

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 739 492**

51 Int. Cl.:

G05B 23/02 (2006.01)

G06F 17/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.10.2003 PCT/US2003/031200**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.04.2004 WO04036349**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.10.2003 E 03808980 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019 EP 1552353**

54 Título: **Proceso para determinar una probabilidad de evento de causa concurrente y/o la disponibilidad del sistema durante la aparición simultánea de múltiples eventos**

30 Prioridad:

15.10.2002 US 272156

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

31.01.2020

73 Titular/es:

**THE PROCTER & GAMBLE COMPANY (100.0%)
One Procter & Gamble Plaza
Cincinnati, OH 45202, US**

72 Inventor/es:

**TAN, JONATHAN SAMUEL y
ROSEN, OSCAR**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 739 492 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 determinar una probabilidad de evento de causa concurrente y/o la disponibilidad del sistema durante la aparición simultánea de múltiples eventos

5

Campo de la invención

La presente invención se refiere a un método para determinar la disponibilidad del sistema y, más particularmente, a un método que no se basa en simulación de sistemas y que puede considerar el fallo simultáneo de múltiples componentes. La invención también puede utilizarse para determinar generalmente la probabilidad de observar un evento en diversas circunstancias.

10

Antecedentes de la invención

Pueden modelizarse sistemas complejos con tiempos de actividad cuando el sistema está en funcionamiento, y con tiempos de inactividad cuando el sistema no lo está. Cuando el sistema está en funcionamiento se asume que está llevando a cabo su función prevista a plena eficiencia. Cuando el sistema no está en funcionamiento se asume que no está llevando a cabo su función en absoluto. Se asume que el sistema es reparable y que los componentes se conectan de forma funcional en serie sin componentes redundantes ni resistencia a sobretensión. Además de tiempo de inactividad causado por fallos de componentes que puedan producirse por desgaste o que sean catastróficos, el tiempo de inactividad puede producirse por una repetitiva función del tiempo, p. ej., debido al agotamiento de las materias primas del lote, a paradas rutinarias de los equipos, etc. Los tiempos de inactividad pueden causarse por componentes, modos de fallo y otras causas, cuyos términos se utilizarán de modo intercambiable.

20

El objetivo es planificar y minimizar cuidadosamente los tiempos de inactividad, de modo que se maximice el tiempo de actividad. También se desea evitar estados intermedios en los que el sistema funcione a eficiencia parcial.

25

A efectos de la presente invención, los sistemas pueden estar únicamente en uno de dos estados. O bien están plenamente operativos y en funcionamiento, o bien produciendo producto a una velocidad dada, también conocido como tiempo de actividad. El tiempo de actividad se define como el tiempo que el sistema está en funcionamiento. El sistema puede estar no operativo como resultado de un fallo, o de eventos de paradas programadas, también conocido como tiempo de inactividad. El tiempo de inactividad se define como el tiempo en que el sistema no está operativo o está detenido. Modelizamos estados de transición entre el tiempo de inactividad y el tiempo de actividad, o viceversa, como muy breves en comparación con los tiempos de actividad típicos; de cualquier otra manera, el período de transición se convertirá a un tiempo de inactividad de pérdida de producción equivalente.

30

35

El tiempo medio entre fallos en un período de tiempo dado (MTBF) es la relación entre el tiempo de actividad total del sistema respecto al número de fallos que se producen durante ese período. El tiempo medio hasta reparación en un período de tiempo dado (MTTR) es la relación entre el tiempo total de inactividad del sistema respecto al número de fallos que se producen durante ese período. La disponibilidad es la relación del tiempo total de actividad del sistema respecto al tiempo total (tiempo de actividad más tiempo de inactividad) en que se estudia el sistema. La disponibilidad puede, por lo tanto, cuantificarse como

40

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF}_{\text{sys}} / (\text{MTBF}_{\text{sys}} + \text{MTTR}_{\text{sys}}).$$

45

1

donde MTBF es el tiempo de actividad promedio, MTTR es el tiempo de inactividad promedio, y el subíndice "sys" se refiere al sistema general, en contraposición a un componente individual.

50

Un experto en la técnica que analice un sistema se interesa en la disponibilidad porque es una medida del rendimiento del sistema respecto a la utilización de activos. Existen otras mediciones de disponibilidad empleables por el experto en la técnica, como se explica en el Handbook of Reliability Engineering and Management, Cap. 15, Ireson y Coombs, Jr. Editores Jefe, copyright 1998.

55

60

Los tiempos de actividad y los tiempos de inactividad se producen alternativamente. Los tiempos de inactividad pueden producirse debido a eventos de parada programada, tales como mantenimiento programado y cambios de producto, o debido al fallo de uno o más componentes dentro del sistema. Una vez detenido el sistema, pueden realizarse acciones de reparación o mantenimiento para restaurar los componentes de vuelta a un estado operativo. Las acciones de reparación se clasifican según la condición del componente después de la reparación o mantenimiento. Si la acción de reparación restaura el componente de vuelta a su condición original, se denomina igual que nuevo (SAN). Si la acción de reparación restaura el componente de vuelta al estado de dicho componente justo antes de fallar, se denomina igual que antiguo (SAO). La acción de reparación puede también restaurar el componente a un estado que esté entre SAN y SAO. Si la reparación es SAN, el componente estará en el mismo estado en el que estaba al principio de la misión del sistema en tiempo 0, justo antes de que el sistema arrancara por primera vez, haciendo por lo tanto que el componente esté de nuevo sujeto a fallos prematuros o de "burn-in".

65

En sistemas de producción reparables es posible que durante un intento de reiniciar el equipo, una vez completadas todas las reparaciones, el sistema solo se haga funcionar brevemente sin alcanzar su velocidad objetiva. Este intento fallido de volver a arrancar el equipo se denomina un falso arranque, también denominado en la literatura como probabilidad de fallo a demanda. Para el proceso descrito y reivindicado en la presente memoria, el tiempo de actividad durante un falso arranque se considera que es cero.

Como se ha explicado anteriormente, un falso arranque puede producirse por la aparición de un único modo de fallo. De forma alternativa, un falso arranque puede producirse por la aparición simultánea de dos o más modos de fallo. Si aparecen dos o más modos de fallo simultáneamente, y originan el falso arranque, se considera que hay un empate entre los modos de fallo que causaron el falso arranque. Sin embargo, para mejorar el sistema, puede desearse saber qué modo de fallo se asocia con el falso arranque, o asignar un modo de fallo particular al tipo de evento de falso arranque. Para determinar qué modo de fallo, entre múltiples modos de fallo, provocó el falso arranque, pueden utilizarse al menos dos métodos ilustrativos y no limitativos.

En sistemas con múltiples componentes los fallos pueden clasificarse en concurrentes o no concurrentes. En un sistema de modo de fallo concurrente se supone que los componentes están en serie, de modo que si un componente falla, todo el sistema debe detenerse. Cada vez que el sistema se detiene todos los componentes sujetos a fallos en un sistema concurrente se restauran automáticamente a un estado SAN, incluidos los componentes que no fueron la causa original de la detención del sistema. Debido a que los componentes concurrentes están en serie y se restablecen a SAN en cada parada, los tiempos de actividad entre fallos sucesivos de un componente de fallo concurrente no son independientes de otros fallos en el sistema. Para los componentes concurrentes el tiempo hasta el siguiente fallo se mide desde la última reparación/sustitución producida en el sistema, sin considerar qué componente ha fallado.

Un componente no concurrente, o bien no está en serie con los otros componentes del sistema, o bien no se restablece a SAN cada vez que el sistema se detiene. Los fallos no concurrentes se producen con un tiempo de actividad que es independiente de otros fallos en el sistema. Los fallos no concurrentes se producen, típicamente, por el desgaste o uso de uno o más componentes no concurrentes. Un componente no concurrente no se repara o restablece a SAN, a menos que falle o esté cerca de fallar. El tiempo hasta el siguiente fallo para un componente no concurrente comienza con la última reparación/sustitución de únicamente dicho componente, en contraposición con el último fallo del sistema. En la literatura conocida por los solicitantes para los sistemas de producción reparables, los modos de fallo, típicamente, se consideran no concurrentes para el propósito de estimar la disponibilidad. Hemos descubierto que el uso de modelos de fallo concurrentes aumenta la exactitud de las predicciones de modelo de disponibilidad. Por lo tanto, existe la necesidad de modelizar sistemas de modo de fallos concurrentes y sistemas de modo de fallo no concurrentes mixtos. En el siguiente análisis, cada misión, o uso del sistema, debe comenzar con los componentes que compiten, salvo como se establece a continuación para algunos sistemas que combinan componentes concurrentes y algunos tipos de componentes no concurrentes.

El tiempo de actividad puede caracterizarse mediante una distribución de función de densidad de probabilidad (PDF) de los tiempos entre fallos que no incluyan falsos arranques, es decir, $t > 0$. Similarmente, el tiempo de inactividad puede caracterizarse mediante una PDF de los tiempos que lleva restaurar el sistema de vuelta al funcionamiento. El área bajo una curva de PDF entre t_1 y t_2 , para $t_2 > t_1$, es la probabilidad de observar valores de t que son mayores que t_1 pero menores que t_2 , de un gran número de tiempos observados. Dada la PDF de tiempo de actividad, un experto en la técnica puede derivar otras expresiones importantes de fiabilidad.

La fiabilidad de un sistema concurrente en el tiempo t , $R(t)$, es la probabilidad de que el sistema funcione con éxito durante un período de duración t sin detenerse. La distribución de fiabilidad, $R(t)$, puede derivarse de la PDF de tiempo de actividad, restando de uno la integral hasta el tiempo t de la PDF, y multiplicando el resultado por la probabilidad de no tener un falso arranque. Matemáticamente, esto puede expresarse como:

$$R_{\text{uptime}}(t) = 1 - \int_0^t f_{\text{uptime}}(t)d(t) \quad 2$$

$$R(t) = R(0) * R_{\text{uptime}}(t) \quad 3$$

donde $R_{\text{uptime}}(t)$ es la función de fiabilidad para el tiempo entre fallos, exceptuados los falsos arranques, $R(0)$ es la probabilidad de no tener un falso arranque, y $f_{\text{uptime}}(t)$ es la PDF de tiempo de actividad para $t > 0$.

La fiabilidad general del sistema de un sistema multicomponente puede obtenerse una vez se especifiquen las fiabilidades de los componentes individuales. El producto de las fiabilidades de los componentes individuales en un sistema de componentes en serie da la fiabilidad general del sistema. Matemáticamente esto puede expresarse como:

$$R_{\text{sys}}(t) = \prod(R_i(t)) \quad 4$$

donde $R_i(t)$ es la función de fiabilidad del componente i y el producto incluye todos los componentes.

El MTBF del sistema puede determinarse mediante la integral de la fiabilidad del sistema, de 0 a infinito con respecto al tiempo. Matemáticamente esto puede expresarse como:

$$MTBF_{sys} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t)dt \quad 5$$

5 La función de peligro $h(t)$ es la tasa instantánea de fallos que se producen en un punto temporal específico. Puede obtenerse dividiendo la PDF por $R(t)$, de modo que

$$h(t) = f(t) / R(t) \quad 6$$

10 donde $f(t)$ es la PDF.

15 La $h(t)$ puede aumentar, disminuir, ser constante, tener forma de U o tener otros cambios respecto al tiempo. Puede producirse una $h(t)$ creciente debido al desgaste de componentes, fatiga, procedimientos deficientes de mantenimiento preventivo, etc. Puede producirse una $h(t)$ decreciente debido a arranques inadecuados, materias primas cuyas propiedades cambien durante los tiempos de parada, etc. Puede producirse una $h(t)$ constante debido a fallos de diseño y a fallos accidentales, como errores humanos o defectos en las materias primas. Puede producirse una $h(t)$ en forma de U por una combinación de causas, aumentándola unas y disminuyéndola otras. En una $h(t)$ en forma de U, la tasa de fallos puede disminuir inicialmente durante el “burn-in”, permanecer relativamente constante durante la vida útil del sistema, y luego aumentar a medida que se avanza la vida útil de los componentes y aparece el desgaste.

20 Más detalladamente, los fallos de “burn-in” pueden producirse debido a, técnicas de fabricación deficientes, un control de calidad inadecuado, un trabajo mal hecho, una depuración inadecuada del sistema, materiales de calidad insuficiente, fallos de componentes debidos a un almacenamiento inadecuado, manejo e instalación, sobrecargas, arranques inadecuados y otros errores de operario. Los fallos durante la vida útil pueden producirse debido a, diferencias entre la resistencia de diseño y el esfuerzo real experimentado durante la vida útil, variaciones ordinarias en cargas aleatorias, variaciones ordinarias en las resistencias del material, defectos no detectados, abuso y aplicación incorrecta. Los fallos debidos al desgaste y a que se alcanza el final de la vida útil del componente, pueden producirse debido a, la degradación de la resistencia del material, fluencia, fatiga, corrosión y a un mantenimiento inadecuado o errático.

30 Puede determinarse el MTTR para cualquier componente mediante la integral del tiempo de componente para reparar la distribución, multiplicado por el tiempo, de 0 a infinito con respecto al tiempo. Matemáticamente esto puede expresarse como:

$$MTTR_i = \int_0^{\infty} t * f_{time\ to\ repair\ i}(t)dt \quad 7$$

35 donde $f_{time\ to\ repair\ i}(t)$ es la PDF para el tiempo para reparar el componente i.

El MTTR del sistema es simplemente la suma del producto del componente individual de MTTR, multiplicado por la probabilidad de que el componente particular haga que el sistema falle. Matemáticamente, esto puede expresarse como:

$$40 \quad MTTR_{sys} = \sum (P_{event_i} * MTTR_i) \quad 8$$

45 donde $MTTR_i$ es el tiempo medio en reparar o sustituir el componente i, según proceda, P_{event_i} es la probabilidad de que el componente i haga que el sistema se detenga, y el sumatorio incluye todos los componentes.

Para el proceso descrito y reivindicado en la presente memoria, no existen fallos simultáneos observados de más de un componente.

50 Existen modos conocidos en la técnica para determinar analíticamente P_{event_i} para muchos sistemas no concurrentes, dada la PDF de tiempo de actividad para cada componente. Sin embargo, no se encuentra en la técnica anterior un enfoque semejante conocido por los solicitantes para hacer esta determinación para sistemas concurrentes con falsos arranques, dada la compleja interacción entre los tiempos de actividad de los componentes. En sistemas de modo de fallo concurrente, el tiempo entre fallos y las frecuencias de falso arranque dependen del comportamiento de todos los componentes del sistema. La frecuencia de fallo relativa para un único componente no puede aislarse de los efectos causados por el resto del sistema.

60 El enfoque más común utilizado en la técnica anterior para evaluar la disponibilidad del sistema, es la simulación del sistema. Si se utiliza la simulación del sistema, el analista debe determinar durante cuánto tiempo ejecutar la simulación informática de dicho modelo para alcanzar una exactitud deseada. Si la simulación se ejecuta durante demasiado tiempo, se desperdician el tiempo de analista y el tiempo de ordenador. Si la simulación no se ejecuta durante un tiempo suficiente, es posible que no se obtenga una exactitud suficiente. Véase en la hoja aparte el texto adicional a los Antecedentes de la invención. Por tanto, existe una necesidad en la técnica de una solución simple para determinar la disponibilidad del sistema. Tal solución desvincularía la exactitud y la duración del tiempo de ejecución de la simulación. Además, este método puede utilizarse para identificar el componente que tenga el mayor impacto sobre la disponibilidad y, por lo tanto, ayudar a centrarse en los esfuerzos de mejora del sistema.

En la literatura conocida por los solicitantes para los sistemas de producción reparables, los modos de fallo, típicamente, se consideran no concurrentes para el propósito de estimar la disponibilidad. Hemos descubierto que el uso de modelos de fallo concurrentes aumenta la exactitud de las predicciones de modelo. Por lo tanto, hay una necesidad en la técnica de modelizar sistemas de modo de fallo concurrentes y mixtos concurrentes / no concurrentes.

Resumen de la invención

La invención comprende un método según la reivindicación 1. El método es no combinatorio, y comprende la etapa de calcular la probabilidad según la ecuación $P_{event_i} = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t)dt + P_{event0_i}$, en donde P_{event_i} es la probabilidad de que se observe un evento particular, $h_i(t)$ es la velocidad instantánea de aparición del evento i , $R_{sys}(t)$ es la función de fiabilidad para el sistema en el que pueden producirse los eventos, y P_{event0_i} es la probabilidad de que se observe un evento cuando el evento se produzca simultáneamente junto con $k-1$ otros eventos, e i representa un evento particular.

Si se desea, el primer término del lado derecho de la ecuación $\int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t)dt$, puede hacerse igual a 0. La ecuación resultante puede utilizarse entonces para calcular la probabilidad de que un evento se produzca de forma independiente de otros eventos que se estén observando, según la ecuación $P_{event0_i} = \sum_{n=1}^N y_i^{(n)}$, en donde $y_i^{(n)}$ es la probabilidad de que se observe el evento de interés, cuando dicho evento se produce de forma simultánea a $n-1$ otros eventos, y en donde N es el número total de eventos posibles, donde se determina la probabilidad de que se observe el evento i solo él, según la ecuación $y_i^{(1)} = [(1 - R_i(0)) / R_i(0)] * \prod_{j=1}^N R_j(0)$, en donde $R_j(0)$ es la probabilidad de que no se produzca el evento, y al calcular la probabilidad de que el evento i se observará cuándo el evento i se produzca de forma simultánea a al menos un otro evento. El método puede utilizarse para sistemas de producción, para determinar la probabilidad de fallo al reiniciar dicho sistema.

Si se desea, el segundo término del lado derecho de la ecuación, (P_{event0_i}), puede hacerse igual a 0. Esto permite que la ecuación determine la probabilidad de que se observe un evento en el sistema tras el inicio del sistema, según la ecuación

$$P_{event_i} = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t)dt.$$

Todos los documentos y direcciones de internet citados se incorporan, en su parte pertinente, como referencia en la presente memoria; la cita de cualquier documento no debe interpretarse como una admisión de que se trata de una técnica anterior con respecto a la presente invención.

Descripción detallada de la invención

Un sistema es cualquier conjunto de componentes, procesos o funciones, que proporcionan, llevan a cabo, actúan sobre o mejoran, un producto o servicio. Un componente es cualquier parte de un sistema que lleva a cabo una función. El sistema tiene tiempos de actividad, exceptuando los falsos arranques, y tiempos de inactividad, que pueden caracterizarse por separado por la PDF, $R(t)$ y $h(t)$, como se ha indicado anteriormente. En el siguiente análisis, cada misión, o uso del sistema, comienza con los componentes que compiten, salvo como se establece a continuación para algunos sistemas que combinan componentes concurrentes, y algunos tipos de componentes no concurrentes. Los datos se recogen para ayudar en, e iniciar, el análisis del sistema. Los datos relevantes pueden incluir, arranque, fallos, sus causas, momento de aparición, mantenimiento preventivo (tanto el realizado como las oportunidades no realizadas), duración del tiempo de actividad y duración del tiempo de inactividad.

La explicación anterior se ha dirigido a fallos de uno o más componentes dentro del sistema. No obstante, la invención no se limita a lo anteriormente expuesto. La invención descrita y reivindicada en la presente memoria también es aplicable a modos de fallo que no impliquen específicamente el fallo de un componente individual, o a observaciones de un evento que pueda producirse solo o con uno o más eventos, cuyos términos se utilizarán de modo intercambiable, según requiera el contexto. Más especialmente, el sistema puede no funcionar a su eficiencia o velocidad de producción objetivas, o puede detenerse totalmente, en ausencia de un fallo de uno o más componentes. Esto causa un tiempo de inactividad del sistema sin un fallo de componente. Por lo tanto, los modos de fallo incluyen, y son más amplios que, los fallos de componente. Los modos de fallo pueden hacer que el sistema tenga tiempos de inactividad debido a motivos que incluyen fallos de componentes y otras causas de fallos. Por ejemplo, las condiciones ambientales, las variaciones de las materias primas y los parámetros operativos pueden variar, haciendo que se produzca un tiempo de inactividad sin un fallo de componente. Cada una de estas apariciones se considera un modo de fallo del sistema.

Estos datos pueden parametrizarse en varias distribuciones paramétricas distintas, dependiendo del tipo de ecuación paramétrica que se seleccione. Por ejemplo, pueden seleccionarse las distribuciones exponenciales, normales, logarítmicas normales, de Weibull, de gamma, de Bernoulli, binomiales negativas, de Poisson, hipergeométricas u otras. Estas distribuciones, y otras, se describen en el cap. 19 del Handbook of Reliability Engineering and Management, anteriormente mencionado. Un experto en la técnica reconocerá que, si se desea, puede incorporarse una función de cambio de tiempo; sin embargo, para simplificar, no se incluye en el análisis que sigue. El enfoque descrito y reivindicado en la presente memoria también es generalizable a modelos no paramétricos.

Una distribución exponencial viene dada por las ecuaciones

	$R(t) = \exp(-\lambda * t)$	9
	$PDF(t) = \lambda \exp(-\lambda * t)$	10
	$h(t) = \lambda$	11
5	$\lambda = 1 / MTBF$ para modelizar el tiempo de actividad, y	12
	$\lambda = 1 / MTTR$ para modelizar el tiempo de inactividad	

en donde t es el tiempo medido en cualquier unidad apropiada, y las ecuaciones 9-11 pueden utilizarse para datos de tiempo de actividad y de tiempo de inactividad.

10 Una distribución de Weibull viene dada por las ecuaciones

	$R(t) = \exp[-(t / \alpha)^\beta]$	13
	$PDF(t) = [(\beta / \alpha) * (t / \alpha)^{\beta-1}] * R(t)$	14
15	$h(t) = [(\beta / \alpha) * (t / \alpha)^{\beta-1}]$	15
	$MTTR = \alpha \Gamma(1 / \beta + 1)$ para el tiempo de inactividad y $MTBF = \alpha \Gamma(1 / \beta + 1)$ para el tiempo de actividad	16

donde α es el parámetro de escala, β es el parámetro de forma y $\Gamma(1 / \beta + 1)$ es la función gamma evaluada en $(1 / \beta + 1)$.

20 La distribución exponencial se utiliza ampliamente en la literatura de ingeniería de fiabilidad. La distribución de Weibull es útil para sistemas que tengan una vida mínima esperada y componentes que raramente fallen antes de que transcurra la vida mínima esperada. La distribución de Weibull es más general que la distribución exponencial, dado que la distribución de Weibull es equivalente a la distribución exponencial para $\beta = 1$. La distribución de Weibull es la más versátil de las distribuciones citadas en la presente memoria, y se utilizará a lo largo de la explicación que sigue. Sin embargo, debe entenderse que cualquiera de las distribuciones ilustrativas y no limitativas anteriormente mencionadas, pueden utilizarse para parametrizar datos, como sucede con otras distribuciones conocidas para el experto en la técnica.

Una vez seleccionada una distribución, tal como la distribución de Weibull, esta puede modelizar por separado tiempos de inactividad de sistema y tiempos de actividad de sistema. α es el parámetro de escala y se escala como MTBF o MTTR. β es el parámetro de forma y determina la forma de la distribución. Los valores reales para α y β para cualquier componente de sistema pueden determinarse directamente a partir de datos de equipo similares mediante el método de máxima probabilidad para tiempos de inactividad y de máxima probabilidad con censura para tiempos de actividad. Estos métodos son conocidos para el experto en la técnica y se explican en:
<http://www.asp.ucar.edu/colloquium/1992/notes/part1/node20.html>;
<http://www.math.uah.edu/stat/point/point3.html>;
http://physics.valpo.edu/courses/p310/ch4_maxLike/sld001.html; y
<http://www.basic.nwu.edu/statguidefiles/survival.html>.

El modelo matemático del sistema desarrollado a continuación utiliza la distribución de Weibull ilustrativa y no limitativa preferida para parametrizar datos de tiempo de actividad (excluidos falsos arranques) y de tiempo de inactividad. Especialmente, se desarrollarán y determinarán analíticamente, $f(t)$, la fiabilidad general del sistema en función del tiempo $R_{sys}(t)$, disponibilidad, MTBF y MTTR.

A partir de las ecuaciones 3, 4 y 13, la fiabilidad del sistema puede relacionarse con la PDF de tiempo de actividad para cualquier componente del sistema, basándose en n componentes sujetos a fallos. La relación viene dada por la fórmula:

$$R_{sys}(t) = \prod (R_i(0) * \exp[-(t / \alpha_i)^{\beta_i}]) \quad 17$$

donde el subíndice i se refiere al componente i y el producto incluye todos los componentes del sistema.

El tiempo esperado de funcionamiento entre fallos del sistema, $MTBF_{sys}$, se determina a partir de la ecuación 5 utilizando la ecuación 17. La ecuación 5 puede resolverse fácilmente de forma analítica para la distribución exponencial, y numéricamente para la distribución de Weibull y otras distribuciones. Similarmente, el tiempo medio hasta la reparación de un componente i del sistema viene dado por la ecuación 16 utilizando los parámetros de tiempo de inactividad α_{downi} y β_{downi} .

Por lo tanto, solo es necesario evaluar $Pevent_i$ en la ecuación 8 para calcular la disponibilidad en la ecuación 1, donde $Pevent_i$ es la probabilidad de que un fallo de componente i detuviese el sistema. A continuación, se describe un método sencillo para determinar $Pevent_i$ a partir de las funciones de probabilidad de tiempo de actividad del componente individual.

Un componente puede fallar de dos formas. Puede fallar en forma de un falso arranque, sin permitir que el sistema alcance su velocidad de producción prevista, o puede fallar después de que el sistema haya alcanzado su velocidad plena. Algebraicamente, la probabilidad de este suceso se expresa como:

$$Pevent_i = Pevent0_i + PeventNot0_i \quad 18$$

donde $Pevent_i$ es la probabilidad de observar un fallo de componente,
 $Pevent0_i$ es la probabilidad de fallo de un componente, que interrumpa el funcionamiento del sistema en el arranque con un tiempo de actividad igual a cero, y
 $PeventNot0_i$ es la probabilidad de que un evento particular haga que el sistema falle, salvo en el arranque, y con un tiempo de actividad mayor que cero.

Con referencia al segundo término de la ecuación 18, la probabilidad de que el componente i cause la detención del sistema después de que haya alcanzado su velocidad de producción plena, $PeventNot0_i$, viene dada por:

$$PeventNot0_i = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t) dt. \quad 19$$

Para la distribución ilustrativa y no limitativa de Weibull, $R_{syst}(t)$ es la fiabilidad general del sistema en un tiempo t dada por la ecuación 17, y $h_i(t)$ es la función de peligro para el componente i en un tiempo t dada por la ecuación 15. La ecuación 19 puede resolverse analíticamente para distribuciones de tiempo de actividad exponenciales, y numéricamente para la distribución de Weibull y otras distribuciones. Puesto que la ecuación 19 no se encuentra en la técnica anterior, a continuación se muestra su derivación.

Si t_f es el tiempo en que el sistema falla, entonces de la definición de la función de peligro

$$h_i(t)dt = \text{prob}(t < t_f < t + dt | t < t_f) y \quad 20$$

es la probabilidad de que el sistema falle entre tiempo t y $t + dt$ debido al componente i , dado que el componente no ha fallado antes del tiempo t .

Sin embargo, en un sistema con un fallo concurrente con una política de reparaciones SAN para todos los componentes en cada fallo, un componente individual alcanzará el tiempo t solo si todo el sistema alcanza el tiempo t . Dado que la probabilidad de que un sistema alcance el tiempo t viene dada por:

$$R_{sys}(t) = \text{prob}(t < t_f) \quad 21$$

y es la probabilidad de que el sistema no falle antes del tiempo t .

Entonces, a partir de la definición de probabilidad condicionada

$$h_i(t) * R_{sys}(t)dt = \text{probabilidad de que el sistema falle debido a componente } \quad 22$$

i entre el tiempo t y $t + dt$.

La integral de la ecuación 22 sobre todos los tiempos posibles es igual a la probabilidad de que el componente i detenga el sistema en cualquier tiempo $t > 0$, como se expresa en la ecuación 19, completando por lo tanto la derivación.

También debe tenerse en cuenta el primer término de la ecuación 18, que es la probabilidad de un falso arranque; es decir, un fallo de componente en el tiempo 0. Para un sistema de modo de fallo concurrente, cuando se completa una reparación de sistema y el sistema está listo para el arranque, todos los componentes son susceptibles de fallar nuevamente antes de que el sistema alcance su velocidad deseada, dado que los componentes concurrentes están sujetos a una probabilidad de falso arranque, $R(0)$, en cada intento de arrancar el equipo.

La estimación de una probabilidad de falso arranque es complicada, por el hecho de que múltiples componentes pueden ser susceptibles a fallo simultáneo durante el arranque, pero a todos los efectos solo se considera que falla un componente. Un falso arranque se asigna únicamente a un componente. A continuación se explican dos métodos de resolución ilustrativos y no limitativos de desempate, si bien son posibles otros métodos dentro del alcance de la invención reivindicada.

En el primer método, si múltiples componentes realizan simultáneamente un falso arranque, el falso arranque se asigna aleatoriamente a cualquiera de los componentes implicados en el falso arranque. Este método reconoce que la duración de un falso arranque es un tiempo positivo muy corto. El primer componente que falla durante este tiempo muy corto podría hacerlo aleatoriamente. Según este método, cada modo de fallo de aparición simultánea tiene una probabilidad igual de ser designado como causa del falso arranque.

Otro método ilustrativo y no limitativo para abordar falsos arranques de múltiples componentes simultáneos, es asignar el falso arranque al fallo dominante de los componentes implicados. El fallo dominante se considera que es, o el fallo que más rápido se produce, detecte o registre, o aquel con un tiempo para reparar más largo. Un modo de aplicar el segundo método ilustrativo y no limitativo para asignar la causa del evento de falso arranque para un modo de fallo particular, es considerar que cada modo de fallo tiene un factor asociado al mismo. El modo de fallo que se selecciona como la causa del falso arranque, se selecciona basándonos en la dominancia de dicho factor respecto a los factores correspondientes de los otros modos de fallo implicados en el empate.

5 Por ejemplo, el factor puede ser el tiempo medio hasta la reparación de dicho modo de fallo. Por lo tanto, en este caso, la dominancia de un componente o modo de fallo en particular se rige por el modo de fallo que tenga el mayor tiempo medio hasta reparación. De forma alternativa, el factor puede ser el modo de fallo conocido por ser el primero en fallar entre los otros modos de fallo implicados en el empate. Por supuesto, también pueden utilizarse otros factores.

10 Para calcular $P_{event0i}$ para cada componente, se considera que la probabilidad de un falso arranque es independiente del componente que había fallado previamente, e independiente de otros componentes en el sistema. En este caso, es posible determinar la probabilidad de que el sistema no tenga un falso arranque después de un fallo. Matemáticamente, esto viene dado por

$$R_{sys}(0) = \prod R_i(0) \quad 23$$

15 Partiendo de la teoría de la probabilidad, la probabilidad de que el componente i se vea implicado en un evento de falso arranque puede obtenerse sustituyendo el término $R_i(0)$ por $1 - R_i(0)$ en la ecuación 23. Esta sustitución se aplica a eventos donde más de un componente puede tener un falso arranque. Por ejemplo, en un sistema que tenga ocho o más componentes, la probabilidad de que solo los componentes 1, 3 y 8 produzcan un falso arranque de forma simultánea, viene dada por:

$$20 \quad x(1, 3, 8) = R_{sys}(0) * [(1 - R_1(0)) * (1 - R_3(0)) * (1 - R_8(0)) / (R_1(0) * R_3(0) * R_8(0))] \quad 24$$

donde $x(1, 3, 8)$ es la probabilidad de que los componentes 1, 3 y 8 tengan un falso arranque de forma simultánea. El término entre paréntesis en la ecuación 24 tiene el efecto de sustituir el término $R_i(0)$ por $(1 - R_i(0))$ para $i = 1, 3$ y 8 .

25 Utilizando el ejemplo anterior, la probabilidad de designar el componente 1 como la causa del falso arranque cuando se produce un evento con el fallo simultáneo de los componentes 1, 3 y 8, depende del método de desempate específico seleccionado. Si la asignación es aleatoria, un tercio de la probabilidad dada por $x(1, 3, 8)$, en la ecuación 24, se asigna al componente 1, puesto que hay tres componentes implicados en los fallos simultáneos de falso arranque. Por otra parte, si el fallo del componente 1 domina sobre el fallo de los otros dos componentes, la probabilidad total del valor en la ecuación 24 se asigna al componente 1. A los componentes 3 y 8 se les asigna una probabilidad cero para este evento particular.

30 $x(1, 3, 8) / 3$ si se produce una asignación de componentes aleatoria

$$y_1(1, 3, 8) = x(1, 3, 8) \quad 25$$

35 si el componente 1 es dominante
0 si el componente 3 u 8 es dominante
en donde $y_1(1, 3, 8)$ es la probabilidad de que los componentes 1, 3 y 8 tengan un falso arranque simultáneo, y el fallo del componente 1 se designará como la causa del falso arranque.

40 La probabilidad de tener un conjunto específico de componentes con un falso arranque de forma simultánea en el mismo evento, se expresa matemáticamente mediante:

$$x(J) = R_{sys}(0) * \prod [(1 - R_i(0)) / R_i(0)] \quad 26$$

45 donde el subíndice j se limita ahora únicamente a aquellos componentes que realizarán un arranque falso de forma simultánea. Matemáticamente se denota como J , es un elemento del conjunto J de componentes con capacidad de un falso arranque simultáneo, y $x(J)$ es la probabilidad de tener un evento donde J sea un elemento del conjunto J .

50 Si la asignación es aleatoria, la probabilidad dada por $x(J)$ en la ecuación 26 debe dividirse por el número total de componentes posiblemente implicados en el empate, y el valor resultante debe asignarse a cada uno de los componentes implicados a partes iguales. Por otra parte, si algún fallo dado predomina sobre los otros, toda la probabilidad en la ecuación 26 debe asignarse al componente dominante, y los componentes restantes deben tener asignados una probabilidad cero para este evento en particular. Generalmente, esto puede expresarse como:

55 $x(J) / (\text{tamaño de } J)$ si el componente i se selecciona de forma aleatoria

$$y_i(J) = x(J) \quad 27$$

60 si el componente i es dominante
0 si un componente distinto de i es dominante
donde $y_i(J)$ es la probabilidad de que los componentes del conjunto J produzcan un falso arranque de forma simultánea, y que el componente i domine sobre los otros y sea designado como la causa del falso arranque.

65 Es posible diseñar un algoritmo de cálculo que calcule $P_{event0i}$ en la ecuación 18, generando todas las combinaciones posibles de los conjuntos J de eventos de fallo que contengan el componente i -simo, calculando la probabilidad de cada evento utilizando la ecuación 26, y seguidamente sumando las correspondientes probabilidades asignadas utilizando la ecuación 27. Esto se expresa matemáticamente mediante:

$$P_{event0_i} = \sum y_i (J)$$

28

donde la suma es para todos los conjuntos J posibles.

5 Por ejemplo, supongamos que el sistema tiene 3 componentes. De la ecuación 28, P_{event0_1} se obtiene sumando la probabilidad de que el componente 1 tenga un falso arranque solo él, más la probabilidad de que el componente 1 tenga un falso arranque simultáneamente con el componente 2 y dominen, más la probabilidad de que el componente 1 tenga un falso arranque simultáneamente con el componente 3 y dominen, más la probabilidad de que el componente 1 tenga un falso arranque simultáneamente con los componentes 2 y 3, y dominen. Matemáticamente, este ejemplo no limitativo puede expresarse como

$$P_{event0_1} = y_1 (1) + y_1 (1, 2) + y_1 (1, 3) + y_1 (1, 2, 3)$$

29

15 La ecuación 28 es viable y dentro del alcance de la presente invención, pero requiere el experto en la técnica para calcular todas las combinaciones posibles de falsos arranques simultáneos. Si el número de componentes es muy grande, este método de evaluar las probabilidades para cada evento se volverá grande porque el número de combinaciones potenciales crece a una velocidad de $2^{(N - 1)}$, donde N es el número total de componentes en el sistema. Por lo tanto, sería útil tener un método más eficiente para analizar los falsos arranques, para sistemas que tengan un gran número de componentes.

La ecuación 28 también puede escribirse para N componentes, modos de fallo o eventos, como

$$P_{event0_i} = \sum_{k=1}^N y_i^{(k)}$$

30

en donde P_{event0_i} es la probabilidad de que se observe el evento de interés, N es el número total de componentes o eventos que pueden producirse de forma simultánea, el índice i se refiere al componente i, e $y_i^{(k)}$ es la suma de todos los $y_i (J)$ cuando los conjuntos J tienen un tamaño k.

Por tanto, $y_i^{(k)}$ es la probabilidad de que el evento de interés se observe cuando el evento se produzca simultáneamente con k-1 otros eventos. De igual modo, esto también es la probabilidad de observar un fallo del componente i cuando el componente i falla simultáneamente con k-1 otros componentes.

Por ejemplo, si tenemos cuatro componentes:

$$\begin{aligned} y_1^{(1)} &= y_1 (1) \\ y_1^{(2)} &= y_1 (1, 2) + y_1 (1, 3) + y_1 (1, 4) \\ y_1^{(3)} &= y_1 (1, 2, 3) + y_1 (1, 2, 4) + y_1 (1, 3, 4) \\ y_1^{(4)} &= y_1 (1, 2, 3, 4) \end{aligned}$$

donde el componente 1 es un elemento en cada conjunto.

Un algoritmo simplificado para determinar la probabilidad de un evento de falso arranque, P_{event0_i} , viene dado por las siguientes etapas.

Etapas 1: Obtener la probabilidad de que el componente i tenga un falso arranque solo él.

$$y_i^{(1)} = R_{sys}(0) * [(1 - R_i(0)) / (R_i(0))]$$

31

donde $R_{sys}(0)$ es la probabilidad de que el sistema no tendrá un falso arranque, y viene dada por la ecuación 23.

Etapas 2: Calcular la probabilidad residual de tener un falso arranque simultáneo de 2 o más componentes.

$$Residual^{(0)} = 1 - \prod_{j=1}^N R_j(0)$$

32

$$\begin{aligned} Residual^{(1)} &= 1 - R_{sys}(0) - \sum_{j=1}^N y_j^{(1)} \\ Residual^{(n)} &= Residual^{(n-1)} - \sum_{j=1}^N y_j^{(n)} \end{aligned}$$

Etapas 3: Si el residual es lo suficientemente pequeño, detener; si no, establecer $n = 1$ y proceder. Se ha descubierto que un error predeterminado, o residual, de 10^{-6} funciona bien.

Etapas 4: Calcular las probabilidades de que el componente i tenga un falso arranque de forma simultánea con uno o más otros componentes en empates que impliquen progresivamente más componentes.

(a) Si todos los componentes dominan aleatoriamente el empate, entonces:

$$y_i^{(n+1)} = [(1 - R_i(0)) / (R_i(0) * (n + 1))] * [\sum_{j=1}^N y_j^{(n)} - n * y_i^{(n)}]$$

33a

para todos los componentes i de 1 a N .

- 5 (b) Si el componente 1 domina al componente 2, y el componente 2 domina al componente 3, y, en general, el componente k domina a cualquier componente p donde $p > k$, entonces:

$$y_i^{(n+1)} = [(1 - R_i(0)) / R_i(0)] * \sum_{j=i+1}^N y_j^{(n)} \quad 33b$$

para todos los componentes i de 1 a N .

10

Eta 5: Calcular la probabilidad de tener un falso arranque simultáneo de más de $n + 1$ componentes.

$$\text{Residual}^{(n+1)} = \text{Residual}^{(n)} - \sum_{j=1}^N y_j^{(n+1)} \quad 34$$

- 15 Eta 6: Será evidente para el experto en la técnica que $\text{Residual}^{(n)}$ disminuye a medida que n aumenta. Si el residual es lo suficientemente pequeño o $n + 1 = N$, detener; si no, hacer $n = n + 1$ y proceder a la eta 4.

Ahora tenemos un método completo para determinar la disponibilidad para un sistema de componentes concurrentes.

- 20 (1) Determinar para cada componente i , $i = 1$ a N , la probabilidad de que el componente domine un falso arranque ($\text{Pevent}0_i$) utilizando el algoritmo anterior con las ecuaciones 30 a 34.
 (2) Determinar para cada componente i , $i = 1$ a N , la probabilidad de que el componente falle sin un falso arranque ($\text{PeventNot}0_i$) utilizando la ecuación 19.
 (3) Determinar para cada componente i , $i = 1$ a N , la probabilidad de que dicho componente sea la causa del fallo (Pevent_i) a partir de las 2 etapas anteriores y de la ecuación 18.
 (4) Determinar para cada componente i , $i = 1$ a N , su tiempo medio hasta reparación (MTTR_i) utilizando la ecuación 7 u otra ecuación adecuada de la literatura para las distribuciones de reparación de componentes.
 (5) Determinar el tiempo medio hasta reparación del sistema (MTTR_{sys}) a partir de las etapas 3 y 4, y la ecuación 8.
 (6) Determinar el tiempo medio entre fallos del sistema (MTBF_{sys}) a partir de la ecuación 5.
 30 (7) Determinar la disponibilidad del sistema a partir de las etapas 5-6 y la ecuación 1.

Un uso ilustrativo y no limitativo de la invención reivindicada, es calcular la probabilidad de que ocurra un evento, teniendo en cuenta la frecuencia de observación, $\text{Pevent}(0)_i$, cuando el evento se produce solo o con al menos otro evento. Según el método, se ajusta iterativamente el valor de $R_i(0)$ hasta que se alcance un umbral de error predeterminado. El método comprende las etapas de:

- (A) Seleccionar un valor de $R_i(0)$.
 Por ejemplo, un valor posible puede ser $R_i(0) = 1 - \text{Pevent}0_i$
 (B) determinar un valor de $\text{Pevent}_{\text{determinado}0_i}$ a partir de la ecuación

40

$$\text{Pevent}_{\text{determinado}0_i} = \sum_{n=1}^N y_i^{(n)}$$

- (C) Si el valor determinado de $\text{Pevent}_{\text{determinado}0_i}$ está dentro de una tolerancia predeterminada a partir del valor conocido de $\text{Pevent}_{\text{actual}0_i}$, entonces detener.
 45 (D) Si el valor determinado de $\text{Pevent}_{\text{determinado}0_i}$ no está dentro de una tolerancia predeterminada del valor conocido de $\text{Pevent}_{\text{actual}0_i}$, entonces ajustar el valor a $R_i(0)$ hasta que el valor observado de $\text{Pevent}0_i$ converja al valor actual de $\text{Pevent}0_i$. Puede obtenerse un método semejante ajustando $R_i(0)_{\text{new}}$ según la ecuación $R_i(0)_{\text{nuevo}} = R_i(0)_{\text{antiguo}} + \text{Pevent}_{\text{determinado}0_i} - \text{Pevent}_{\text{actual}0_i}$, si bien el experto en la técnica conoce muchos otros métodos y que no se repetirán aquí.
 (E) Repetir la eta (D) hasta que el valor determinado de $\text{Pevent}_{\text{determinado}0_i}$ esté dentro de la tolerancia predeterminada o deseada.

50

Por supuesto, un sistema puede tener componentes concurrentes y no concurrentes. Por ejemplo, un sistema de producción puede requerir una materia prima que venga en un tanque, rodillo, caja u otra forma de lote finita. Una vez que el lote de materia prima se agota, el equipo puede tener que detenerse para traer un nuevo lote. La duración entre paradas necesaria para reabastecer la materia prima es una función de su vida de lote. El tiempo de ejecución de un reabastecimiento de lotes hasta el siguiente no es una función de ningún otro fallo en el sistema. Por lo tanto, el componente de reabastecimiento del lote en este sistema es no concurrente. Por lo tanto, para determinados sistemas puede desearse tener un enfoque generalizado que pueda estimar la disponibilidad de un sistema que tenga tanto fallos concurrentes como no concurrentes.

55

60

Un componente no concurrente que tenga un tiempo medio entre fallos (MTBF_i) que sea independiente de los otros fallos en el sistema, puede convertirse a un componente concurrente equivalente con una distribución exponencial de tiempos de actividad, con la misma tasa de fallo y sin falsos arranques. Matemáticamente,

65

$$R_i(0) = 1, \lambda_i = 1 / \text{MTBF}_i \quad 35$$

o utilizando una distribución de tiempo de actividad de Weibull

$$R_i(0) = 1, \alpha_i = \text{MTBF}_i \text{ y } \beta_i = 1 \quad 36$$

5 La conversión es posible dado que MTBF_i para un componente concurrente exponencial es independiente de los otros componentes en el sistema, y por lo tanto, el modelo predirá el mismo número de paradas.

Abajo se muestra una prueba matemática de que MTBF_i , para un componente concurrente exponencial, es independiente del MTBF_i de otros componentes en el sistema, siendo por lo tanto igual a $1 / \lambda_i$.

10

De la definición de MTBF

$$\text{MTBF}_i = \text{tiempo de actividad total} / \text{paradas totales debidas al componente } i \\ = \text{MTBF}_{\text{sys}} / \text{Pevent}_i$$

De las ecuaciones 18 y 19, y dado que $\text{Pevent}_i = 0$ cuando $R_i(0) = 1$

15

$$\text{MTBF}_i = \text{MTBF}_{\text{sys}} / \int_0^\infty h_i(t) * R_{\text{sys}}(t) dt \quad 37$$

Para una función exponencial podemos utilizar la función de peligro en la ecuación 11

20

$$\text{MTBF}_i = \text{MTBF}_{\text{sys}} / (\int_0^\infty \lambda_i * R_{\text{sys}}(t) dt) \\ = \text{MTBF}_{\text{sys}} / (\lambda_i * \int_0^\infty R_{\text{sys}}(t) dt) \quad 38$$

Por último, de la ecuación 5

25

$$\text{MTBF}_i = \text{MTBF}_{\text{sys}} / (\lambda_i * \text{MTBF}_{\text{sys}}) \\ = 1 / \lambda_i \quad 39$$

Por lo tanto, un experto en la técnica puede analizar un componente no concurrente, transformándolo a un componente concurrente exponencial sin falsos arranques.

30

Si se desea, cualquiera de los términos del lado derecho de la ecuación 18 puede hacerse igual a 0. Si el término $\int_0^\infty h_i(t) * R_{\text{sys}}(t) dt$ se hace igual a 0, la ecuación y el método de la ecuación 18 es no combinatorio. Esto permite al experto en la técnica calcular la probabilidad de que se produzca cada evento utilizando la ecuación $\text{Pevent}_i = \sum_{n=1}^N y_i^{(n)}$, donde $y_i^{(n)}$ es la probabilidad de que el evento de interés se observe cuando dicho evento se produzca simultáneamente con $n - 1$ otros eventos, y N es el número total de posibles eventos que pueden producirse de forma simultánea en dicho sistema. Para ello, se determinará la probabilidad de que el evento i se observe solo él o, de modo similar, que el componente i falle solo él, según la ecuación

35

$$y_i^{(1)} = [(1 - R_i(0)) / R_i(0)] * \prod_{j=1}^N R_j(0),$$

40

en donde $R_i(0)$ es la probabilidad de que el evento no se produzca o de que el componente no falle.

De la misma manera, el segundo término de la ecuación 18 puede hacerse igual a 0. Hacer esto nos da la ecuación $\text{Pevent}_i = \int_0^\infty h_i(t) * R_{\text{sys}}(t) dt$. Por lo tanto, utilizando la ecuación 18, puede calcularse la probabilidad de que se observe un evento en el sistema después del inicio del sistema, o de que un componente en el sistema falle después del inicio del sistema.

45

Utilizando las relaciones matemáticas mencionadas anteriormente, pueden responderse las siguientes preguntas:

50

1. ¿Cuánta mejora en disponibilidad se producirá al eliminar un modo de fallo específico?
2. ¿Qué modo de fallo, si se elimina, dará lugar a la mayor mejora de disponibilidad del sistema?

Un método ilustrativo y no limitativo para determinar qué tiempo de actividad de componente tiene el mayor impacto sobre la disponibilidad del sistema, es establecer matemáticamente la fiabilidad de dicho componente a la unidad. De la ecuación 3, fijar la fiabilidad a la unidad requiere que la probabilidad de no tener un falso arranque y $R_{\text{uptime}}(t)$ se hagan ambos igual a 1. Para una distribución de Weibull, cuando α se acerca a infinito, $R_{\text{uptime}}(t)$ se aproxima a 1. Si se toma α como un número muy grande, la fiabilidad del componente se aproximará a una vida infinita y el fallo de dicho componente se elimina de forma eficaz del sistema.

55

Por lo tanto, para una distribución de Weibull, cada componente puede a su vez eliminarse matemáticamente del sistema, proporcionando a dicho componente un valor grande de α . La fiabilidad total del sistema se vuelve a continuación a calcular con cada componente que se haya retirado matemáticamente, a su vez, como posible modo de fallo. A continuación se examina cada una de las fiabilidades de sistema resultantes, que equivaldrán al número total de componentes en el sistema, para ver qué fiabilidad es la mayor. La mayor de estas fiabilidades de sistema, muestra que la mejora de fiabilidad de componente tendrá el mayor impacto sobre la fiabilidad general del sistema.

65

El proceso simple, descrito y reivindicado en la presente memoria, y los cálculos de soporte, pueden establecerse en un programa informático. Si bien el programa se ha escrito utilizando VISUAL BASIC PARA EXCEL, el experto en la técnica reconocerá que tal programa también puede escribirse en muchos otros lenguajes de programación, tales como, aunque no de forma limitativa, C++, Fortran, Java, Prolog y Pascal. Aun cuando la solución descrita y reivindicada en la presente memoria puede aplicarse mediante un programa informático, por comodidad de uso, un experto en la técnica reconocerá que la invención no está tan limitada. La solución puede realizarse también mediante cálculos manuales, soluciones asistidas por ordenador y/o combinaciones de los mismos.

El procedimiento utilizado en el programa tiene las siguientes etapas

1. Leer los datos y realizar todas las comprobaciones de error necesarias.
2. Convertir los componentes no concurrentes en componentes concurrentes que tengan distribuciones de tiempo de actividad exponenciales, con la misma tasa de fallos y sin falsos arranques.
3. Establecer las ecuaciones para calcular la disponibilidad del sistema utilizando el método descrito y reivindicado en la presente memoria.
4. Registrar la disponibilidad del sistema.
5. Para cada modo de fallo, determinar la mejora en la disponibilidad del sistema:
 - a. forzando temporalmente el tiempo entre fallos para dicho modo particular, para que sea muy grande. Para una distribución de tiempo de actividad de Weibull, esto se logra fijando el tiempo de actividad alfa a un valor muy grande y fijando un tiempo de actividad beta igual a uno. También, impedir un falso arranque para la variable, fijando temporalmente $R_i(0)$ a uno,
 - b. recalculando la disponibilidad del sistema, y
 - c. registrando, opcionalmente, la mejora de disponibilidad del sistema.
6. Opcionalmente, clasificar los componentes en orden de importancia, sobre la base del impacto de cada modo de fallo sobre la disponibilidad general del sistema.

Ejemplo I

Etapa 4:

Calcular el MTBF del sistema

$$MTBF_{sys} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t) dt$$

$$R_{sys}(t) = \prod R_i(t) = \prod R(0)_i e^{-\left(\frac{t}{\alpha UT_i}\right)^{\beta UT_i}}$$

$$MTBF_{sys} = 27,15811$$

* Fórmulas basadas en una distribución de Weibull

El MTBF se obtiene por integración numérica

Etapa 5:

Para cada uno de los modos de fallo, utilizar integración numérica para calcular PeventNot0, la probabilidad de que un modo de fallo detenga el sistema sin un falso arranque.

Tiene en cuenta la interacción del sistema entre componentes [R(0) no tiene en cuenta la interacción]

$$PeventNot0_i = \int_0^{\infty} h_i(t) R_{sys}(t) dt$$

donde

$$h_i(t) = \frac{\beta UT_i}{\alpha UT_i} \left(\frac{t}{\alpha UT_i}\right)^{\beta UT_i - 1}$$

$$R_{sys}(t) = \prod R_i(t) = \prod R(0)_i e^{-\left(\frac{t}{\alpha UT_i}\right)^{\beta UT_i}}$$

* Fórmulas basadas en una distribución de Weibull

utilizando integración numérica

	alphaUT	betaUT	R(0)	Comp	PeventNot0
F1	2262,6	0,666	0,98	1	0,029677
F2	10766,2	0,432	0,993	1	0,034660
F3	267783,7	1	1	0	0,000103
F4	911,1	0,752	0,925	1	0,045476
F5	518,5	0,277	0,962	1	0,201853
F6	405,5	0,256	0,892	1	0,230329
F7	405,5	0,256	1	1	0,230329

0,772426 total para el sistema

Debe ser el mismo que en la etapa 2

Etapa 6:

Para cada uno de los modos de fallo, utilizar integración numérica para calcular Pevent 0, la probabilidad de que un modo de fallo detenga el sistema en un falso arranque.

Etapa 6a:

Primero, calcular la probabilidad de que un componente tenga un falso arranque solo él

La notación $y(1)$ se utiliza para representar la probabilidad

Calcular la probabilidad residual.

El residual es la probabilidad de tener más de n componentes que de forma simultánea tengan un falso arranque

$$y_i(1) = \frac{1 - R(0)_i}{R(0)_i} R(0)_{sys} = \frac{1 - R(0)_i}{R(0)_i} \times 0,772426$$

$$\text{Residual } (0) = 1 - R(0)_{sys} = 1 - 0,772426 = 0,227574$$

$$\text{Residual } (n + 1) = \text{Residual } (n) - \sum y_j(n + 1)$$

Por ejemplo:

$$y_{F1}(1) = 0,772426 * \left(\frac{1 - 0,98}{0,98} \right) = 0,0157638$$

$$\text{Residual}(1) = \text{Residual}(0) - \sum y_j(1) = 0,227574 - 0,207872 = 0,019702$$

	alphaUT	betaUT	R(0)	PeventNot0	1-R(0)	y(1)
F1	2262,6	0,666	0,98	0,029677	0,02	0,0157638
F2	10766,2	0,432	0,993	0,034660	0,007	0,0054451
F3	267783,7	1	1	0,000103	0	0
F4	911,1	0,752	0,925	0,045476	0,075	0,0626291
F5	518,5	0,277	0,962	0,201853	0,038	0,0305116
F6	405,5	0,256	0,892	0,230329	0,108	0,0935225
F7	405,5	0,256	1	0,230329	0	0
						0,207872. Suma de los y(1)
						0,019702 Residual(f)

Etapa 6b:

Calcular la probabilidad de que un componente tenga un falso arranque cuando estén implicados en múltiples empates simultáneos
 Repetir hasta que la probabilidad residual sea lo suficientemente pequeña

$$y_i(n+1) = \left(\frac{1 - R(0)_i}{R(0)_i} \right) \frac{\left[\sum y_j(n) - n \times y_i(n) \right]}{n+1}$$

Por ejemplo:

$$y_{F1}(2) = \left(\frac{1 - 0,98}{0,98} \right) \frac{(0,207872 - 0,0157638)}{2} = 0,0019603$$

$$y_{F1}(3) = \left(\frac{1 - 0,98}{0,98} \right) \frac{(0,0189875 - 2 \times 0,0019603)}{3} = 0,0001025$$

$$\text{Residual}(3) = \text{Residual}(2) - \sum y_j(3) = 0,0007142 - 0,000704 = 1,025 \times 10^{-5}$$

	alphaUT	betaUT	R(0)	PeventNot0	y(1)	y(2)	y(3)	y(4)	
F1	2262,6	0,666	0,98	0,029677	0,0157638	0,0019603	0,0001025	2,023E-06	
F2	10766,2	0,432	0,993	0,03466	0,0054451	0,0007135	4,126E-05	1,022E-06	
F3	267783,7	1	1	0,000103	0,0000000	0	0	0	
F4	911,1	0,752	0,925	0,045476	0,0626291	0,0058882	0,0001949	2,418E-06	
F5	518,5	0,277	0,962	0,201853	0,0305116	0,003503	0,0001578	2,278E-06	
F6	405,5	0,256	0,892	0,230329	0,0935225	0,0069225	0,0002075	2,462E-06	
F7	405,5	0,256	1	0,230329	0,0000000	0	0	0	
					0,2078721	0,0189875	0,000704	1,02E-05	Suma de los y(n)
					0,0197017	0,0007142	1,025E-05	4,309E-08	Residuals

¡No es necesario añadir más términos, dado que el residual es lo suficientemente pequeño!

Etapa 6c:

Calcular Pevent0, la probabilidad de que un modo de fallo produzca un falso arranque

$$Pevent0_i = \sum y_i(n) = y_i(1) + y_i(2) + y_i(3) + y_i(4)$$

$$Pevent0_{F1} = 0,015764 + 0,0019603 + 0,0001025 + 2,02 \times 10^{-6} = 0,017829$$

	alphaUT	betaUT	R(0)	PeventNot0	y(1)	y(2)	y(3)	y(4)	Pevent0	
F1	2262,6	0,666	0,98	0,029677	0,0157638	0,0019603	0,0001025	2,023E-06	0,017828607	
F2	10766,2	0,432	0,993	0,03466	0,0054451	0,0007135	4,126E-05	1,022E-06	0,006200874	
F3	267783,7	1	1	0,000103	0	0	0	0	0	
F4	911,1	0,752	0,925	0,045476	0,0626291	0,0058882	0,0001949	2,418E-06	0,068714689	
F5	518,5	0,277	0,962	0,201853	0,0305116	0,003503	0,0001578	2,278E-06	0,034174638	
F6	405,5	0,256	0,892	0,230329	0,0935225	0,0069225	0,0002075	2,462E-06	0,100654971	
F7	405,5	0,256	1	0,230329	0	0	0	0	0	
				0,772426					Total	0,22757378

Debe añadirse a Residual(0) en la etapa 4a

Etapas 7:

Calcular la probabilidad de que un fallo detenga el sistema con o sin un falso arranque
 Tiene en cuenta la interacción del sistema entre componentes [R(0) no tiene en cuenta la interacción]

$$Pevent = PeventNot0 + Pevent0$$

	alphaUT	betaUT	R(0)	Comp	PeventNot0	Pevent0	Pevent
F1	2262,6	0,666	0,98	1	0,029677	0,017829	0,047506
F2	10766,2	0,432	0,993	1	0,034660	0,006201	0,040861
F3	267783,7	1	1	0	0,000103	0,000000	0,000103
F4	911,1	0,752	0,925	1	0,045476	0,068715	0,114190
F5	518,5	0,277	0,962	1	0,201853	0,034175	0,236027
F6	405,5	0,256	0,892	1	0,230329	0,100655	0,330984
F7	405,5	0,256	1	1	0,230329	0,000000	0,230329
					0,772426	0,227574	1,000000

Totales
debe sumarse a 1

Etapas 8:

Calcular por modo de fallo MTTR

$$MTTR_i = alphaDT_i \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{betaDT_i}\right)$$

Por ejemplo:

$$MTTR_{F1} = 0,99 \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{0,673}\right) = 1,303113$$

* Fórmula basada en una distribución de Weibull

	alphaUT	betaUT	R(0)	alphaDT	betaDT	PeventNot0	Pevent0	Pevent	MTTR
F1	2262,6	0,666	0,98	0,99	0,673	0,029677	0,0178286	0,047506	1,303112732
F2	10766,2	0,432	0,993	1,33	0,571	0,034660	0,0062009	0,040861	2,141420943
F3	267783,7	1	1	1,11	0,681	0,000103	0	0,000103	1,44352639
F4	911,1	0,752	0,925	3,17	6,084	0,045476	0,0687147	0,114190	2,943129033
F5	518,5	0,277	0,962	6,08	1,201	0,201853	0,0341746	0,236027	5,717961446
F6	405,5	0,256	0,892	7,9	0,964	0,230329	0,100655	0,330984	8,029302253
F7	405,5	0,256	1	7,9	0,964	0,230329	0	0,230329	8,029302253

Etapas 9:

Calcular el MTTR del sistema

$$MTTR_{sys} = \sum (Pevent_i \times MTTR_i)$$

	alphaUT	betaUT	R(0)	alphaDT	betaDT	PeventNot0	Pevent0	Pevent	MTTR	Pevent*MTTR
F1	2262,6	0,666	0,98	0,99	0,673	0,029677	0,0178286	0,047506	1,3031127	0,061905427
F2	10766,2	0,432	0,993	1,33	0,571	0,034660	0,0062009	0,040861	2,1414209	0,087500629
F3	267783,7	1	1	1,11	0,681	0,000103	0	0,000103	1,4435264	0,000148465
F4	911,1	0,752	0,925	3,17	6,084	0,045476	0,0687147	0,114190	2,943129	0,33607678
F5	518,5	0,277	0,962	6,08	1,201	0,201853	0,0341746	0,236027	5,7179614	1,349594813
F6	405,5	0,256	0,892	7,9	0,964	0,230329	0,100655	0,330984	8,0293023	2,657569541
F7	405,5	0,256	1	7,9	0,964	0,230329	0	0,230329	8,0293023	1,849380285
								MTTR del sistema		6,342175941

Etapa 10:
Calcular la disponibilidad del sistema

$$Disponibilidad_{sys} = \frac{MTBF_{sys}}{MTBF_{sys} + MTTR_{sys}} = \frac{27,15811}{27,15811 + 6,342176} = 0,811$$

Etapa 11:
 Para analizar el impacto de eliminar un modo de fallo,
 A) Establecer alphaUT = 1e24
 B) Establecer R(0) = 1
 C) Repetir las etapas 2 a 9

Por ejemplo, si eliminamos el modo de fallo F6, entonces:

	alphaUT	betaUT	R(0)	alphaDT	betaDT	PeventNotD	PeventD	Pevent	MTTR	Pevent*MTTR
F1	2262,6	0,666	0,98	0,99	0,673	0,059977	0,0188242	0,078801	1,3031127	0,102686954
F2	10766,2	0,432	0,993	1,33	0,571	0,059648	0,0065463	0,066195	2,1414209	0,141750721
F3	267783,7	1	1	1,11	0,681	0,000250	0	0,000250	1,4435264	0,000360402
F4	911,1	0,752	0,925	3,17	6,084	0,096765	0,0725916	0,169357	2,943129	0,498438432
F5	518,5	0,277	0,962	6,08	1,201	0,306195	0,0360893	0,342284	5,7179614	1,957168514
F6	1,00E+24	0,256	1	7,9	0,964	0,000000	0	0,000000	8,0293023	0
F7	405,5	0,256	1	7,9	0,964	0,343113	0	0,343113	8,0293023	2,754959197
									MTTR del sistema	5,455364221

MTBF del sistema = 66,2826

Disponibilidad del sistema = 0,924

Por lo tanto, hay un potencial de mejora en la disponibilidad de 0,924 - 0,113 eliminando el modo de fallo F6

Etapa 12:
 Repetir el paso 10 para cada modo de fallo, para identificar los fallos principales que afecten a la disponibilidad

Causa eliminada	Resultado de disponibilidad	Mejora de la disponibilidad
F6	0,924	0,113
F7	0,912	0,101
F5	0,900	0,089
F4	0,870	0,059
F1	0,839	0,028
F2	0,832	0,021
F3	0,811	0,000

5 Asociado a cada modo de fallo hay al menos un parámetro de distribución matemática del tiempo de actividad, y al menos un parámetro de distribución matemática del tiempo de inactividad. La disponibilidad del sistema puede volver a calcularse sobre la base de los cambios en el parámetro de distribución matemática del tiempo de actividad y/o del tiempo de inactividad.

10 Sin embargo, si se está considerando un sistema nuevo o un sistema que no ha sido utilizado previamente para el presente propósito, es posible que no se conozcan con certeza los parámetros de distribución matemática de tiempo de actividad y de tiempo de inactividad. En tal caso, pueden tomarse de uno o más de los sistemas conocidos, al menos un parámetro de distribución matemática del tiempo de actividad y/o al menos un parámetro de distribución matemática del tiempo de inactividad. Esta técnica puede ser muy útil, ya que determinados parámetros de distribución matemática de tiempo de actividad, o de tiempo de inactividad, pueden tomarse de un primer sistema, otros parámetros de distribución matemática de tiempo de actividad y/o de tiempo de inactividad tomados de un segundo sistema, etc. Esto permite que el modelo matemático concurrente para tiempo de actividad y/o para tiempo de inactividad, esté delimitado con más precisión, sobre la base de parámetros ya conocidos.

20 Una vez calculada la disponibilidad del sistema, se selecciona un modo de fallo como la causa del falso arranque, cada modo de fallo puede eliminarse uno a uno para determinar el efecto de eliminar dicho modo de fallo sobre la

disponibilidad del sistema. Entonces, opcionalmente, las nuevas disponibilidades del sistema pueden ordenarse por importancia sobre la base de la eliminación sucesiva de cada modo de fallo. Este orden de importancia permite que el experto en la técnica determine qué modo de fallo, si se elimina o mitiga, tendría el mayor efecto sobre la disponibilidad del sistema. Esto es útil para determinar cómo y dónde asignar recursos para mejoras de sistemas.

5 Por ejemplo, puede determinarse que eliminar/ reparar el modo de fallo 1 tendría el mayor impacto positivo sobre la disponibilidad del sistema. Sin embargo, el coste de eliminar/ reparar el modo de fallo 1 puede ser grande en comparación con el coste de eliminar/ reparar el modo de fallo 2, lo que proporciona casi el mismo impacto sobre la disponibilidad del sistema, y puede aplicarse más rápidamente y a un coste menor. Por lo tanto, una persona experta en la técnica puede utilizar estos datos, comparando el efecto sobre la disponibilidad y los costes/velocidad de aplicación, para decidir si/cómo asignar recursos dentro del sistema, y bajo qué programa. Esto proporciona el beneficio de aplicar de forma juiciosa aquellas mejoras de sistema que tengan el mayor impacto sobre el funcionamiento futuro del sistema.

10
15 Por supuesto, el método anterior, como se describe y reivindica en la presente memoria, puede incorporarse a un servidor, una red remota, un CD-ROM u otro medio legible por ordenador. Puede accederse al método descrito y reivindicado en la presente memoria de manera local o remota, dado que se transmite mediante una onda portadora.

20 Adicionalmente, el método descrito y reivindicado en la presente memoria se puede llevar a cabo por una única parte o por múltiples partes. Por ejemplo, una parte, tal como una planta, puede recoger los datos relacionados con los modos de fallo y/o observaciones de eventos. Otra parte, como un analista, puede llevar a cabo la determinación de las probabilidades descritas en la presente memoria.

REIVINDICACIONES

1. Un método para asignar recursos dentro de un sistema de producción que tenga componentes concurrentes o tanto concurrentes como no concurrentes, en donde una determinación de si, cómo y/o dónde asignar dichos recursos, se basa en una probabilidad calculada de un modo de fallo que se está observando durante la aparición de uno o más modos de fallo simultáneos en dicho sistema, caracterizado por que dicho método de cálculo comprende la etapa de calcular dicha probabilidad según la ecuación:

$$Pevent_i = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t) dt + Pevent0_i,$$

en donde Pevent_i es la probabilidad de que se observe un modo de fallo particular y es indicativo de la probabilidad de que un fallo de un componente detenga el sistema de producción;
 h_i(t) es una función de distribución matemática predefinida de la tasa instantánea de aparición de un modo de fallo i;
 R_{sys}(t) es una función de distribución matemática adicionalmente predefinida de la fiabilidad del sistema en el que pueden producirse dichos modos de fallo; y
 Pevent0_i es la probabilidad de que un modo de fallo se observe cuando dicho modo de fallo se produce simultáneamente con otros modos de fallo y es indicativa de la probabilidad de fallo de un componente que interrumpe el funcionamiento del sistema de producción en el arranque con un tiempo de actividad igual a cero; y
 i representa el modo de fallo particular.

2. Un método según la reivindicación 1 que utiliza un método de cálculo no combinatorio, en donde

$$\int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t) dt = 0,$$

calcular la probabilidad de aparición de cada modo de fallo dicho independientemente de otros dichos modos de fallo, según la ecuación:

$$Pevent0_i = \sum_{n=1}^N y_i^{(n)}$$

en donde y_i⁽ⁿ⁾ es la probabilidad de que se observe el modo de fallo de interés cuando dicho modo de fallo se produce simultáneamente con n - 1 otros modos de fallo; y
 en donde N es el número total de posibles modos de fallo;
 caracterizado por determinar la probabilidad de que se observe solo el modo de fallo i según la ecuación:

$$y_i^{(1)} = [(1-R_i(0))/R_i(0)] * \prod_{j=1}^N R_j(0)$$

en donde R_j(0) es la probabilidad de que no se produzca el modo de fallo j; y
 calcular la probabilidad de que se observe el modo de fallo i cuando dicho modo de fallo i se produce simultáneamente con al menos un otro modo de fallo, comparando dicho modo de fallo un falso arranque de un sistema de producción.

3. Un método según la reivindicación 2 en donde dicha etapa de calcular dicha probabilidad de que se observe el modo de fallo cuando el modo de fallo i se produce de forma simultánea con al menos uno de dicho otro modo de fallo viene dada por la ecuación:

$$y_i^{(n+1)} = [(1-R_i(0))/(R_i(0) * (n+1))] * \sum_{j=1}^N y_j^{(n)} - n * y_i^{(n)}$$

en donde n + 1 indica la adición de otro modo de fallo que se produce simultáneamente a consideración;
 y_i⁽ⁿ⁾ es la probabilidad de que se observe el modo de fallo de interés cuando se produce con n - 1 otros modos de fallo, cuando dicho modo de fallo se selecciona de forma aleatoria a partir de todos los dichos modos de fallo que se producen de forma simultánea; y
 n es el número de modos de fallo que se producen de forma simultánea en consideración.

4. Un método según la reivindicación 2 en donde dicha etapa de calcular dicha probabilidad de que se observe el modo de fallo cuando el modo de fallo i se produce de forma simultánea con al menos uno de dicho otro modo de fallo viene dada por la ecuación:

$$y_i^{(n+1)} = [(1-R_i(0))/(R_i(0))] * \sum_{j=i+1}^N y_j^{(n)}$$

en donde n + 1 indica la adición de otro modo de fallo que se produce simultáneamente a consideración; y $y_i^{(n)}$ es la probabilidad de que se observe el modo de fallo de interés cuando se produce con n - 1 otros modos de fallo y siempre se observe el modo de fallo k sobre el modo de fallo p para todos los $p > k$, en donde p y k son factores que designan la dominancia del modo de fallo k sobre el modo de fallo p.

5. Un método según la reivindicación 2, que comprende, además, la etapa de determinar la probabilidad de aparición simultánea de más de n modos de fallo según las ecuaciones:

$$\text{Residual}^{(0)} = 1 - \prod_{j=1}^N R_j(0)$$

$$\text{Residual}^{(n)} = \text{Residual}^{(n-1)} - \sum_{j=1}^N y_j^{(n)}$$

en donde $\text{Residual}^{(0)}$ es la probabilidad de que se produzca un modo de fallo, $\text{Residual}^{(n)}$ es la probabilidad de que se produzca cualquier modo de fallo cuando se producen más de n modos de fallo de forma simultánea, y dicho modo de fallo es uno de dichos modos de fallo que se producen de forma simultánea; $\text{Residual}^{(n-1)}$ es la probabilidad de que se produzca cualquier modo de fallo cuando más de n - 1 modos de fallo se producen de forma simultánea; y N es el número total de modos de fallo.

6. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones 2, 3, 4 y 5, dada una probabilidad de observar $\text{Pevent}0_i$, de calcular la probabilidad de que se haya producido un modo de fallo solo o con al menos otro modo de fallo ajustando de forma iterativa el valor de $R_i(0)$ hasta que dicha ecuación esté dentro de un umbral de error predeterminado utilizando las etapas de:

- (a) seleccionar un valor de $R_i(0)$;
 (b) determinar un valor de $\text{Pevent}0_i$ de la ecuación:

$$\text{Pevent}_{\text{determinado}}0_i = \sum_{n=1}^N y_i^{(n)};$$

- (c) si el valor determinado de $\text{Pevent}0_i$ está dentro de una tolerancia predeterminada a partir del valor conocido de $\text{Pevent}0_i$, entonces detener; y
 (d) converger el valor de $\text{Pevent}_{\text{determinado}}0_i - \text{Pevent}_{\text{actual}}0_i$ para todos los valores de $i = 1, 2, 3.. N$ hasta que se alcanza una tolerancia predeterminada, de este modo permitiendo al experto en la técnica tomar medidas en base a la probabilidad de observar dicho modo de fallo.

7. Un método según la reivindicación 1, en donde $\text{Pevent}0_i = 0$, y en donde dicho método comprende la etapa de determinar la probabilidad de que se observe un modo de fallo en el sistema tras un arranque del sistema, mediante el cálculo de dicha probabilidad según la ecuación:

$$\text{Pevent}_i = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{\text{sys}}(t) dt.$$

8. Un método según una cualquiera de las reivindicaciones 2, 3, 4 y 5 que comprende además la etapa de determinar la disponibilidad de dicho sistema que tiene tiempos de actividad y tiempos de inactividad alternantes, dicho método que comprende, además, las etapas de:

- (a) recolección de datos de modo de fallo para dichos tiempos de actividad y dichos tiempos de inactividad;
 (b) organizar dichos datos por modo de fallo;
 (c) seleccionar un modelo matemático concurrente para el tiempo de actividad y un modelo matemático para el tiempo de inactividad para cada modo de fallo;
 (d) realizar un cálculo para determinar la disponibilidad del sistema, comprendiendo dicho cálculo las etapas de:

- (i) calcular el tiempo medio entre fallos para el sistema según la ecuación:

$$MTBF_{sys} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t)dt$$

5 en donde $MTBF_{sys}$ es el tiempo medio entre fallos para todos los modos de fallo en el sistema;
y $R_{sys}(t)$ es la función de fiabilidad del sistema;

10 (ii) calcular para cada modo de fallo la probabilidad de que dicho modo de fallo haga que dicho sistema falle según la ecuación:

$$Pevent_i = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t)dt$$

15 en donde $Pevent_i$ es la probabilidad de que un modo de fallo particular haga que el sistema se detenga durante un tiempo de actividad del sistema;
 $h_i(t)$ es la tasa instantánea de fallo del modo de fallo i ; y
 $R_{sys}(t)$ es la función de fiabilidad del sistema, estando basada la función de fiabilidad en dicho modelo matemático para tiempo de actividad;

20 (iii) calcular el tiempo medio hasta reparación para el sistema según la ecuación:

$$MTTR_{sys} = \sum(Pevent_i * MTTR_i)$$

25 en donde $MTTR_{sys}$ es el tiempo medio hasta reparación del sistema en el momento de producirse un modo de fallo, y $MTTR_i$ es el tiempo medio hasta reparación del modo de fallo i cuando se produce dicho modo de fallo; y

(iv) calcular la disponibilidad del sistema según la ecuación:

$$Disponibilidad = MTBF_{sys} / (MTBF_{sys} + MTTR_{sys}).$$

30 9. Un medio legible por ordenador que comprende partes de código informático que, cuando se ejecutan por un ordenador, se disponen a llevar a cabo un método para calcular la probabilidad de que se observe un modo de fallo durante la aparición de uno o más modos de fallo simultáneos en el sistema, que se caracteriza porque dicho método comprende la etapa de cálculo de dicha probabilidad, según la ecuación:

$$Pevent_i = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t)dt + Pevent0_i,$$

40 en donde $Pevent_i$ es la probabilidad de que se observe un modo de fallo particular y es indicativo de la probabilidad de que un fallo de un componente detenga el sistema de producción;
 $h_i(t)$ es una función de distribución matemática predefinida de la tasa instantánea de aparición de un modo de fallo i ;
 $R_{sys}(t)$ es una función de distribución matemática adicionalmente predefinida de la fiabilidad del sistema en el que pueden producirse dichos modos de fallo; y
45 $Pevent0_i$ es la probabilidad de que uno o más modos de fallo se observen de forma simultánea cuando dicho modo de fallo se produce simultáneamente con otros modos de fallo y es indicativa de la probabilidad de fallo de un componente que interrumpa el funcionamiento del sistema de producción en el arranque con un tiempo de actividad igual a cero;
e i representa el modo de fallo particular.

50 10. Un programa informático comprende partes de código informático que, cuando se ejecutan por un ordenador, se disponen a determinar la probabilidad de que se observe un modo de fallo durante la aparición de uno o más modos de fallo simultáneos en el sistema, que se caracteriza porque dicha probabilidad se determina según la ecuación:

$$Pevent_i = \int_0^{\infty} h_i(t) * R_{sys}(t)dt + Pevent0_i,$$

55 en donde $Pevent_i$ es la probabilidad de que se observe un modo de fallo particular, y es indicativo de la probabilidad de que un fallo de un componente detenga el sistema de producción;
 $h_i(t)$ es una función de distribución matemática predefinida de la tasa instantánea de aparición de un modo de fallo i ; y

60

5

$R_{sys}(t)$ es una función de distribución matemática adicionalmente predefinida de la fiabilidad del sistema, en el que pueden producirse dichos modos de fallo; y P_{event0_i} es la probabilidad de que uno o más modos de fallo se observen de forma simultánea cuando dicho modo de fallo se produce simultáneamente con otros modos de fallo y es indicativa de la probabilidad de fallo de un componente que interrumpa el funcionamiento del sistema de producción en el arranque con un tiempo de actividad igual a cero; e i representa el modo de fallo particular.