

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 742 298**

51 Int. Cl.:

G05B 23/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.08.2014** **E 14179842 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019** **EP 2837984**

54 Título: **Proceso para optimizar el mantenimiento de sistemas técnicos**

30 Prioridad:

05.08.2013 AT 504912013

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

13.02.2020

73 Titular/es:

UPTIME HOLDING GMBH (100.0%)

Schönaugasse 7/2

8010 Graz, AT

72 Inventor/es:

HASELGRUBER, NIKOLAUS;

LANGMAYR, FRANZ y

GRAY, CHRISTOPHER

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 742 298 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

Proceso para optimizar el mantenimiento de sistemas técnicos

Antecedentes

5 El planteamiento estándar de mantenimiento se basa en acciones programadas o reactivas, es decir, la actividad comienza después de un fallo. Esto conduce a altos costes implicados y tiempo de inactividad debido a eventos imprevistos. Esto motiva la demanda de mantenimiento preventivo basado en condición.

Tal planteamiento requiere la identificación de actividades de mantenimiento a ser realizadas con el fin de evitar fallos. Con este fin, es necesario detectar desviaciones del comportamiento del sistema y diagnosticar la causa raíz de esta observación.

10 Es necesario un pronóstico adicional de la evolución del fallo para la clasificación de severidad y organización de contramedidas adecuadas.

Tecnología de vanguardia

15 El mantenimiento basado en condición exige un desencadenante para iniciar las actividades. El desencadenante se genera normalmente mediante la identificación del comportamiento discrepante del sistema: la detección del estado se basa en la medición de los datos del sistema (medición de vibración, SCADA (condición de supervisión y adquisición de datos) y

- análisis estadístico (serie temporal, correlación cruzada)
- detección de transición de umbral (predefinidos, límites de alarma codificados por programa)
- 20 • análisis residual de datos medidos frente a valores esperados del estado del sistema dañado (Señal Inteligente)

Patentes relevantes

- WO 08/043762, Ecotécnica energías renovables

trata la fatiga mecánica

Un sistema de control basado en equipos sensores y disposición para medir estados y carga de aerogenerador.

25 Objetivo: optimización de operación para minimizar la fatiga mecánica

- WO 09/053365, Ecotécnica energías renovables

describe la evaluación de los daños por fatiga basada en la clasificación del flujo de lluvia de los ciclos de torsión, estrictamente conforme a la bibliografía estándar

- WO 90/027509, Vestas

30 Método de evaluación de un emplazamiento de parque eólico con respecto a los costes de mantenimiento. El análisis se basa en los parámetros del viento (incluyendo datos estadísticos del mantenimiento del parque eólico).

- US 2002000723A

Optimización de operación de aerogenerador basada en datos medidos de un sistema de sensores.

35 La optimización se logra a través de ajustes de parámetros modificados según la velocidad real del viento.

- WO 09/016020A

relacionada con la monitorización de condición

Se envía una señal, si un gradiente de un valor medido excede un máximo predefinido.

- US 2005/090937A y US 2004/230377A

40 relacionadas con la arquitectura SCADA y la monitorización en tiempo real

- JP 2004-150974A

Monitorización y evaluación de operación basada en medición de vibraciones

- US 2009/096406A, General Electric

5 Se proporcionan un método y un sistema para determinar la fiabilidad y un tiempo restante antes del fallo de un sistema de motor DC. El método y el sistema pueden determinar la fiabilidad y un tiempo restante antes de un fallo con una confianza estadística. El método y el sistema pueden incluir adquirir datos históricos del motor, obtener datos operativos, realizar análisis de fallos, desarrollar una red causal y realizar una red causal integrada y un análisis de fiabilidad del sistema de motor DC.

- US 2009/096405A, General Electric

10 Se proporcionan un método y un sistema para predecir de manera remota la fiabilidad y el tiempo restante antes de un fallo de un sistema de motor AC. El método y el sistema pueden determinar de manera remota la fiabilidad y un tiempo restante antes de un fallo con una confianza estadística utilizando un pronosticador de condición de motor AC. El método y el sistema pueden incluir adquirir datos históricos del motor, obtener datos operativos, realizar análisis de fallos, desarrollar una red causal y realizar una red causal y un análisis de fiabilidad integrados del sistema de motor AC. El método y el sistema pueden proporcionar al menos una notificación de un problema con el sistema de motor AC o al menos un componente del sistema de motor AC.

15 - US 2009/039650A, General Electric

Identificación de resultados mediante combinación de señales

- WO 09/075649 A, Vestas

Adquisición de datos de aerogeneradores para comparación y posterior derivación de medidas

- US 2009/037206A, Caterpillar

20 Se describe un método de predicción de mantenimiento de una máquina. El método incluye medir un parámetro de la máquina, el parámetro que es indicativo de una condición de la máquina, y transferir el parámetro medido a un sistema de planificación de mantenimiento. El método también incluye la predicción de dos o más curvas de variación de parámetros que indican la variación del parámetro a lo largo del tiempo, cada curva de variación de parámetros que representa valores del parámetro a un nivel de confianza diferente. El método incluye además
25 identificar un primer período de tiempo para el mantenimiento de la máquina en base a las dos o más curvas de variación de parámetros.

- US 2004/030524A, Departamento de Energía de EE.UU., Batelle Memorial Inst.

Métodos y sistemas para analizar la degradación y fallo de sistemas mecánicos

30 Se describen métodos y sistemas para identificar, comprender y predecir la degradación y el fallo de sistemas mecánicos. Los métodos incluyen medir y cuantificar los factores de estrés que son responsables de la activación de los mecanismos de degradación en el componente de interés de la máquina. La intensidad del factor de estrés se puede correlacionar con la tasa de degradación física según alguna función determinable de manera que exista una relación derivada entre el rendimiento de la máquina, la degradación y el factor de estrés subyacente. La relación derivada se puede usar para hacer cálculos de diagnóstico y pronóstico concernientes al
35 rendimiento y la vida proyectada de la máquina. Estos cálculos se pueden realizar en tiempo real para permitir que el operador de la máquina ajuste rápidamente los parámetros operativos de la maquinaria con el fin de ayudar a minimizar o eliminar los efectos del mecanismo de degradación, prolongando por ello la vida de la máquina. También se describen varios sistemas que implementan los métodos.

- GB200807775 A0,

40 Métodos para diagnóstico de caja de cambios basado en modelo

- US 2011/0018727 A1, Honeywell

45 Un método y un sistema implementados por ordenador incluyen el uso de información proporcionada desde sensores para monitorizar un generador de aerogenerador y proporcionar señales representativas de la operación del generador del aerogenerador, extraer características de nivel de señal de las señales, extraer características basadas en modelo de las señales, calcular conclusiones basadas en señal, conclusiones basadas en modelo y conclusiones basadas en refuerzo de características espectrales, y fundir las conclusiones para proporcionar una indicación de detección de fallos.

Otros ejemplos relevantes de la técnica anterior se pueden encontrar en el documento WO2011/054005 y en el documento US2008/059840.

50

Defectos de las soluciones actuales

- 5

 - Los límites predefinidos de alarma codificados por programa son de menor eficiencia para la detección del inicio del fallo y los precursores en la medida que
 - se fijan con respecto a la operación estacionaria a plena carga. No obstante, la mayoría del tiempo de operación real está en carga parcial y, por lo tanto, no contribuye a la detección. De este modo, no se puede derivar ningún resultado robusto en realidad.
 - son solamente límites superior o inferior para el observable correspondiente. No se consideran la evolución de tiempo del comportamiento del sistema y los gradientes de observables.
 - no están adaptados a las características específicas de turbinas individuales (HS, SW), lo que da como resultado anchos de banda extendidos, es decir, una reducción de la sensibilidad a las desviaciones y, de este modo, una reducción del tiempo de preaviso.
- 10

 - La fracción de falsas alarmas es alta en la medida que
 - un resultado de la dispersión de los valores de medición y de la dispersión de los parámetros individuales de turbina (ajustes de control).
 - la gran fracción de turbinas sanas frente a defectuosas conduce a un gran número de falsos errores, perjudicando la usabilidad práctica de tal sistema (consideración de Bayes).
- 15

 - Los sistemas de monitorización se crean en base a los datos disponibles, es decir, sin el análisis del sistema inicial o la especificación objetivo. Esto conduce solamente a una cobertura parcial de la disponibilidad y los riesgos que limitan la vida útil (modos de fallo)
 - Dado que no hay una evaluación inicial de las posibilidades de fallo, no es evidente, cuáles de los modos de fallo relevantes son detectables. De este modo, algunos tipos de alarmas se están omitiendo debido a la falta de observables relacionados o análisis de datos.
 - Si los datos predefinidos se usan como base para un sistema de monitorización, el tipo y la clasificación de los datos no reflejan los modos de fallo, lo que perjudica la posible calidad del resultado.
 - Si la evaluación se basa en el modelado del comportamiento discrepante del sistema (como lo hacen Cat y Smart Signal), esto se debe realizar cuantitativamente correcto (para la cantidad de deriva y para la cinética) para todos los modos de fallo relevantes. No obstante, para algunos de ellos la verificación es imposible (por ejemplo, debido a problemas de seguridad, costes o daños al sistema).
 - Sensores e instrumentación adicionales aumentan la complejidad técnica del sistema monitorizado. De este modo, se reduce posiblemente la fiabilidad. Este compromiso no se cuantifica en la medida que está omitiendo la referencia para la evaluación.
 - En la bibliografía científica, hay modelos de daños aplicables en la práctica (basados en observables en turbinas), solamente para ciertos modos de fallo (envejecimiento, fatiga). De este modo, las actividades de mantenimiento preventivo se pueden especificar solamente para estos casos particulares, a partir de los cuales no se puede esperar un aumento general de la disponibilidad del sistema.

40 Con estas limitaciones en mente, se debería reconocer que, en muchos casos, las técnicas disponibles de detección de fallos entregarán inevitablemente una cantidad significativa de falsas alarmas. La introducción de cualquiera de tales sistemas está asociada con el coste y el esfuerzo, además, las falsas alarmas en sí mismas a menudo dan como resultado un esfuerzo significativo, dado que deben ser investigadas correctamente. Por lo tanto, dada la elección de varios de tales sistemas de monitorización, cada uno con su limitación asociada en términos de una cierta probabilidad de falsas alarmas, la tarea es hacer una selección correcta de las técnicas de monitorización que, sin embargo, dan como resultado el nivel objetivo de disponibilidad para el sistema monitorizado.

45 Planteamiento:

La invención se define en las reivindicaciones adjuntas.

Los pasos básicos del método de la invención son:

- 50

 - a. Obtener datos físicos del sistema registrados mediante instrumentos de medición que son relevantes para el estado del sistema;
 - b. Establecer una programación óptima de intervalos de servicio basada en tiempo en la que se eligen intervalos de servicio para minimizar las expectativas de tiempo de inactividad;

c. Calcular el tiempo de inactividad esperado debido a una reparación no planificada causada por diferentes modos de fallo;

5 d. Establecer un plan basado en condición para reparar o sustituir componentes del sistema usando los datos del paso a) con el fin de minimizar el tiempo de inactividad debido a una reparación no planificada, preferiblemente bajo la consideración de la capacidad de reconocer un modo de fallo y la precisión de este reconocimiento cuantificada por probabilidades de falsas alarmas.

En el paso a), preferiblemente, las series de tiempo de datos físicos del sistema se registran mediante instrumentos de medición con una primera tasa de muestreo predefinida.

Por supuesto, el mantenimiento real se dirige según el plan anterior.

10 Típicamente, el paso d) se realiza como un bucle en el que los modos de fallo se tratan uno por uno, es decir, que el mantenimiento basado en condición se introduce paso a paso. Esto se hace siempre que los resultados generales no sean satisfactorios.

15 Es importante señalar, que el mantenimiento basado en condición no es necesariamente mejor que el mantenimiento basado en tiempo. Primeramente, implica costes, pero también si la calidad de predicción es baja, el tiempo de inactividad puede ser mayor debido a falsas indicaciones de fallos y fallos reales no predichos, que se explicarán más tarde en detalle.

20 Se describe un proceso para establecer un mantenimiento preventivo (basado en condición) optimizado de parques eólicos o sistemas técnicos complejos similares. Las actividades aspiran a prevenir fallos debidos a todos esos modos de fallo, que están limitando la disponibilidad y la vida útil de accesorios de aerogeneradores según razonamiento experto.

25 La optimización tiene lugar en dos etapas principales: en la primera etapa se evalúa la estrategia de mantenimiento basada en tiempo y, cuando es posible, se mejora la reasignación de actividades específicas a los intervalos de mantenimiento más adecuados y la posible redefinición de los intervalos en sí mismos. En la segunda etapa, los modos de fallo se analizan individualmente con el fin de determinar la extensión a la que se pueden aplicar la introducción de la monitorización de condición y, posteriormente, el mantenimiento basado en condición para mejorar la disponibilidad general del sistema.

30 Durante este procedimiento, se elige un modo de fallo después de otro, para la introducción de monitorización de condición y el establecimiento de un plan basado en condición que comienza desde el que tiene la mayor mejora de disponibilidad hasta que esté satisfaciéndose una disponibilidad general del sistema. La mejora de disponibilidad es mayor para cada modo de fallo cuanto más largo sea el tiempo de inactividad en caso de fallo, y cuanto más preciso sea posible predecir los fallos por mantenimiento basado en condición.

Descripción del procedimiento “Estrategia de mantenimiento combinado”

1. Seleccionar el sistema técnico que consiste en componentes y sensores definidos

35 En este paso, se definen las condiciones de contorno del sistema técnico a ser monitorizado. En particular, se identifican todos los sensores y fuentes de datos que son parte de la configuración estándar del sistema.

40 La salida de este paso es una descripción del sistema formulada como un árbol jerárquico de componentes que interactúan entre sí, incluyendo una lista de todos los datos, en general sensoriales, que se generan automáticamente cuando el sistema está en el modo de operación normal. La lista de datos contiene una descripción de los canales de datos, la frecuencia de muestreo, el intervalo de análisis sintáctico, el formato de datos y la ubicación del almacenamiento de datos.

2. Establecer un objetivo previsto de vida útil y disponibilidad del sistema

45 La vida útil prevista del sistema θ_L [h] es el período de vida útil del sistema a ser monitorizado. El objetivo de disponibilidad A_{TARG} para el sistema se da como la proporción mínima del tiempo operativo total en el que el sistema necesita funcionar como se espera. Típicamente, se da como porcentaje y se evalúa por períodos de tiempo definidos, por ejemplo, por mes, trimestre o año.

3. ¿Potencial de fallo del sistema definido?

50 Cuando se aplica este nuevo proceso a un sistema complejo, puede darse el caso de que el fallo potencial para el sistema ya esté definido. Por ejemplo, puede que ya se haya llevado a cabo un Análisis de Modo y Efecto de Fallo (FMEA) en el contexto de actividades pasadas donde se han identificado todos los modos de fallo potencial del sistema.

Si ya hay suficiente información acerca de los modos de fallo, ésta se tomará e integrará en el proceso de monitorización de condición. De otro modo, han de ser llevados a cabo los siguientes pasos (3.1 a 3.4).

3.1 Clasificar todos los modos de fallo conocidos

Cada modo de fallo potencial se clasifica con respecto a su componente de causa raíz y se describe suficientemente. La salida de este paso es una lista de n_F modos de fallo con asignaciones al componente de causa raíz (o subsistema), así como indicadores de daños (variables medibles) y modelos de daños físicos o estocásticos para cada modo de fallo.

Los modos de fallo identificados se supone que son independientes unos de otros, es decir, la aparición de un modo de fallo no tiene ningún impacto en la aparición de cualquier otro modo de fallo. Para cadenas de causa-efecto de modos de fallo, consecuentemente solamente el modo de fallo de causa raíz se ha de considerar aquí. Cualquier fallo consecuente se ha de considerar en el tiempo de inactividad y los costes del modo de fallo de causa raíz.

3.2 Configurar los modelos de vida útil del sistema para cada modo de fallo

En la bibliografía (referencias), la distribución de Weibull se conoce como un modelo apropiado para la descripción estadística de la vida útil de sistemas técnicos. Una distribución de Weibull se puede describir mediante un parámetro de forma β y un parámetro de escala η , donde el parámetro de forma describe el cambio del riesgo de fallar con el tiempo y el parámetro de escala es la vida útil característica, es decir, el tiempo hasta que aproximadamente el 63% de la población cae. La experiencia ha demostrado que la distribución de Weibull es capaz de modelar el comportamiento de la vida útil para una amplia gama de modos de fallo diferentes, pero los parámetros β y η pueden variar de un modo de fallo a otro. En base a los datos históricos de tiempo hasta el fallo para cualquier modo de fallo i ($i = 1, \dots, n_F$), se estiman los parámetros específicos β_i y η_i .

3.3 Definir métricas de fiabilidad por modo de fallo

Los datos históricos de tiempo hasta el fallo y de tiempo hasta la reparación se analizan por separado para cada modo de fallo $i = 1, \dots, n_F$, y se promedian durante el intervalo de tiempo definido, por ejemplo, mes, trimestre, etc. para determinar

- la tasa de fallos λ_i , calculada como el número de fallos observados dividida por el tiempo total de operación en el período de tiempo. La tasa de fallos está vinculada a los parámetros de Weibull β_i y η_i en la medida que la base de los datos para el cálculo es la misma para ambos casos, es decir, bajo la suposición de que la tasa de fallos constante con el tiempo es $\lambda_i \approx 1 / \text{MTTF}_i$ con $\text{MTTF}_i = (\eta_i \Gamma(1 + 1/\beta_i))$.
- el tiempo de inactividad promedio por fallo τ_i , definido como el valor medio de todo el tiempo específico desde el apagado desencadenado por fallo hasta el reinicio después del arreglo del problema. Se supone que el τ_i es sustancialmente más pequeño que el MTTF_i .
- la precisión del modelo de Weibull, denotada como $\pi_i \in [0; 1]$ mediante la aplicación de los modelos definidos en 3.2 en los datos históricos. Cuanto mayor sea π_i , más preciso será el modelo.

Por modo de fallo, el potencial de reducción del tiempo de inactividad se calcula como $\kappa_i = \lambda_i \cdot \tau_i$.

3.4 Identificar los modos de fallo más efectivos con respecto a κ_i / π_i

Los modos de fallo están ordenados con respecto a la disminución de $\kappa_i^* = \kappa_i / \pi_i$. De este modo, una mala calidad del modelo penaliza el efecto del modo de fallo en la disponibilidad. De la lista ordenada $\kappa_{(1)}^*, \kappa_{(2)}^*, \dots, \kappa_{(r)}^*$ modos de fallo se eliminan siempre que $\sum_{i>r} \kappa_{(i)}^* > (1 - A_{\text{TARG}})$. Los $n_F - r$ modos de fallo restantes son aquellos con los valores κ más grandes y los más prometedores para el aumento de disponibilidad mediante la aplicación de una estrategia de mantenimiento optimizada. Posteriormente se hace referencia a ellos como modos de fallo de alto impacto.

4. ¿Plan de mantenimiento de referencia incluyendo tiempos de arreglo de modo de fallo definidos?

Si está disponible cualquier plan de mantenimiento de referencia para los modos de fallo de alto impacto, se usa en la estrategia de mantenimiento optimizada. De otro modo, se han de llevar a cabo los siguientes pasos (4.1 a 4.4).

4.1 Identificación de tiempos de arreglo de modo de fallo

Los siguientes valores de tiempo esperados se han de identificar para cada modo de fallo de alto impacto i . Al contrario de τ_i , estos valores proporcionan detalles específicos de cada caso de las actividades de reparación.

- El tiempo de reparación normal $t_{\text{NRT},i}$ es el tiempo [h] que se requiere normalmente para arreglar el fallo si se detecta durante un servicio de mantenimiento planificado
- El tiempo de reparación no planificado $t_{\text{URT},i}$ [h] es el tiempo que se requiere normalmente para arreglar el fallo si ocurre sin planificar

- El retraso de respuesta de emergencia $t_{ERD,i}$ [h] considera los tiempos de reposición de piezas de repuesto o los tiempos de configuración de herramienta potenciales, así como la disponibilidad de los técnicos de servicio
- El tiempo de acceso de emergencia $t_{EAT,i}$ [h] es el tiempo requerido para llevar a los técnicos y las herramientas a la ubicación del activo

Cada acción de reparación se supone que es igual a una renovación del sistema completo. Es decir, después de cada reparación, se supone que el sistema funciona tan bien como si estuviera nuevo. En los casos en que se viola esta propiedad de renovación, las vidas útiles características de los modos de fallo afectados se han de acortar en consecuencia.

4.2 Determinar intervalos de servicio óptimos

Para cada uno de los modos de fallo de alto impacto, se ha de determinar el intervalo óptimo de servicio θ_i . Este es el período de tiempo en el que la suma del tiempo de inactividad planificado y no planificado, que corresponde a la indisponibilidad debida a la aparición del modo de fallo i , $A_{SYS,i}$, es mínima.

4.3 Configurar tareas de mantenimiento estándar

Configurar una lista de tareas de mantenimiento estándar $M_1, \dots, M_m$ (sustitución del lubricante de la caja de cambios, sustitución de filtros y juntas, mediciones del par de los pernos, etc.) y asignar a cada modo de fallo de alto impacto al menos una tarea de mantenimiento.

4.4 Definir la programación de intervalos de servicio

La programación de intervalos de servicio es un plan con intervalos separados por igual para las actividades de mantenimiento.

La programación se inicializa con $\theta_i^* = \min_i \theta_i$. Esto define la anchura del intervalo entre dos acciones de mantenimiento planificadas. Para cada uno de los modos de fallo de alto impacto, el intervalo de servicio específico θ_i^* se define según las siguientes reglas:

1. Debe ser un múltiplo de θ_i^* .
2. Debe ser menor o igual a θ_i .

5. Calcular la probabilidad de fallo esperada por modo de fallo

Para cada uno de los modos de fallo de alto impacto, se calcula la probabilidad de fallo esperada p_i . Esta es la evaluación de la función de distribución acumulada de la distribución de Weibull a la hora del servicio. Es decir, $p_i = 1 - \exp(-(\theta_i^* / \eta_i)^\beta)$. Debido al hecho de que la transformación X^β de una variable aleatoria de distribución de Weibull ($X \sim Wb(\eta, \beta)$) sigue una distribución exponencial con el parámetro η^β , el número de actividades de mantenimiento no planificadas esperado n_{UPM} en el intervalo θ_i^* se estima por θ_i^* / η^β .

6. Predecir el número esperado de actividades de mantenimiento durante la vida por modo de fallo

Para cada modo de fallo de alto impacto, se calcula el número de actividades de mantenimiento debido a la aparición de cualquier modo de fallo durante la vida útil del sistema θ_L . Para el modo de fallo de alto impacto i , el número de acciones de mantenimiento planificadas es el mayor número entero menor o igual que $\theta_L / \theta_i^* =: n_{TBM,i}$ que es el número total de cambios planificados. El número de cambios no planificados adicionales se espera que sea menor que $(n_{TBM,i} + 1) * n_{UPM}$ de modo que el número máximo de cambios según el modo de fallo i sea $n_{TBM,i} + (n_{TBM,i} + 1) * n_{UPM}$. Se denota como número máximo dado que en los casos donde un mantenimiento no planificado está cerrado antes de una acción de mantenimiento planificada entonces durante la acción de mantenimiento planificada no se cambiarán los componentes afectados. Además, el período desde la última acción de mantenimiento planificada hasta el final de la vida θ_L en general será más corto que θ_i^* .

7. Calcular el tiempo de inactividad del sistema durante la vida útil por modo de fallo

Por modo de fallo, cada acción de mantenimiento planificada se pondera con el tiempo de reparación normal t_{NRT} y para cada reparación no planificada, se consideran el tiempo de reparación no planificado t_{URT} , el retardo de respuesta de emergencia t_{ERD} y el tiempo de acceso de emergencia t_{EAT} , de modo que el tiempo de inactividad total del sistema durante la vida útil causado por el modo de fallo i es $t_{DOWN,i} = n_{TBM,i} * t_{NRT,i} + n_{UPM} * (t_{URT,i} + t_{ERD,i} + t_{EAT,i})$.

8. Calcular la disponibilidad general del sistema debido a modos de fallo de alto impacto

Aunque las acciones de reparación podrían llevarse a cabo en paralelo, al menos en el caso de actividades de mantenimiento planificadas, con el fin de proporcionar una estimación conservadora, se supone que se llevan a cabo

de manera secuencial de modo que el tiempo de inactividad del sistema durante la vida útil por modo de fallo se calcula como $t_{DOWN} = \sum_i t_{DOWN,i}$. En consecuencia, la disponibilidad del sistema es $A_{SYS} = (\theta_L * (1 - \sum_{i \leq r} \kappa(i) - t_{DOWN}) / \theta_L$.

9. Comparar la disponibilidad esperada con el objetivo de disponibilidad

5 Si la disponibilidad después de la optimización basada en tiempo es mayor que el objetivo, es decir, $A_{SYS} \geq A_{TARG}$, entonces la estrategia de mantenimiento basada en tiempo parece ser suficiente para alcanzar el objetivo de disponibilidad.

9b. Comprobar el valor r y considerar una iteración adicional de la optimización de mantenimiento basada en tiempo

10 De otro modo, se debería intentar una optimización adicional considerando los modos de fallo adicionales (siempre que estén disponibles, es decir, $r > 0$) en la optimización de mantenimiento basada en tiempo. Obsérvese que en esta iteración de optimización adicional, se deberían considerar los valores actualizados de π_i por modo de fallo. Si $r = 0$ y todavía $A_{SYS} < A_{TARG}$ se propone una introducción selectiva de una estrategia de mantenimiento basado en condición.

10. Calcular el efecto de las apariciones no planificadas de los modos de fallo de alto impacto

15 Para comprobar para cada modo de fallo de alto impacto si el mantenimiento basado en tiempo se debería sustituir por el mantenimiento basado en condición, calcular la efectividad potencial como $(\theta_L / MTTF_i) * (t_{URT,i} + t_{ERD,i} + t_{EAT,i} - t_{NRT})$.

11. Clasificar los modos de fallo de alto impacto según su efectividad sobre la disponibilidad

20 Clasificar los modos de fallo de alto impacto según el potencial de efectividad decreciente y definir el modo de fallo de rango uno como el modo de fallo activo para la configuración de la estrategia de mantenimiento basado en condición.

12. Decidir si el modo de fallo activo es adecuado para el mantenimiento basado en condición

25 No todos los modos de fallo de alto impacto son adecuados para el mantenimiento basado en condición. Los modos de fallo solamente son adecuados si los fenómenos de degradación asociados se pueden detectar con los datos (sensoriales) proporcionados por el sistema y si existen modelos de daños físicos o estocásticos adecuados para procesar estos datos y comparar la salida del modelo con un valor umbral que predice la presencia del modo de fallo. Los canales de medición requeridos se han detectado en el paso 3.1. Si el sistema proporciona estos canales y el horizonte de pronóstico $\tau_{p,i}$, es decir, el tiempo entre la detección fiable y la aparición del modo de fallo activo i es mayor que $(t_{ERD,i} + t_{EAT,i})$, entonces el modo de fallo activo es adecuado para mantenimiento basado en condición. De otro modo, seleccionar el modo de fallo con el siguiente rango de eficacia más alto y repetir este paso. Si no queda ningún modo de fallo de alto impacto, el procedimiento termina aquí sin alcanzar el objetivo de disponibilidad. Nota: Si el mantenimiento basado en condición no se puede aplicar al modo de fallo activo, configurar $\tau_{p,i} = 0$.

12.1 Capacidad estadística para modo de fallo activo bajo mantenimiento basado en condición

Para el modo de fallo activo i la precisión de predicción se ha de evaluar en base a las probabilidades definidas en la siguiente tabla de contingencias.

Predicción Real de Estado	Fallo	Sano	Total
Fallo indicado	$p_{TP,i}$	$p_{FP,i}$	$p_{P,i}$
Fallo no indicado	$p_{FN,i}$	$p_{TN,i}$	$p_{N,i}$
Total	p_i	$1 - p_i$	1

35 La columna suma $p_i = p_{TP,i} + p_{FP,i}$ y $(1 - p_i) = p_{TN,i} + p_{FN,i}$ son las proporciones de tiempo de inactividad y de tiempo de actividad del sistema con respecto al modo de fallo activo i . En el paso 5., p_i se ha determinado. Además, la proporción de falsas alarmas, $p_{FP,i} / (1 - p_i)$, se puede determinar analizando los datos históricos de alarma. Debido a que $p_{P,i} = p_{TP,i} + p_{FP,i}$ y $p_{N,i} = p_{FN,i} + p_{TN,i}$, la tabla de contingencia está completamente definida por esos cuatro estados. Los índices TN, FN, FP, TP denotan estados de Verdadero Negativo, Falso Negativo, Falso Positivo y Verdadero Positivo, respectivamente.

12.2 Tiempo de inactividad para modo de fallo activo bajo mantenimiento basado en condición

El tiempo de inactividad para la aparición del modo de fallo activo i bajo mantenimiento basado en condición se deriva de los siguientes componentes:

Predicción	Estado Real	Componente de tiempo	Tiempos de inactividad
Fallo indicado	Fallo	$t_{TP,i}$	$t_{NRT,i}$
Fallo indicado	Sano	$t_{FP,i}$	$t_{EAT,i}$
Fallo no indicado	Fallo	$t_{FN,i}$	$t_{URT,i} + t_{EAT,i} + t_{ERD,i}$
Fallo no indicado	Sano	$t_{TN,i}$	0

12.3 Calcular el tiempo de inactividad total esperado para modo de fallo activo

5 Para determinar el tiempo de inactividad total para el modo de fallo activo cuando se aplica mantenimiento basado en condición en lugar de mantenimiento basado en tiempo, se requiere el número de fallos esperados durante la vida útil, $n_{CBM,i}$. Es el número entero más pequeño mayor o igual que $\theta_L / MTTF_i$, donde el Tiempo Medio Hasta el Fallo $MTTF_i = (\eta_i \Gamma(1+1 / \beta_i))$.

Para el modo de fallo activo i , que ocurre $n_{CBM,i}$ veces durante la vida útil prevista del sistema θ_L , se calcula un nuevo tiempo de inactividad total para el modo de fallo activo:

$$t_{DOWN,i}^* = n_{CBM,i} * ((p_{TP,i} * t_{TP,i} + p_{FN,i} * t_{FN,i}) / p_i + p_{FP,i} * t_{FP,i} / (1 - p_i))$$

10 13. Decidir si el mantenimiento basado en condición es efectivo

15 Si el tiempo de inactividad bajo el mantenimiento basado en condición $t_{DOWN,i}^*$ es mayor o igual que el tiempo de inactividad correspondiente bajo el mantenimiento basado en tiempo, $t_{DOWN,i}$, es decir, $t_{DOWN,i}^* \geq t_{DOWN,i}$ entonces el planteamiento basado en condición para el modo de fallo activo i es ineficaz y, por lo tanto, se rechaza y el siguiente fallo de alto impacto se define como un nuevo modo de fallo activo. Si no hay ningún modo de fallo de alto impacto adicional, el proceso termina sin haber alcanzado el objetivo de disponibilidad.

20 De otro modo, si el mantenimiento basado en condición es efectivo, es decir, $t_{DOWN,i}^* < t_{DOWN,i}$, entonces la disponibilidad general A_{SYS} se recalcula con $t_{DOWN,i}^*$ en lugar de $t_{DOWN,i}$. Si $A_{SYS} \geq A_{TARG}$, el proceso se puede terminar dado que se alcanzará el objetivo de disponibilidad. De otro modo, el siguiente fallo de alto impacto se define como un nuevo modo de fallo activo. Si no hay ningún modo de fallo de alto impacto adicional, el proceso termina sin haber alcanzado el objetivo de disponibilidad.

La Fig. 1 muestra en un diagrama el porcentaje de tiempo de inactividad debido a reparaciones planificadas frente al tiempo de inactividad debido a reparaciones no planificadas, así como el tiempo de inactividad total;

La Fig. 2a y la Fig. 2b muestran un diagrama de flujo de un método de las presentes invenciones;

La Fig. 3 a la Fig. 8 muestran tablas usadas en el método de la invención.

REIVINDICACIONES

1. Un método para mantener sistemas complejos, preferiblemente aerogeneradores, que comprende los siguientes pasos:
 - a. Obtener datos físicos del sistema registrados mediante instrumentos de medición que son relevantes para el estado del sistema;
 - b. Establecer una programación óptima de intervalos de servicio basada en tiempo en la que se eligen intervalos de servicio para minimizar las expectativas de tiempo de inactividad;
 - c. Calcular el tiempo de inactividad esperado debido a una reparación no planificada causada por diferentes modos de fallo; en donde los modos de fallo se analizan individualmente con el fin de determinar la medida en la que la posible introducción de monitorización de condición y de establecimiento de un plan basado en condición para reparar o sustituir componentes podría mejorar la disponibilidad del sistema;
 - d. Establecer un plan basado en condición para reparar o sustituir componentes del sistema usando los datos del paso a) con el fin de minimizar el tiempo de inactividad debido a una reparación no planificada, en donde un modo de fallo después del otro se elige para la introducción de monitorización de condición y de establecimiento de un plan basado en condición que comienza desde el que tiene la mayor mejora de disponibilidad hasta que sea satisfactoria una disponibilidad general del sistema.
2. El método de la reivindicación 1, en donde en el paso a) las series de tiempo de datos físicos del sistema se registran mediante instrumentos de medición con una primera tasa de muestreo predefinida.
3. El método de una de las reivindicaciones 1 o 2, en donde la distribución de Weibull se usa para una representación estadística de modelos de vida útil para cada modo de fallo.
4. El método de una de las reivindicaciones 1 a 3, en donde
 - a. para cada modo de fallo, se determina el intervalo óptimo de servicio θ_i , donde la indisponibilidad debida a la aparición del modo de fallo i está al mínimo;
 - b. se determina el mínimo θ^*_1 , en donde el mínimo θ^*_1 es el mínimo de todos los θ_i ;
 - c. se identifican modos de fallo de alto impacto, que son los más prometedores para el aumento de la disponibilidad mediante la aplicación de una estrategia de mantenimiento optimizada y en donde el intervalo de servicio específico θ^*_i entre dos acciones de mantenimiento planificadas se elige para cada modo de fallo como un múltiplo del mínimo θ^*_1 de los intervalos de servicio específicos θ^*_i de los modos de fallo de alto impacto que es menor o igual que el intervalo de servicio óptimo θ_i del modo de fallo.
5. El método de una de las reivindicaciones 1 a 4, en donde se combina la siguiente información de entrada:
 - a. información recopilada sistemáticamente acerca de los modos de fallo posibles;
 - b. modelos de vida útil correspondientes que permiten la consideración de la información anterior acerca del riesgo de fallo;
 - c. condiciones de contorno de las acciones de reparación y mantenimiento.
6. El método de la reivindicación 5, en donde además se consideran valores de una tabla de contingencia con el fin de reflejar la precisión de la predicción con respecto a un modo de fallo.
7. El método de una de las reivindicaciones 5 o 6, cuando estas reivindicaciones dependen de la reivindicación 4, en donde las condiciones de contorno de las acciones de reparación y mantenimiento son:
 - el tiempo normal de reparación $t_{NRT,i}$, que es el tiempo que se requiere normalmente para arreglar el fallo si se detecta durante un servicio de mantenimiento planificado;
 - el tiempo de reparación no planificado $t_{URT,i}$, es el tiempo que se requiere normalmente para arreglar el fallo si ocurre sin planificar;
 - el retardo de respuesta de emergencia $t_{ERD,i}$, que considera los tiempos de reposición de piezas de repuesto o los tiempos de configuración de herramientas potenciales, así como la disponibilidad de técnicos de servicio; y/o
 - el tiempo de acceso de emergencia $t_{EAT,i}$, es el tiempo requerido para llevar a los técnicos y las herramientas a la ubicación del activo, en donde i representa el modo de fallo de alto impacto de orden i .
8. El método de una de las reivindicaciones 4 o las reivindicaciones 5-7, cuando estas reivindicaciones dependen de la reivindicación 4 a 7, en donde el paso d comprende repetidamente

una clasificación de los modos de fallo de alto impacto según su efectividad sobre la disponibilidad y entonces decidir si el modo de fallo activo es adecuado para el mantenimiento basado en condición.

Fig. 1

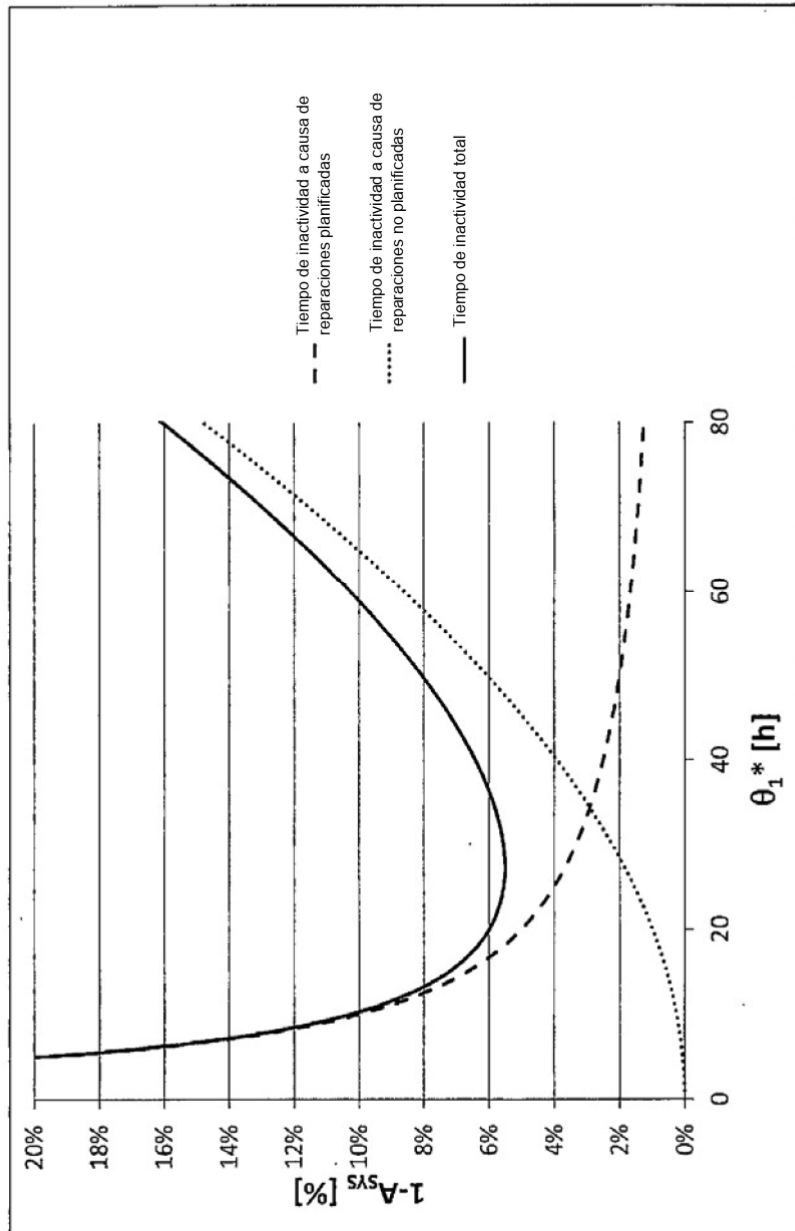


Fig. 2a

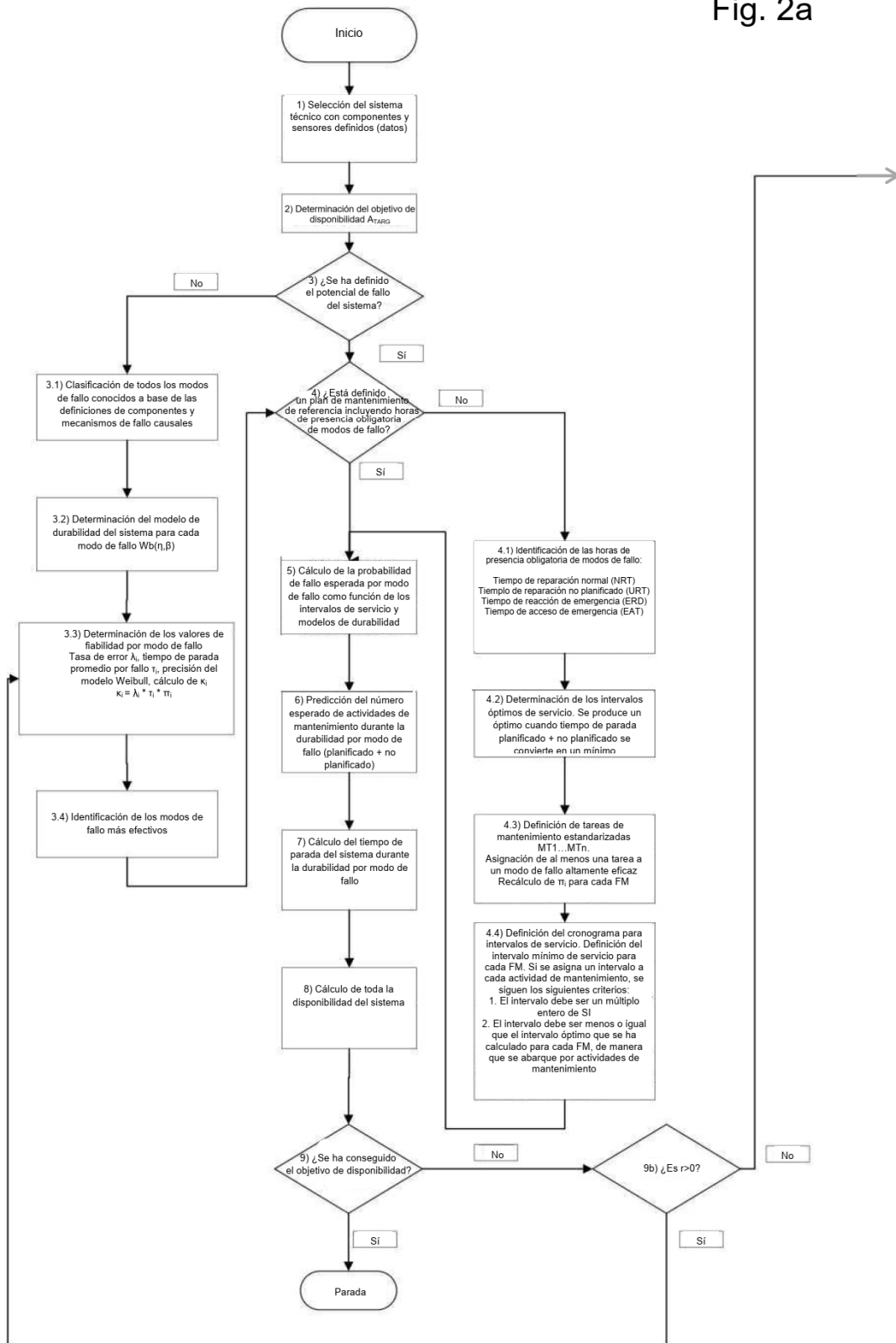


Fig. 2b

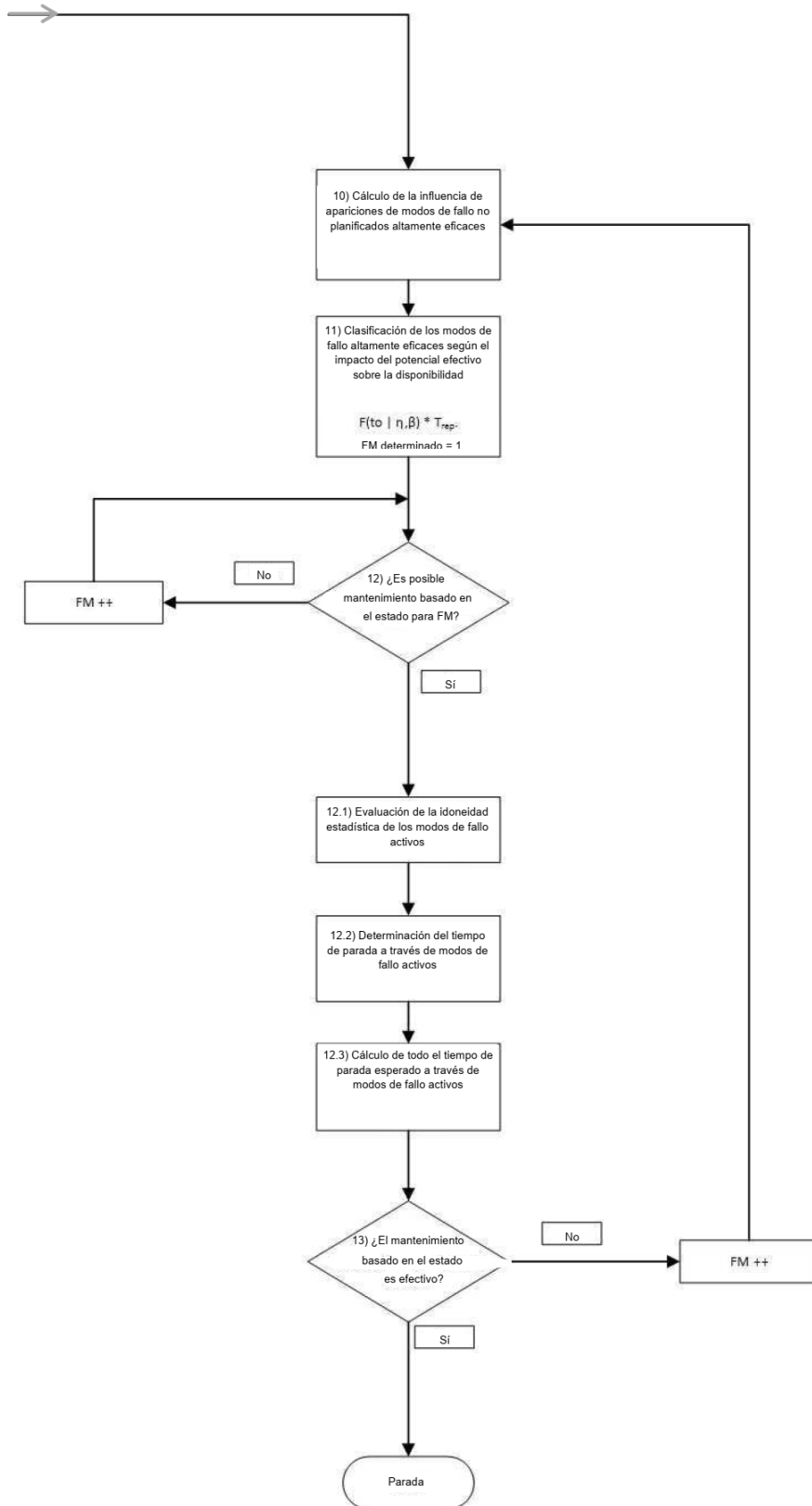


Fig. 3

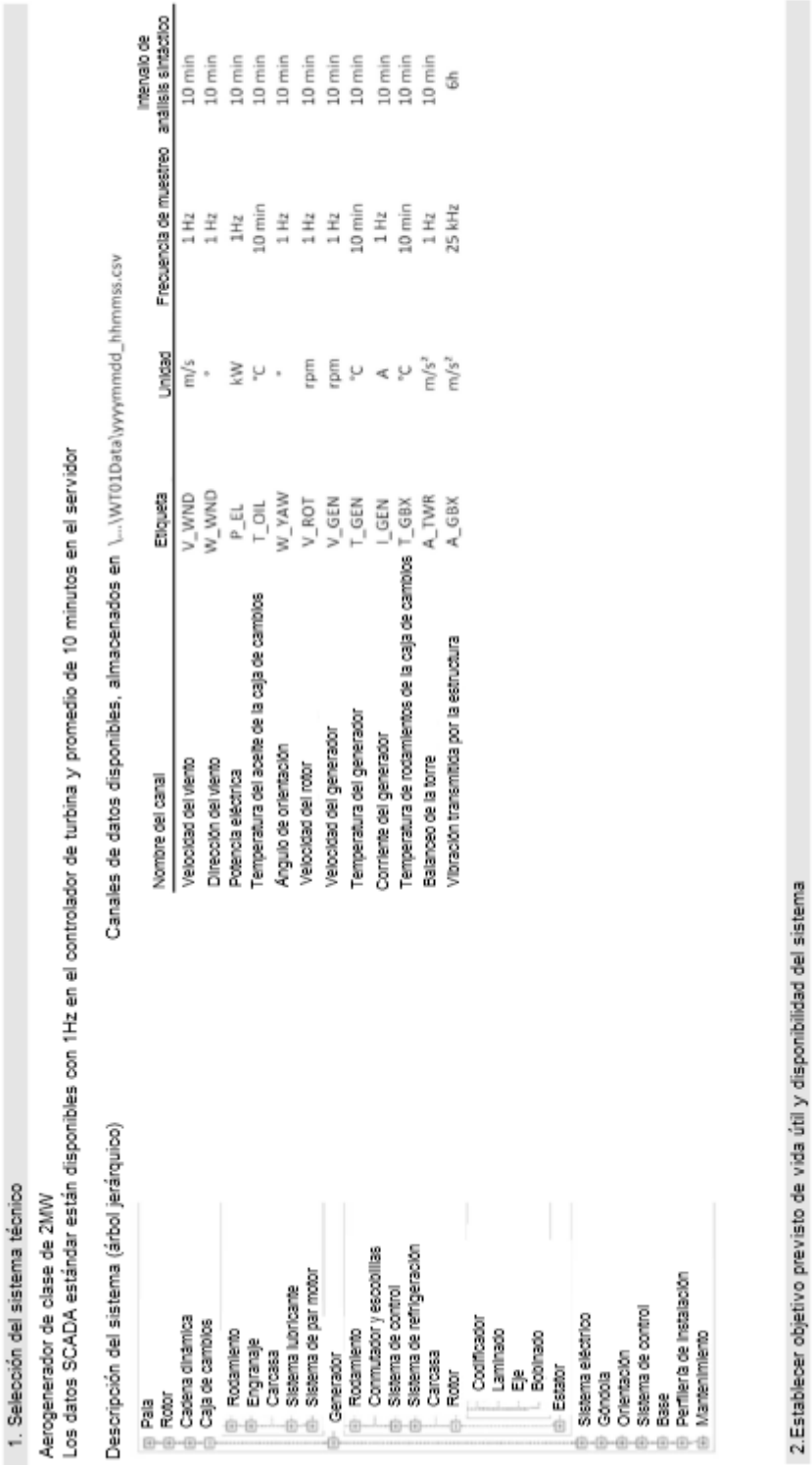


Fig. 4

3. Potencial de fallo del sistema									
3.1 Clasificación de modos de fallo					3.2 Parámetros de Weibull			3.3 Métricas de fiabilidad	
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/ componente	Indicador de daño	Modelo de daño	β [1]	η [h]	Vida útil característica λ [1/h]	Tasa de fallos promedio $\lambda \cdot \tau$ [1]	Tiempo de inactividad a largo plazo por modo de fallo $\lambda \cdot \tau$ [1]
1	Desgaste	Caja de cambrlos/ engranajes	A_GBX	trend(f1(A_GBX), "increasing")	2	34000	3,31876E-05	540	0,017921316
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambrlos/ rodamientos	T_GEN	trend(T_GEN, "increasing")	3	38000	2,94696E-05	520	0,015324216
3	Erosión	Pala/Forro	P_EL	trend(P_EL, "decreasing")	3	43000	2,60429E-05	320	0,008333742
4	Deposición	Sistema lubricante/ Filtro de aceite	T_OIL	trend(T_OIL, "increasing")	3,5	11000	0,000101038	48	0,004849847
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/ Bobinado/Aislamiento	L_GEN	threshold(L_GEN, L_GEN_LIM, "upper")	2,5	14000	8,05043E-05	100	0,008050432
6	Desgaste	Rotor/Codificador	V_ROT	trend(V_ROT/V_GEN, "delta", DELTA_LIM)	2	41000	2,75214E-05	160	0,004403431
7	Fatiga de ciclo alto	Base	A_TWIR	trend(f1(A_TWIR), "decreasing")	3	175200	6,39183E-06	672	0,004295302
8	Desgaste	Orientación/Engranaje	W_YAW	threshold(diff(W_WIND, W_YAW), DELTA_LIM)	2	45000	2,50751E-05	140	0,003510513
n_b	8							Disponibilidad a largo plazo:	0,933

3.4 Identificación de modos de fallo de alto impacto							
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/ componente	Precisión de modelo de vida útil π [1]	Potencial reducción de vida útil ponderada $K = \lambda \cdot \tau / \pi$ [1]	Indisponibilidad de más alta a más baja	Indisponibilidad ponderada acumulada $\Sigma_{i=1}^n K \pi_i$ [1]	Modo de fallo de alto impacto
1	Desgaste	Caja de cambrlos/ engranajes	0,75	0,024	Rango 1	0,090	1
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambrlos/rodamientos	0,75	0,020	2	0,066	1
3	Erosión	Pala/Forro	0,75	0,011	4	0,034	1
4	Deposición	Sistema lubricante/ Filtro de aceite	0,6	0,008	5	0,023	1
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/ Bobinado/Aislamiento	0,7	0,012	3	0,046	1
6	Desgaste	Rotor/Codificador	0,8	0,006	6	0,015	0
7	Fatiga de ciclo alto	Base	0,8	0,005	7	0,010	0
8	Desgaste	Orientación/Engranaje	0,8	0,004	8	0,004	0

Fig. 5

4. Plan de mantenimiento de referencia (solamente para alto impacto)									
4.1 Base de mantenimiento estándar									
4.2 Intervalo óptimo de servicio									
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/componente	T _{rep} [h]	Tiempo de reparación normal	T _{rep} [h]	Tiempo de respuesta de emergencia	Tiempo de acceso de emergencia	# de acciones de servicio basadas en tiempo durante la vida útil	Intervalo de servicio para indisponibilidad mínima
1	Desgaste	Caja de cambios/engranajes	84		300	240	24	14,3	12288
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambios/Rodamiento	84		300	240	24	12,8	13641
3	Erosión	Palas/Forro	60		120	180	24	10,3	16939
4	Deposición	Sistema lubricante/filtro de aceite	8		8	24	24	38,6	4539
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/Bohnado/Aislamiento	48		56	24	24	14,9	11746
4.3 Tareas de mantenimiento estándar									
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/componente	M1: sustitución de lubricante de caja de cambios	M2: sustitución de filtros y juntas	M3: Mediciones del par de pernos	θ* [h]	Frecuencia de servicio	Intervalo de servicio específico de modo de fallo	θ* [h]
1	Desgaste	Caja de cambios/engranajes	1	1	0	2	2	9079	
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambios/Rodamiento	0	1	1	3	3	13618	
3	Erosión	Palas/Forro	0	0	1	3	3	13618	
4	Deposición	Sistema lubricante/filtro de aceite	1	1	0	1	1	4539	
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/Bohnado/Aislamiento	0	1	0	2	2	9079	
5. Probabilidad esperada de fallo por modo de fallo y número de acciones de mantenimiento no planificadas									
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/componente	β [1]	η [h]	θ* [h]	p	n _{plan}	Número estimado de acciones no planificadas durante la vida útil	MTTF [h]
1	Desgaste	Caja de cambios/engranajes	2	34000	9079	0,069	1	30132	
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambios/Rodamiento	3	38000	13618	0,045	1	33933	
3	Erosión	Palas/Forro	3	43000	13618	0,031	0	38398	
4	Deposición	Sistema lubricante/filtro de aceite	3,5	11000	4539	0,044	2	9897	
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/Bohnado/Aislamiento	2,5	14000	9079	0,287	5	12422	

Fig. 6

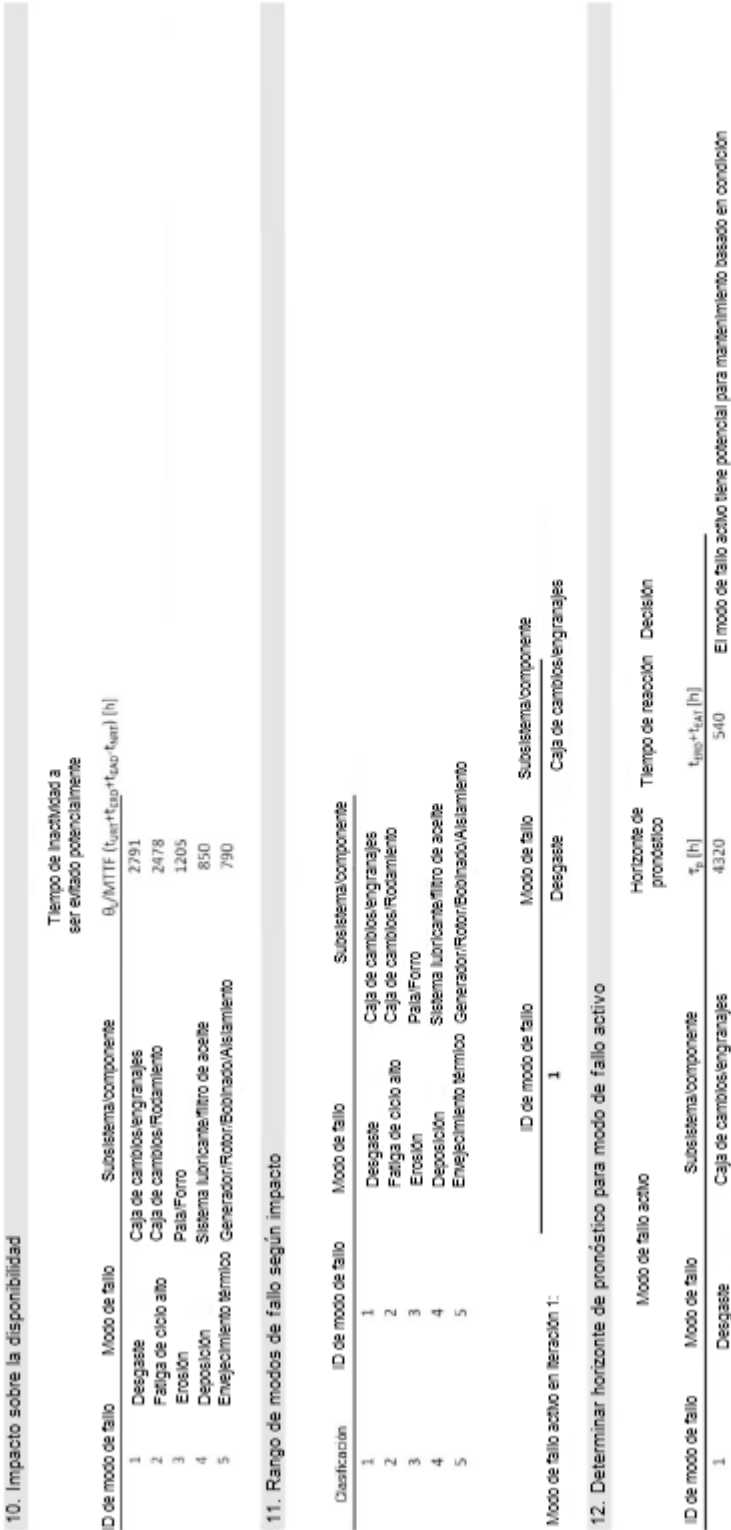
6. Número esperado de actividades de mantenimiento para mantenimiento basado en tiempo						
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/componente	theta* [h]	n _{TRM} [1]	n _{UPM} [1]	n _{TRM} + n _{UPM} [1]
1	Desgaste	Caja de cambios/engranajes	9079	19	1,1	20,1
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambios/Rodamiento	13618	12	0,8	12,6
3	Erosión	Paleta/Forro	13618	12	0,4	12,4
4	Deposición	Sistema lubricante/filtro de aceite	4539	38	1,8	39,8
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/Bobinado/Aislamiento	9079	19	5,4	24,4

7. Tiempo de inactividad del sistema						
ID de modo de fallo	Modo de fallo	Subsistema/componente	Tiempo de inactividad debido a servicio planificado n _{TRM} *t _{TRT} [h]	Tiempo de inactividad debido a servicio no planificado n _{UPM} * (t _{URT} +t _{ESP} +t _{AD}) [h]	Tiempo de inactividad total	t _{DOWN} [h]
1	Desgaste	Caja de cambios/engranajes	1596	614		2210
2	Fatiga de ciclo alto	Caja de cambios/Rodamiento	1008	359		1367
3	Erosión	Paleta/Forro	720	117		837
4	Deposición	Sistema lubricante/filtro de aceite	304	100		404
5	Envejecimiento térmico	Generador/Rotor/Bobinado/Aislamiento	912	561		1473
			Total:			6290

8. Disponibilidad para mantenimiento optimizado basado en tiempo para modo de fallo de alto impacto		
A _{sys}		
0,952		

9. Comparación de disponibilidad con el objetivo		
A _{sys}	A _{TAIG}	Decisión
0,952	0,966	Continuar con mantenimiento basado en condición

Fig. 7



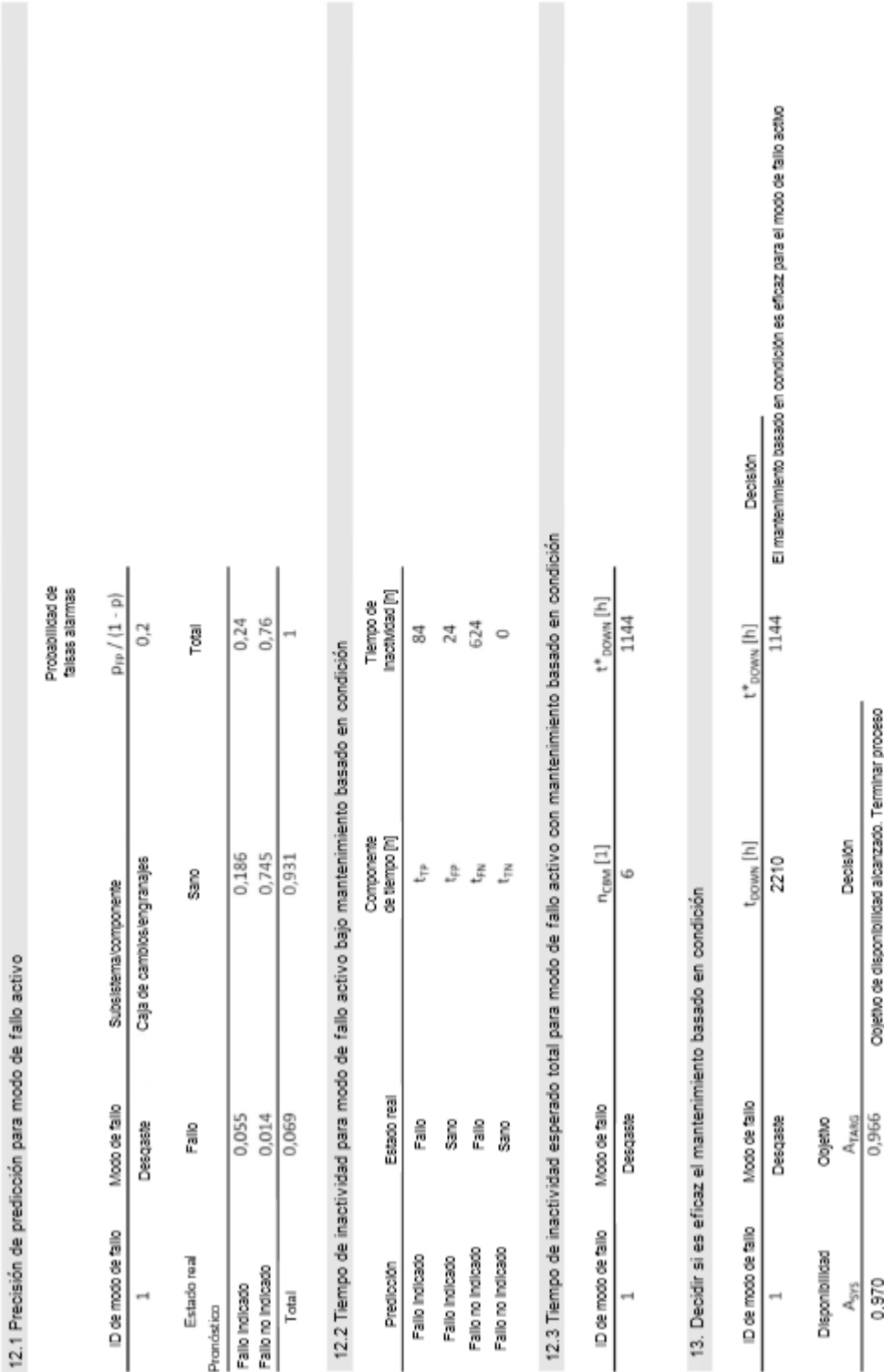


Fig. 8