciones, una red 404' (no mostrada) puede ser una red privada y una red 404 puede ser una red pública. En otra de estas realizaciones, una red 404' (no mostrada) puede ser una red privada y una red 404 puede ser una red pública. En otra realización más, las redes 404 y 404' pueden ser ambas redes privadas. En otra realización más, las redes 404 y 404' pueden ser ambas redes públicas.

La red 404 puede ser de cualquier tipo y/o forma de red y puede incluir cualquiera de las siguientes: una red punto a punto, una red de transmisión, una red de área amplia, una red de área local, una red de telecomunicaciones, una red de comunicación de datos, una red informática, una red ATM (Modo de Transferencia Asíncrona), una red SONET (Red Óptica Síncrona), una red SDH (Jerarquía Digital Síncrona), una red inalámbrica y una red por cable. En algunas realizaciones, la red 404 puede comprender un enlace inalámbrico, tal como un canal de infrarrojos o una banda de satélite. La topología de la red 404 puede ser una topología de red de bus, estrella o anillo. La red 404 puede ser de cualquier topología de red conocida por los expertos en la materia, capaz de soportar las operaciones descritas en el presente documento. La red 404 puede comprender redes de telefonía móvil que utilizan cualquier protocolo o protocolos usados para comunicarse entre dispositivos móviles (incluidas las tabletas y los dispositivos portátiles en general), incluidos AMPS, TDMA, CDMA, GSM, GPRS, UMTS o LTE. En algunas realizaciones, se pueden transmitir diferentes tipos de datos a través de diferentes protocolos. En otras realizaciones, los mismos tipos de datos pueden transmitirse a través de diferentes protocolos.

Un cliente o clientes 102 y una máquina 106 remota (denominados generalmente dispositivos 100 informáticos) pueden ser cualquier estación de trabajo, ordenador de escritorio, ordenador portátil o portátil, servidor, ordenador portable, teléfono móvil, teléfono inteligente móvil u otro dispositivo de telecomunicación portátil, dispositivo de reproducción multimedia, sistema de juego, dispositivo informático móvil o cualquier otro tipo y/o forma de dispositivo informático, de telecomunicaciones o multimedia que sea capaz de comunicarse en cualquier tipo y forma de red y que tenga suficiente potencia de procesador y capacidad de memoria para realizar las operaciones descritas en este documento. Un cliente o clientes 102 puede ejecutar, operar o proporcionar de otro modo una aplicación, que puede ser cualquier tipo y/o forma de software, programa o instrucciones ejecutables. incluyendo, sin limitación, cualquier tipo y/o forma de navegador web, cliente basado en la web, aplicación cliente-servidor, un control ActiveX o un applet JAVA, o cualquier otro tipo y/o forma de instrucciones ejecutables capaces de ejecutarse en los clientes 102.

En un ejemplo, un dispositivo 106 informático proporciona la funcionalidad de un servidor web. En algunas realizaciones, un servidor 106 web comprende un servidor web de código abierto, tal como los servidores web NGINX proporcionados por NGINX, Inc., de San Francisco, CA, o los servidores APACHE mantenidos por la Apache Software Foundation de Delaware. En otras realizaciones, el servidor web ejecuta software propietario, tal como los productos de SERVICIOS DE INFORMACIÓN DE INTERNET proporcionados por Microsoft Corporation de Redmond, WA, los productos de servidor web ORACLE IPLANET proporcionados por Oracle Corporation de Redwood Shores, CA, o los productos BEA WEBLOGIC proporcionados por BEA Systems de Santa Clara, CA.

En algunas realizaciones, el sistema puede incluir múltiples máquinas 106 remotas agrupadas lógicamente. En una de estas realizaciones, el grupo lógico de máquinas remotas puede denominarse granja 438 de servidores. En otra de estas realizaciones, la granja 438 de servidores puede administrarse como una sola entidad.

Las FIG. 4B y 4C representan diagramas de bloques de un dispositivo 100 informático útil para poner en práctica una modalidad del cliente o clientes 102 o de una máquina 106 remota. Como se muestra en las FIG. 4B y 4C, cada dispositivo informático 100 incluye una unidad 421 central de procesamiento y una unidad 422 de memoria principal.

Como se muestra en la FIG. 4B, un dispositivo 100 informático puede incluir un dispositivo 428 de almacenamiento, un dispositivo 416 de instalación, una interfaz 418 de red, un controlador 423 de I/O, dispositivos 424a-n de visualización, un teclado 426, un dispositivo 427 señalador, tal como un ratón, y uno o más de otros dispositivos 430a-n de I/O. El dispositivo 428 de almacenamiento puede incluir, sin limitación, un sistema operativo y un software. Como se muestra en la FIG. 4C, cada dispositivo 100 informático también puede incluir elementos opcionales adicionales, tales como un puerto 403 de memoria, un puente 470, uno o más dispositivos 430a-n de entrada/salida (generalmente denominados con el número de referencia 430) y una memoria 440 caché en comunicación con la unidad 421 central de procesamiento.

La unidad 421 central de procesamiento es cualquier circuito lógico que responde y procesa las instrucciones extraídas de la unidad 422 de memoria principal. En muchas realizaciones, la unidad 421 central de procesamiento es proporcionada por una unidad de microprocesador, tal como: las fabricadas por Intel Corporation de Mountain View, California; las fabricadas por Motorola Corporation de Schaumburg, Illinois; las fabricadas por Transmeta Corporation de Santa Clara, California; las fabricadas por International Business Machines de White Plains, Nueva York; o las fabricadas por Advanced Micro Devices de Sunnyvale, CA. Otros ejemplos incluyen los procesadores SPARC, los procesadores ARM, los procesadores usados para crear cajas blancas de UNIX/LINUX y los procesadores para dispositivos móviles. El dispositivo 400 informático puede basarse en cualquiera de estos procesadores, o en cualquier otro procesador capaz de funcionar como se describe en el presente documento.

La unidad 422 de memoria principal puede ser uno o más chips de memoria capaces de almacenar datos y permitir que el microprocesador 421 acceda directamente a cualquier ubicación de almacenamiento. La memoria 422 principal puede basarse en cualquier chip de memoria disponible capaz de funcionar como se describe en el presente documento. En la realización mostrada en la FIG. 4B, el procesador 421 se comunica con la memoria 422 principal a través de un bus 450 de sistema. La FIG. 4C representa una modalidad de un dispositivo 400 informático en el que el procesador se comunica directamente con la memoria 422 principal a través de un puerto 403 de memoria. La FIG. 4C también representa una modalidad en la que el procesador 321 principal se comunica directamente con la memoria 440 caché a través de un bus secundario, a veces denominado bus trasero. En otras realizaciones, el procesador 421 principal se comunica con la memoria 440 caché usando el bus 450 de sistema.

En la realización mostrada en la FIG. 4B, el procesador 421 se comunica con varios dispositivos 430 de I/O a través de un bus 450 de sistema local. Se pueden usar varios buses para conectar la unidad 421 central de procesamiento a cualquiera de los dispositivos 430 de I/O. incluyendo un bus VESA VL, un bus ISA, un bus EISA, un bus de Arquitectura MicroCanal (MCA), un bus PCI, un bus PCI-X, un bus PCI-Express o un NuBus. Para las realizaciones en las que el dispositivo de I/O es elemento de visualización 424 de vídeo, el procesador 421 puede usar un Puerto Gráfico Avanzado (AGP) para comunicarse con el elemento de visualización 424. La FIG. 4C representa un ejemplo de un ordenador 400 en el que el procesador 421 principal también se comunica directamente con un dispositivo 430b de I/O mediante, por ejemplo, la tecnología de comunicaciones HYPERTRANSPORT, RAPIDIO o INFINIBAND.

Uno o más de una amplia variedad de dispositivos 430a-n de I/O pueden estar presentes o conectados al dispositivo 400 informático, cada uno de los cuales puede ser del mismo tipo y/o forma o de diferente tipo. Los dispositivos de entrada incluyen teclados, ratones, paneles táctiles, bolas táctiles, micrófonos, escáneres, cámaras y tabletas de dibujo. Los dispositivos de salida incluyen pantallas de vídeo, altavoces, impresoras de inyección de tinta, impresoras láser, impresoras 3D e impresoras de sublimación de tinta. Los dispositivos de I/O pueden controlarse mediante un controlador 423 de I/O como se muestra en la FIG. 4B. Además, un dispositivo de I/O también puede proporcionar almacenamiento y/o un medio 416 de instalación para el dispositivo 400 informático. En algunas realizaciones, el dispositivo 400 informático puede proporcionar conexiones USB (no mostradas) para recibir dispositivos de almacenamiento USB portátiles, como la línea de dispositivos de unidades flash USB fabricada por Twintech Industry, Inc. de Los Alamitos, CA.

Haciendo referencia todavía a la FIG. 4B, el dispositivo 100 informático puede soportar cualquier dispositivo 416 de instalación adecuado, tal como una unidad de disquete para recibir disquetes, como discos de 3,5 pulgadas, 5,25 pulgadas o discos ZIP; una unidad de CD-ROM; una unidad de CD-R/RW; una unidad de DVD-ROM; unidades de cinta de varios formatos; un dispositivo USB; un disco duro o cualquier otro dispositivo adecuado para instalar software y programas. En algunas realizaciones, el dispositivo 400 informático puede proporcionar funcionalidad para instalar software a través de una red 404. El dispositivo 400 informático puede comprender además un dispositivo de almacenamiento, tal como una o más unidades de disco duro o matrices redundantes de discos independientes, para almacenar un sistema operativo y otro software. Alternativamente, el dispositivo 100 informático puede basarse en chips de memoria para el almacenamiento en lugar de en discos duros.

Además, el dispositivo 400 informático puede incluir una interfaz 418 de red para interactuar con la red 404 a través de una variedad de conexiones. incluidas, entre otras, líneas telefónicas estándar, enlaces LAN o WAN (por ejemplo, 802.11, T1, T3, 56 kb, X.25, SNA, DECNET), conexiones de banda ancha (por ejemplo, ISDN, Frame Relay, ATM, Gigabit Ethernet, Ethernet-over-SONET), conexiones inalámbricas o alguna combinación de todas las anteriores. Las conexiones se pueden establecer mediante diversos protocolos de comunicación (por ejemplo, TCP/IP, IPX, SPX, NetBIOS, Ethernet, ARCNET, SONET, SDH, Interfaz de Datos Distribuidos por Fibra (FDDI), RS232, IEEE 802.11, IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11g, IEEE 802.11n, 802.15.4, Bluetooth, ZIGBEE, CDMA, GSM, WiMAX y conexiones asíncronas directas). En un ejemplo, el dispositivo 400 informático se comunica con otros dispositivos 100'

informáticos a través de cualquier tipo y/o forma de pasarela o protocolo de tunelización, tal como Capa de Conectores Seguros (SSL) o Seguridad de Capa de Transporte(TLS). La interfaz 418 de red puede comprender un adaptador de red integrado, una tarjeta de interfaz de red, una tarjeta de red PCMCIA, un adaptador de red con bus de tarjetas, un adaptador de red inalámbrico, un adaptador de red USB, un módem o cualquier otro dispositivo adecuado para conectar el dispositivo 100 informático a cualquier tipo de red capaz de comunicarse y realizar las operaciones descritas en el presente documento.

En otras realizaciones, un dispositivo 430 de I/O puede ser un puente entre el bus 150 de sistema y un bus de comunicación externo, como un bus USB, un bus de escritorio de Apple, una conexión en serie RS-232, un bus SCSI, un bus FireWire, un bus FireWire 800, un bus Ethernet, un bus AppleTalk, un bus Gigabit Ethernet, un bus de Modo de Transferencia Asíncrono, un bus HIPPI, un bus Super HIPPI, un bus SerialPlus, un bus SCI/LAMP, un bus FibreChannel o un bus de interfaz de sistemas informáticos pequeños con conexión en serie.

Un dispositivo 400 informático del tipo representado en las FIG. 4B y 4C normalmente funciona bajo el control de los sistemas operativos, que controlan la programación de las tareas y el acceso a los recursos del sistema. El dispositivo 400 informático puede ejecutar cualquier sistema operativo, tal como cualquiera de las versiones de los sistemas operativos MICROSOFT WINDOWS, las diferentes versiones de los sistemas operativos UNIX y LINUX, cualquier versión del MAC OS para ordenadores Macintosh, cualquier sistema operativo integrado, cualquier sistema operativo en tiempo real, cualquier sistema operativo de código abierto, cualquier sistema operativo propietario, cualquier sistema operativo para dispositivos informáticos móviles o cualquier otro sistema operativo capaz de ejecutarse en el dispositivo informático y realizar las operaciones descritas en este documento. Los sistemas operativos típicos incluyen, pero no se limitan a: WINDOWS 3.x, WINDOWS 95, WINDOWS 98, WINDOWS 2000, WINDOWS NT 3.1-4.0, WINDOWS CE, WINDOWS XP, WINDOWS 7, WINDOWS 8, WINDOWS VISTA y WINDOWS 10, todos fabricados por Microsoft Corporation de Redmond, WA; cualquier versión de MAC OS fabricada por Apple Inc. de Cupertino, CA; OS/2 fabricado por International Business Machines de Armonk, NY; Red Hat Enterprise Linux, un sistema operativo con variantes de Red Linux distribuido por Red Linux Hat, Inc., de Raleigh, Carolina del Norte; Ubuntu, un sistema operativo disponible gratuitamente distribuido por Canonical Ltd. de Londres, Inglaterra; o cualquier tipo y/o forma de un sistema operativo Unix, entre otros.

El dispositivo 400 informático puede ser una estación de trabajo, un ordenador de sobremesa, un ordenador portátil, un servidor, un ordenador portátil, un teléfono móvil u otro dispositivo de telecomunicaciones portátil, un dispositivo de reproducción multimedia, un sistema de juego, un dispositivo informático móvil o cualquier otro tipo y/o forma de dispositivo informático, de telecomunicaciones o multimedia capaz de comunicarse y que tenga suficiente potencia de procesador y capacidad de memoria para realizar las operaciones descritas en el presente documento. En algunas realizaciones, el dispositivo 100 informático puede tener diferentes procesadores, sistemas operativos y dispositivos de entrada consistentes con el dispositivo. En otras realizaciones, el dispositivo 400 informático es un dispositivo móvil, tal como un teléfono/teléfono inteligente móvil habilitado para Java o un asistente digital personal (PDA). El dispositivo 400 informático puede ser un dispositivo móvil como los fabricados, a modo de ejemplo y sin limitación, por Apple Inc. de Cupertino, CA; Google/Motorola Div. de Ft. Worth, Texas; Kyocera de Kioto (Japón); Samsung Electronics Co., Ltd. de Seúl (Corea); Nokia de Finlandia; Hewlett-Packard Development Company, L.P. y/o Palm, Inc. de Sunnyvale, California; Sony Ericsson Mobile Communications AB de Lund (Suecia); o Research In Motion Limited de Waterloo, Ontario (Canadá). En otras realizaciones, el dispositivo 100 informático es un teléfono inteligente, un PC de BOLSILLO, un TELÉFONO PC de BOLSILLO u otro dispositivo móvil portátil compatible con el software Microsoft Windows Mobile.

En algunas realizaciones, el dispositivo 400 informático es un reproductor de audio digital. En una de estas realizaciones, el dispositivo 400 informático es un reproductor de audio digital, tal como las líneas de dispositivos IPOD, IPOD TOUCH, IPOD NANO e IPOD SHUFFLE de Apple Inc. En otra de estas realizaciones, el reproductor de audio digital puede funcionar como un reproductor multimedia portátil y como un dispositivo de almacenamiento masivo. En otras realizaciones, el dispositivo 100 informático es un reproductor de audio digital tal como los fabricados, por ejemplo, y sin limitación, por Samsung Electronics America de Ridgefield Park, Nueva Jersey, o Creative Technologies Ltd. de Singapur. En otras realizaciones adicionales, el dispositivo 400 informático es un reproductor multimedia portátil o un reproductor de audio digital que admite formatos de archivo que incluyen, entre otros, MP3, WAV, M4A/AAC, AAC protegido por WMA, AEFF, audiolibros Audible, formatos de archivos de audio Apple Lossless y formatos de archivo de vídeo MPEG-4 (H.264/MPEG-4 AVC) .mov, .m4v y .mp4.

En algunas realizaciones, el dispositivo 400 informático incluye una combinación de dispositivos, tales como un teléfono móvil combinado con un reproductor de audio digital o un reproductor multimedia portátil. En una de estas realizaciones, el dispositivo informático 100 es un dispositivo de la línea combinada de reproductores de audio digital y teléfonos móviles de Google y Motorola. En otra de estas realizaciones, el dispositivo 400 informático es un dispositivo de la línea de dispositivos para teléfonos inteligentes IPHONE fabricado por Apple Inc. En otra de estas realizaciones, el dispositivo 400 informático es un dispositivo que ejecuta la plataforma de telefonía móvil de código abierto ANDROID distribuida por la Open Handset Alliance; por ejemplo, el dispositivo 100 puede ser un dispositivo como los proporcionados por Samsung Electronics de Seúl (Corea) o HTC Headquarters of Taiwan, R.O.C. es un dispositivo tipo tableta tal como, por ejemplo y sin limitación, la línea de dispositivos IPAD fabricados por Apple Inc.; el PLAYBOOK fabricado por Research In Motion; la línea de dispositivos CRUZ fabricada por Velocity Micro, Inc. de Richmond, VA; la línea de dispositivos FOLIO y THRIVE fabricados por Toshiba America Information Systems, Inc. de Irvine, CA; la línea de dispositivos GALAXY fabricada por Samsung; la línea de dispositivos HP SLATE fabricada por

Hewlett-Packard; y la línea de dispositivos STREAK fabricada por Dell, Inc. de Round Rock, TEXAS.

5 Un dispositivo 400 informático puede ser un servidor de archivos, un servidor de aplicaciones, un servidor web, un servidor proxy, un dispositivo, un dispositivo de red, una pasarela, una pasarela de aplicaciones, un servidor de pasarela, un servidor de virtualización, un servidor de despliegue, un servidor VPN SSL o un cortafuegos. En algunas realizaciones, un dispositivo 400 informático proporciona un servicio de usuario con acceso telefónico de autenticación remota y se denomina servidor RADIUS. En otras realizaciones, un dispositivo informático 100 puede tener la capacidad de funcionar como un servidor de aplicaciones o como un servidor de aplicaciones maestro. En otras realizaciones adicionales, un dispositivo 400 informático es un servidor blade.

10 Un dispositivo 400 informático puede denominarse nodo cliente, máquina cliente, nodo extremo o punto final. En algunas realizaciones, un cliente 400 tiene la capacidad de funcionar tanto como un nodo cliente que busca acceso a los recursos proporcionados por un servidor como un nodo servidor que proporciona acceso a los recursos alojados para otros clientes.

15 En algunas realizaciones, un primer dispositivo informático cliente 400a se comunica con un segundo dispositivo informático servidor 400b. En una realización, el cliente se comunica con uno de los dispositivos 400 informáticos en una granja de servidores. A través de la red, el cliente puede, por ejemplo, solicitar la ejecución de varias aplicaciones alojadas en los dispositivos 400 informáticos en la granja de servidores y recibir datos de salida de los resultados de la ejecución de la aplicación para su visualización.

REIVINDICACIONES

1. Un método para mantener un activo físico con base en recomendaciones generadas al analizar un modelo del activo físico, comprendiendo el modelo una pluralidad de componentes y formando un gemelo digital basado en la física del activo físico, comprendiendo el método:
 - 5 (a) construir, mediante un dispositivo informático, usando una aproximación de elementos básicos reducidos por condensación estática reducida por puerto de al menos una parte de una ecuación diferencial parcial, un modelo compuesto de una pluralidad de modelos, representando cada uno de la pluralidad de modelos al menos uno de una pluralidad de componentes, representando cada uno de la pluralidad de componentes al menos una región de un activo físico;
 - 10 (b) analizar, mediante el dispositivo informático, para al menos un modelo de la pluralidad de modelos, un indicador de error que identifica un nivel de error asociado con el al menos un modelo, para determinar que el nivel de error identificado supera un nivel de tolerancia;
 - (c) aumentar, mediante el dispositivo informático, un número de funciones básicas en la aproximación de elementos de base reducidos por condensación estática reducida en puertos, con base en la determinación de que al menos un modelo tiene un nivel de error que supera el nivel de tolerancia.
 - 15 (d) repetir (b) y (c) para cada modelo de la pluralidad de modelos hasta que el nivel de error de cada uno de la pluralidad de modelos esté por debajo del nivel de tolerancia;
 - (e) recibir, mediante el dispositivo informático, desde una primera fuente de datos operativos asociada con el activo físico, los primeros datos operativos asociados con al menos una región del activo físico representada por al menos un parámetro de al menos un componente en la pluralidad de componentes. en donde los primeros datos operativos se reciben de un sensor asociado con el activo físico;
 - 20 (f) actualizar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los primeros datos operativos recibidos.
 - (g) proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado, identificando la recomendación una pluralidad de aspectos del activo físico a inspeccionar, la pluralidad de aspectos clasificados de acuerdo con un nivel de prioridad con base en el modelo compuesto actualizado.
 - 25
2. El método de la reivindicación 1, en donde (a) - (d) se realizan antes de (e).
3. El método de la reivindicación 1, que comprende además, después de (a) - (d) y antes (e), generar un análisis basado en la física del activo físico usando el modelo compuesto, en donde la generación comprende además:
 - 30 recibir, mediante el dispositivo informático, la primera entrada del usuario que identifica un valor de entrada indicativo de al menos una condición física en la que se va a evaluar el activo físico; y
 - usar, mediante el dispositivo informático, el modelo compuesto para generar al menos un valor de salida basado, al menos en parte, en el al menos un valor de entrada, en donde al menos un valor de salida es indicativo de un comportamiento del sistema físico en al menos una condición física, en donde al menos un valor de salida comprende una pluralidad de valores de salida en un dominio N-dimensional.
 - 35
4. El método de la reivindicación 3, en donde la recepción comprende además recibir, mediante el dispositivo informático, la entrada del usuario que identifica un valor de entrada extraído de un informe de inspección con base en una inspección física del activo físico.
- 40 5. El método de la reivindicación 3, en donde la recepción comprende además recibir, mediante el dispositivo informático, la entrada del usuario que identifica un valor de entrada extraído de los datos operativos recibidos de un sensor asociado con el activo físico.
6. El método de la reivindicación 1, que comprende además: (h) generar, mediante una herramienta de simulación ejecutada por el dispositivo informático, una representación visual del modelo compuesto incluida la visualización de al menos un resultado de un análisis del activo físico basado en la física.
- 45 7. El método de la reivindicación 6, que comprende además: (i) actualizar, mediante la herramienta de simulación, la representación visual, con base en los primeros datos operativos recibidos.
8. El método de la reivindicación 1, en donde (d) comprende repetir (b) y (c) para cada modelo de la pluralidad de modelos hasta que se alcance un número umbral de iteraciones.
- 50 9. El método de la reivindicación 1, en donde (e) comprende además recibir, por el dispositivo informático, desde la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los primeros datos operativos generados por un sensor

asociado al activo físico.

10. El método de la reivindicación 1, en donde (e) comprende además recibir, por el dispositivo informático, desde la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los primeros datos operativos extraídos desde un informe de inspección asociado al activo físico.

5 11. El método de la reivindicación 1, en donde (e) comprende además recibir, por el dispositivo informático, desde la primera fuente de datos operativos asociada al activo físico, los primeros datos operativos generados por un operador del activo físico.

10 12. El método de la reivindicación 1, que comprende además: (h) proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para determinar el nivel de viabilidad de una modificación propuesta del activo físico y/o una recomendación para determinar el nivel de operabilidad del activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado.

13. El método de la reivindicación 1, que comprende además:

15 (h) recibir, mediante el dispositivo informático, de una segunda fuente de datos operativos asociada con el activo físico, segundos datos operativos asociados con al menos una región del activo físico representada por el al menos un parámetro de al menos un componente de la pluralidad de componentes;

(i) actualizar, por el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los segundos datos operativos recibidos; y

(j) proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado.

20 14. El método de la reivindicación 1, que comprende además:

(h) recibir, mediante el dispositivo informático, de una segunda fuente de datos operativos asociada con el activo físico, segundos datos operativos asociados con al menos una segunda región del activo físico representada por al menos un segundo parámetro de al menos un segundo componente de la pluralidad de componentes;

25 (i) actualizar, por el dispositivo informático, el modelo compuesto, con base en los segundos datos operativos recibidos; y

(j) proporcionar, mediante el dispositivo informático, una recomendación para mantener el activo físico, con base en el modelo compuesto actualizado.

30 15. Un medio legible por ordenador, no transitorio, codificado con instrucciones ejecutables por ordenador que, cuando se ejecutan en un dispositivo informático, hacen que el dispositivo informático lleve a cabo el método según cualquier reivindicación anterior.

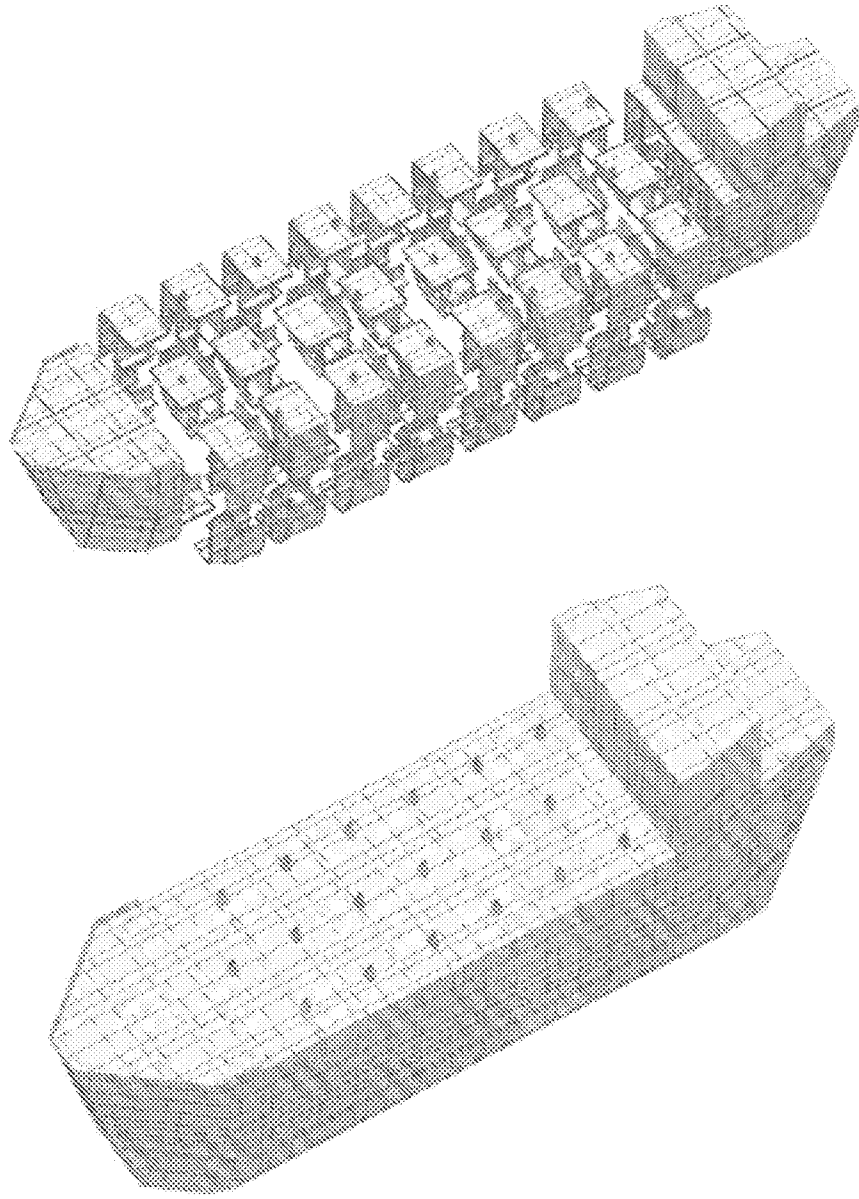


Fig. 1A

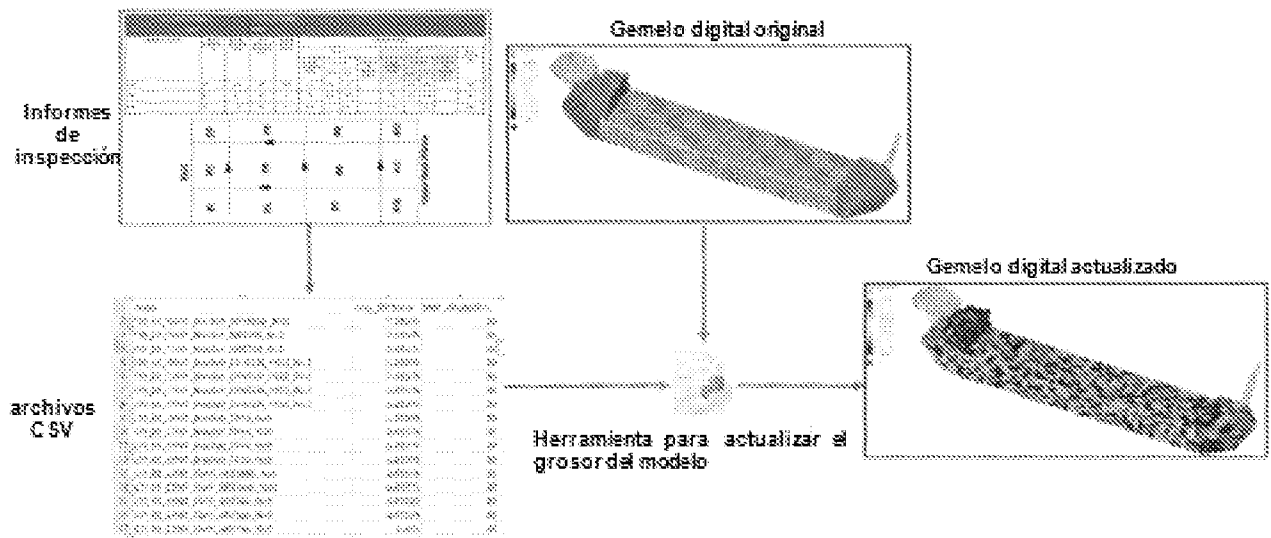


Fig. 1B

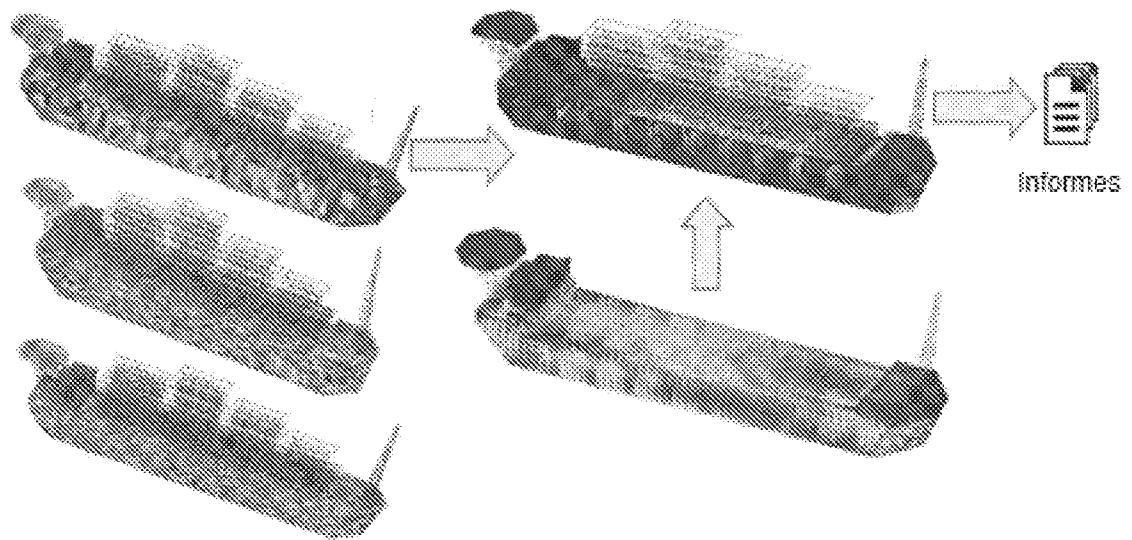


Fig. 1C/

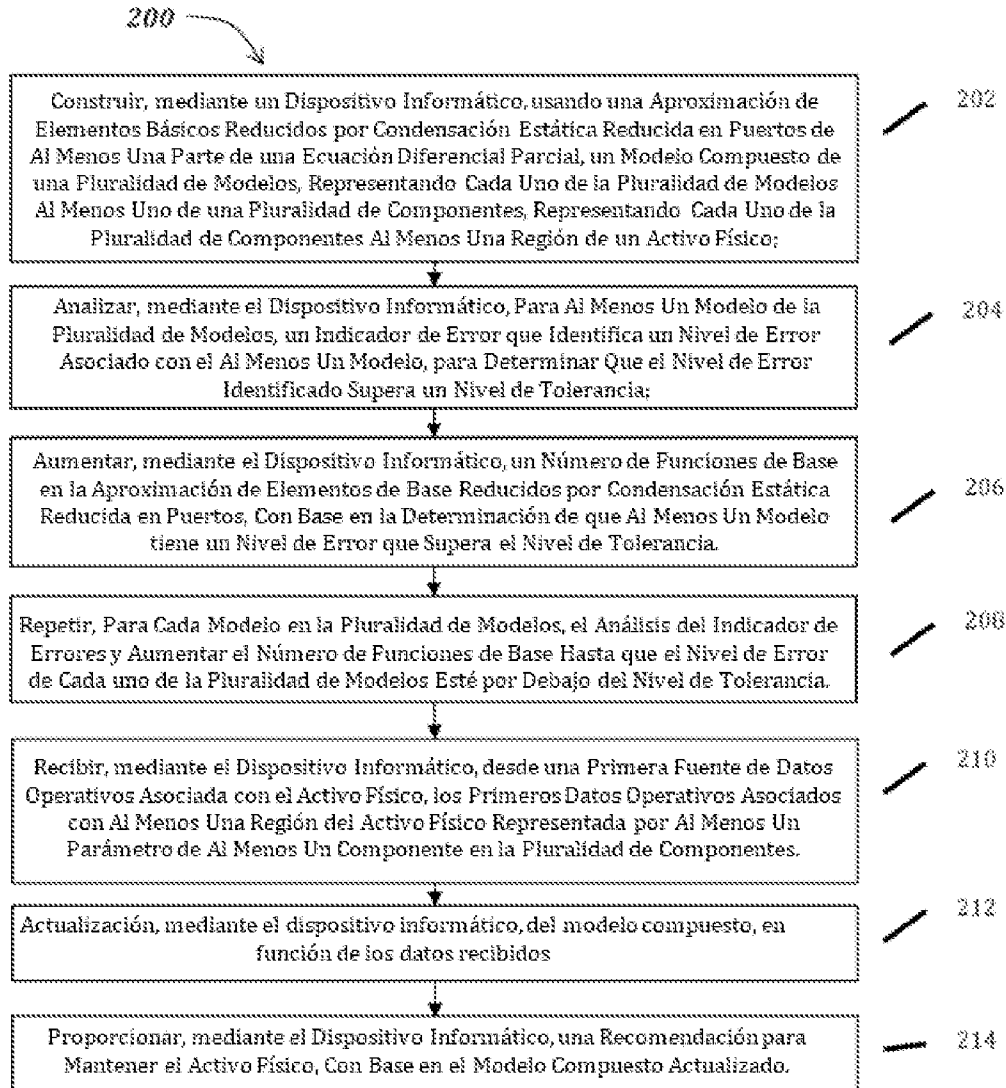


Fig. 2A



Fig. 2B

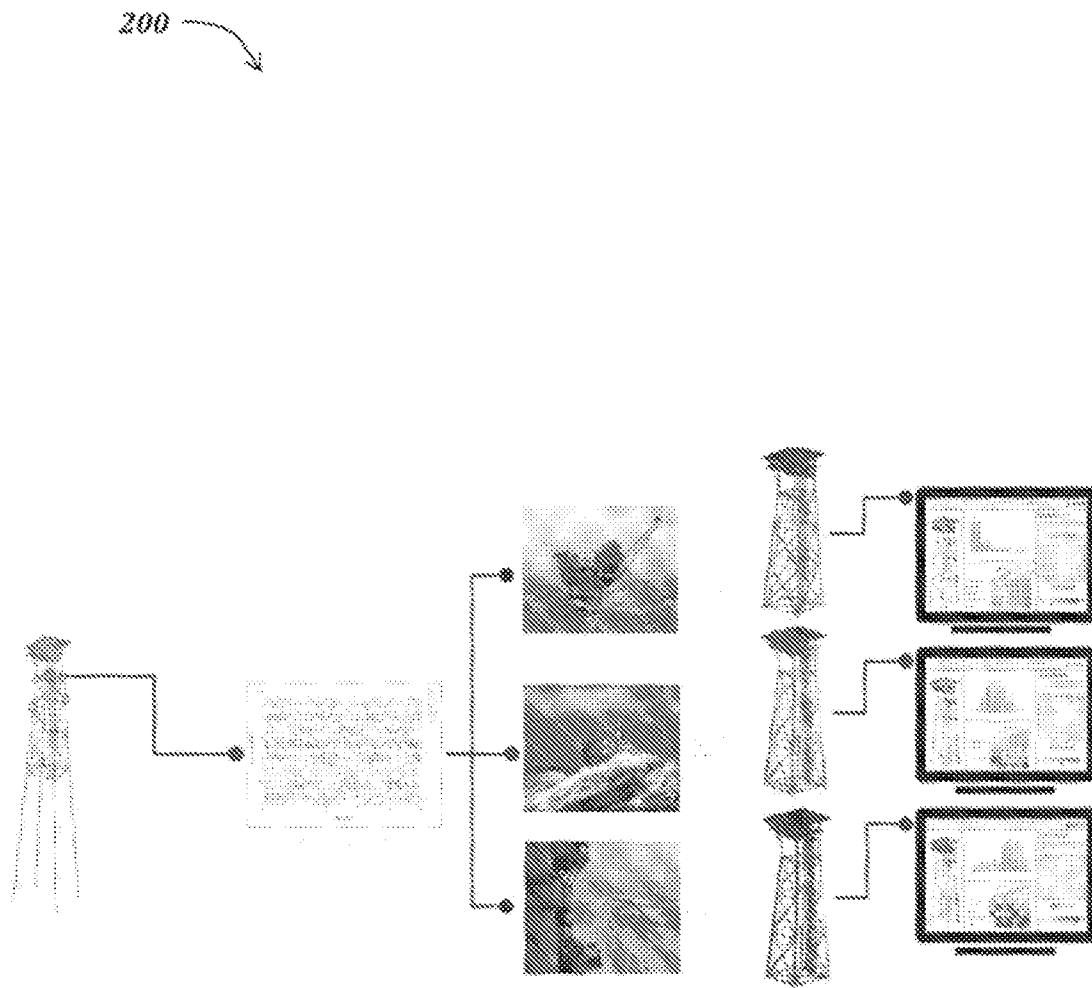


Fig. 2C

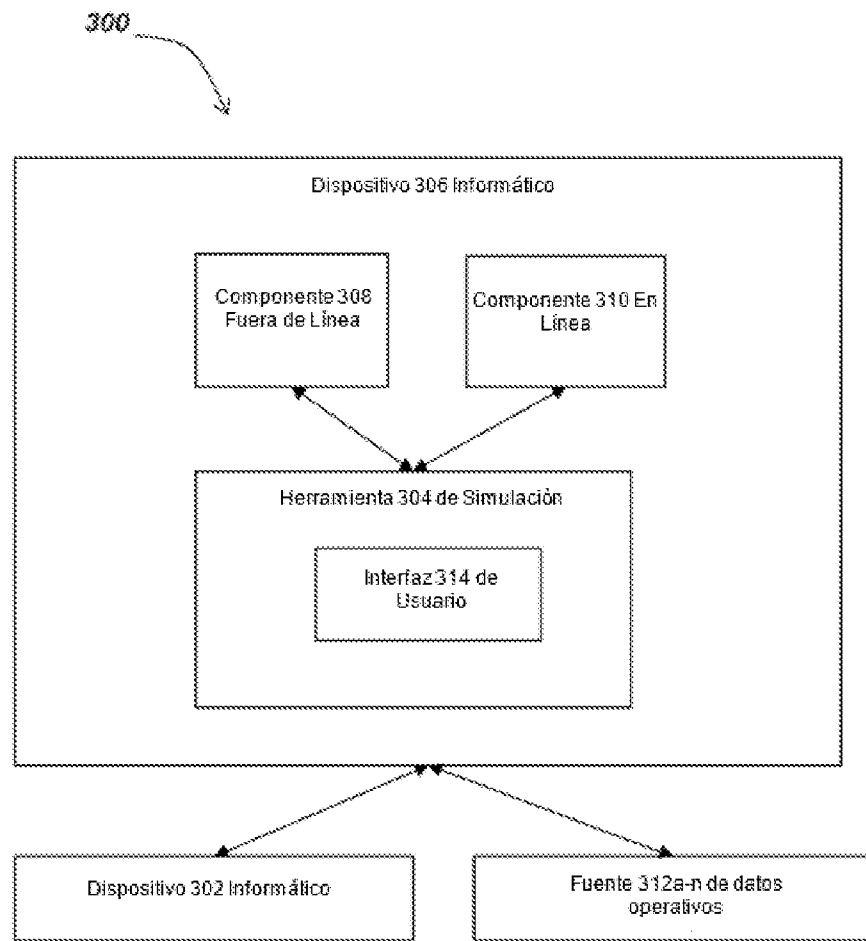


Fig. 3

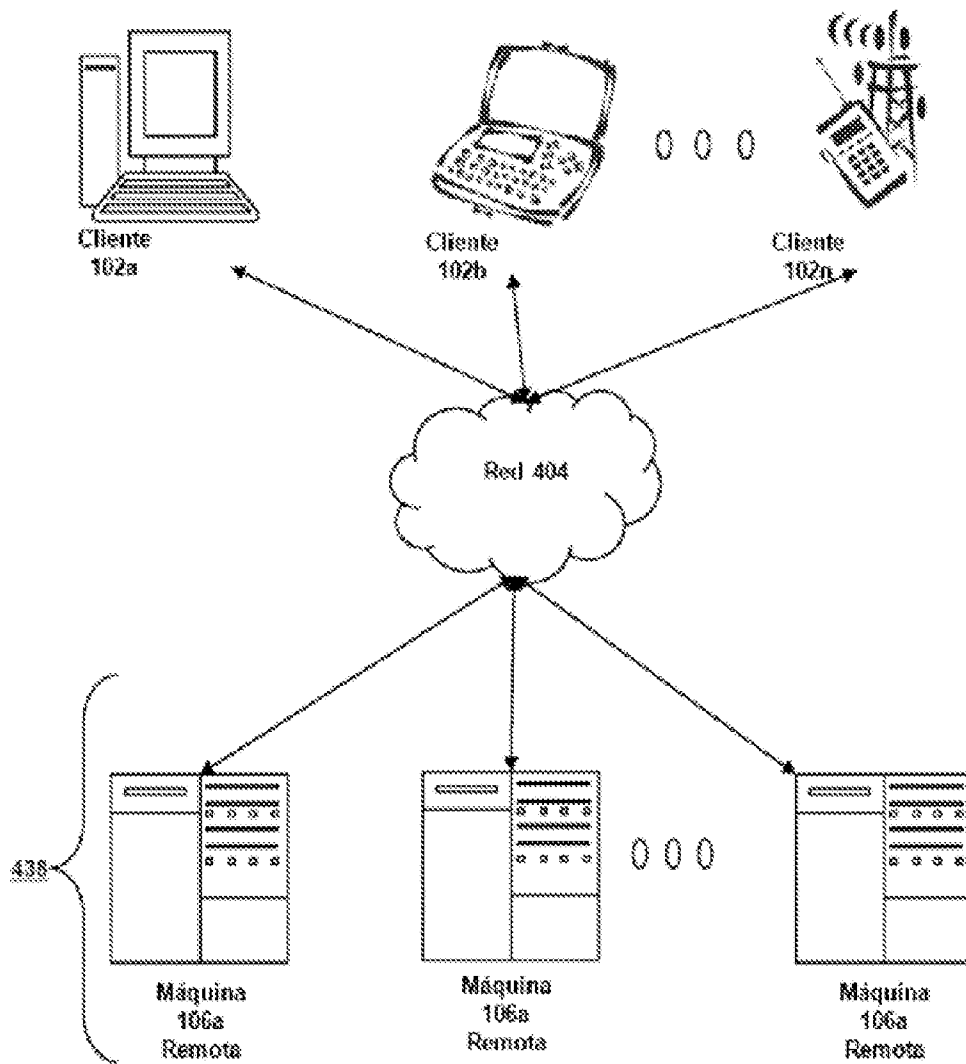


Fig. 4A

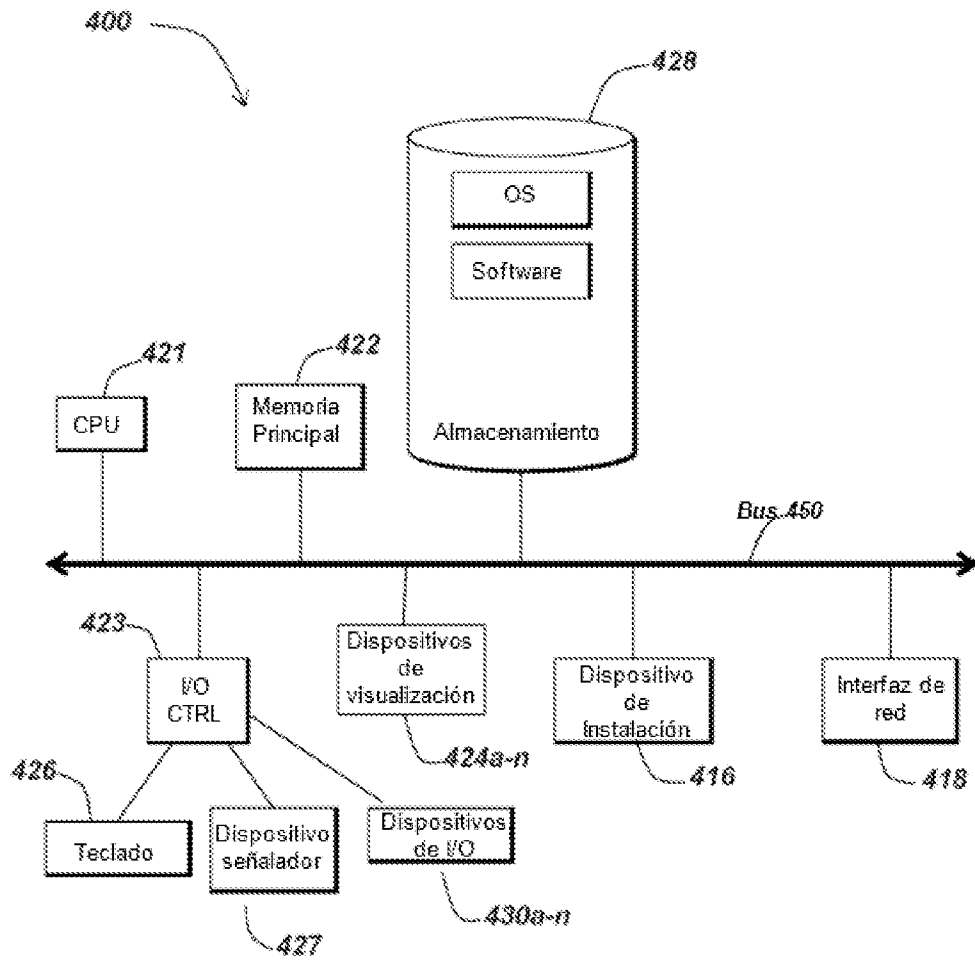


Fig. 4B

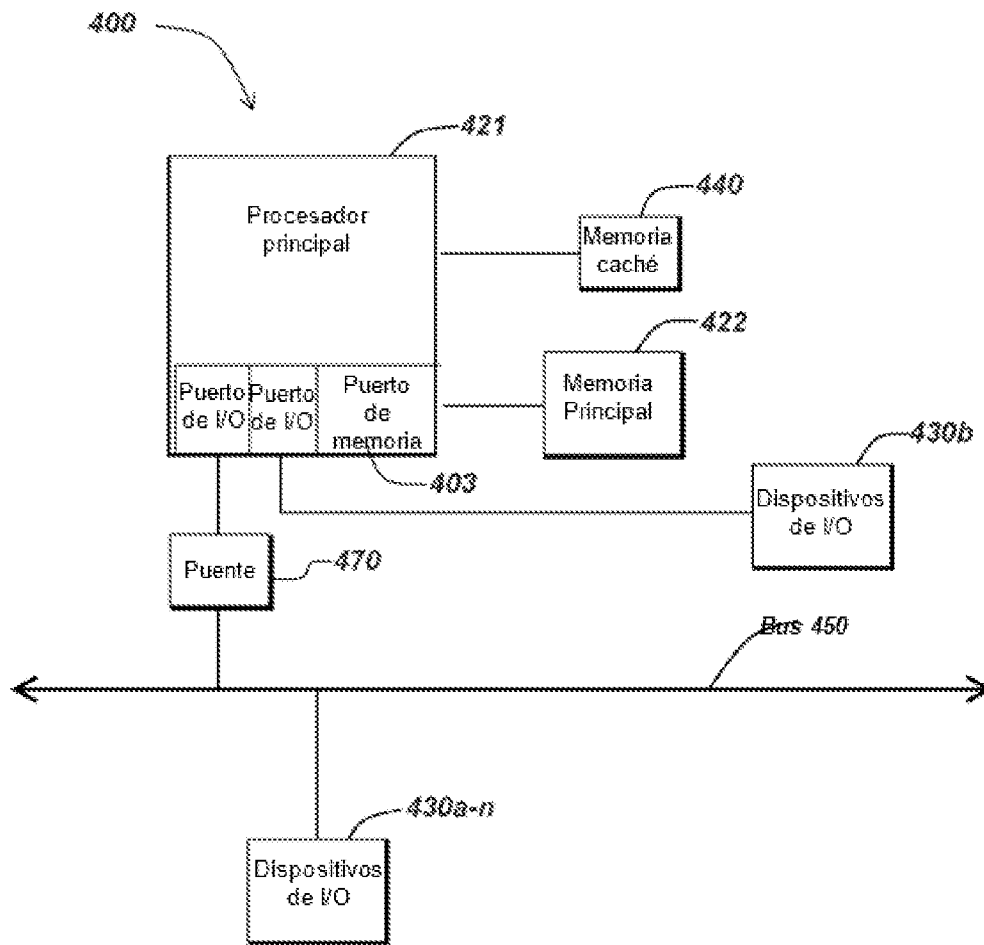


Fig. 4C