

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 886 969**

51 Int. Cl.:

G01M 13/00

(2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.09.2017 PCT/DK2017/050316**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.04.2018 WO18072794**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.09.2017 E 17779997 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.08.2021 EP 3526574**

54 Título: **Método para someter a prueba la fiabilidad de un componente accionado**

30 Prioridad:

17.10.2016 DK PA201670815

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

21.12.2021

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)
Hedeager 42
8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

CORREIA, ANTONIO

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 886 969 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método para someter a prueba la fiabilidad de un componente accionado

5 Campo técnico

La invención se refiere a un método para someter a prueba la fiabilidad de productos, particularmente mediante el uso de planificación y evaluación de pruebas físicas de muestras de componente como componentes de turbina eólica para evaluar la fiabilidad a un nivel de confianza deseado con un uso minimizado de recursos de pruebas.

10 Antecedentes

Debido a que el mundo ha buscado fuentes de energía alternativas para reemplazar la dependencia excesiva de los combustibles fósiles, una solución ha sido el uso de turbinas eólicas para generar energía eléctrica. Más específicamente, estas turbinas eólicas son normalmente grandes, generadores de turbina eólica de eje horizontal (HAWT) a escala de servicios, que a menudo incluyen una pluralidad de palas de rotor montadas en una estructura de soporte, normalmente en forma de torre tubular alta. Un problema con el uso de HAWT para la generación de potencia es mantener las turbinas para evitar interrupciones de energía debido al fallo de los componentes en las turbinas, ya que la red eléctrica requiere un suministro constante de energía desde sus fuentes. La mayoría de las HAWT están ubicadas en parques eólicos con múltiples turbinas, estando situados a menudo estos parques eólicos en áreas remotas, tales como instalaciones de equipos en alta mar, para aprovechar los patrones meteorológicos prevalentes en el área. En estas áreas remotas y/o en alta mar, las turbinas eólicas a menudo están expuestas a condiciones ambientales extremas, que incluyen, pero no se limitan a: temperaturas extremas, lluvia, nieve, residuos arrastrados por el viento, y mar agitado.

Hay al menos dos problemas asociados con la colocación de los parques eólicos en estas ubicaciones remotas. Un primer problema son las condiciones ambientales extremas mencionadas anteriormente, que pueden provocar un fallo prematuro de componentes en las HAWT. Un segundo problema es que la inspección y el mantenimiento de las HAWT es difícil y, a menudo, costoso de completar. Por tanto, los expertos en la técnica están constantemente tratando de encontrar maneras de minimizar la cantidad y frecuencia de inspecciones y mantenimiento *in situ* mientras un número máximo de turbinas eólicas se mantienen operativas en todo momento con el fin de proporcionar potencia consistente a la red eléctrica.

En las HAWT, los componentes de generación, incluyendo el generador, la caja de engranajes, el tren de accionamiento y el conjunto de freno, están ubicados en la parte superior de la torre en una góndola detrás del buje de las palas de rotor. Como tal, el acceso a estos componentes de generación para mantenimiento y/o reemplazo se vuelve más complejo por la alta altura de la torre. Combinando la dificultad de acceder a ubicaciones remotas y/o en alta mar de HAWT en algunos parques eólicos con las complejidades de realizar acciones de mantenimiento o reemplazo en la parte superior de una torre de turbina eólica alta, se vuelve meridianamente claro por qué el mantenimiento no programado y el tiempo de inactividad para fallos de componentes es una de las mayores preocupaciones de diseño a las que se enfrentan las empresas que hacen funcionar las HAWT para la generación de potencia. Con respecto a esto, es altamente deseable en este campo minimizar el mantenimiento no programado.

Un método mediante el cual se maneja esta preocupación de diseño de mantenimiento y conservación de componentes incluye pruebas y monitorización sofisticadas en procesamiento de componentes durante el funcionamiento, tal como se describe en la patente estadounidense n.º 9.103.323, que es propiedad del beneficiario original de la presente solicitud. Sin embargo, tales pruebas en procesamiento pueden requerir que se asuman costes adicionales por el operador de las turbinas eólicas, lo que corta la rentabilidad del resultado final cuando se hacen funcionar las HAWT. Otro método para abordar la preocupación de diseño del mantenimiento y conservación de componentes incluye anticipar de manera fiable cuándo se requerirá mantenimiento en una HAWT, de manera que puedan programarse acciones de mantenimiento cuando sea más conveniente y cuando cualquier alteración con respecto a la fuente de alimentación tenga un impacto mínimo. Para hacer esto, es necesario llevar a cabo pruebas de fiabilidad de producto y vida útil de los componentes antes de que esos componentes se produzcan en masa e instalen en una pluralidad de HAWT. De hecho, este es el enfoque adoptado por la mayoría de los operadores de HAWT, ya que las pruebas de fiabilidad iniciales pueden proporcionar un cierto nivel de confianza aceptable de que cualquier fallo prematuro de los componentes estará fuera de la norma, especialmente cuando se considera en masa a través de una pluralidad de instalaciones que usan los componentes.

En métodos convencionales para tales pruebas de fiabilidad de producto, un determinado número de muestras de componente para cada producto debe someterse a prueba físicamente accionando esos componentes en un banco de pruebas para someter los componentes a cargas y tensiones esperadas en la instalación en el mundo real de estas partes. Un tipo de estas pruebas ejecuta muestras de componente hasta que se produce un fallo para determinar los niveles de confianza de alcanzar una determinada vida útil deseada, mientras que otro tipo de las pruebas, denominado "pruebas de ejecución de éxito", incluye ejecutar un determinado número de muestras de componente al mismo valor de duración de prueba para determinar los niveles de fiabilidad y confianza de alcanzar una determinada vida útil deseada. En todos los tipos de pruebas de fiabilidad, el número específico de muestras de componente (o la

duración específica de la prueba total) generalmente se acciona mediante un análisis basado en estadísticas de un nivel de confianza deseado predeterminado que un cliente u operador desea (por ejemplo, un nivel de confianza del 90 % de que un componente, en condiciones operativas esperadas, se conservará con una fiabilidad del 99 % a través de una vida útil establecida antes de que se requiera mantenimiento o reemplazo). En términos generales, cuanto mayor sea la fiabilidad y el nivel de confianza, más muestras de componente (o mayor duración global de la prueba) serán necesarias durante el proceso de pruebas física.

Por tanto, dependiendo de las demandas de fiabilidad y confianza de los clientes de estos fabricantes de componentes de turbina eólica, un número significativo (por ejemplo, 10 o más) de muestras de componente pueden necesitar someterse a prueba físicamente para proporcionar los resultados de prueba de fiabilidad deseados. Dicho de otra manera, puede requerirse una duración de prueba larga significativa si va a someterse a prueba físicamente un número pequeño establecido de muestras de componentes para alcanzar los resultados de fiabilidad deseados. Se requiere un gasto significativo de costes y/o tiempo para proporcionar los resultados de prueba usando los métodos convencionales, particularmente cuando el cliente pide componentes en lotes relativamente pequeños en lugar de a granel. No obstante, o bien el fabricante o bien el consumidor final continúa pagando el coste adicional por tener estas pruebas físicas extensas en vista de la naturaleza crítica en este campo de garantizar la fiabilidad para una vida útil establecida y evitar el mantenimiento no programado tanto como sea posible.

Por consiguiente, sería deseable proporcionar un método para someter a prueba la fiabilidad de componentes de turbina eólica usados en HAWT, en particular, reduciendo el coste y el tiempo asociados con las pruebas físicas de muestras de componente, acelerando dese modo el plazo para comenzar la producción completa de un producto de componente accionado y ponerlo en el mercado.

Sumario

Según la invención, se proporciona un método tal como se define en las reivindicaciones adjuntas para someter a prueba la fiabilidad de una pluralidad de componentes accionados. Cada uno de los componentes accionados define un factor de aceleración para las pruebas de fiabilidad. Se proporciona al menos una muestra de prueba para cada uno de los componentes accionados. Las muestras de prueba se dividen en un primer subconjunto y un segundo subconjunto. El método incluye realizar, con un banco de pruebas y una unidad de accionamiento acoplada a un procesador, pruebas de ejecución de éxito físicas del primer subconjunto de las muestras de prueba, accionándose cada una de las muestras de prueba en el primer subconjunto durante una duración de prueba correspondiente. A continuación, el procesador calcula un primer nivel de confianza logrado en cuanto a la fiabilidad de los componentes accionados basándose en las pruebas de ejecución de éxito físicas del primer subconjunto. Además, el procesador calcula una duración de prueba mínima para uno del segundo subconjunto de muestras de prueba que se requerirá para confirmar la fiabilidad de los componentes accionados a un nivel de confianza objetivo predeterminado, que se basa en el factor de aceleración y el primer nivel de confianza que se ha logrado. El método incluye además realizar con el banco de pruebas y la unidad de accionamiento pruebas de ejecución de éxito físicas del segundo subconjunto de muestras de prueba, accionándose uno del segundo subconjunto de muestras de prueba durante la duración de prueba mínima que se calculó. El método también incluye informar, mediante un dispositivo de salida, del nivel de confianza acumulativo logrado en cuanto a la fiabilidad de los componentes accionados basándose en la realización exitosa de las pruebas de ejecución de éxito físicas.

En un aspecto, el método también incluye calcular con el procesador una duración de prueba para uno del primer subconjunto de muestras de prueba basándose en el factor de aceleración correspondiente. Durante las pruebas de ejecución de éxito físicas del primer subconjunto de muestras de prueba, cada muestra de prueba en el primer subconjunto se hace funcionar por la unidad de accionamiento durante la misma duración de prueba. Del mismo modo, durante las pruebas de ejecución de éxito físicas del segundo subconjunto de muestras de prueba, cada muestra de prueba en el segundo subconjunto se hace funcionar durante la misma duración de prueba mínima que se ha calculado. Según la invención, la pluralidad de componentes accionados incluye una pluralidad de diferentes productos sometidos a prueba en paralelo en el banco de pruebas. Por tanto, el primer subconjunto de muestras de prueba incluye uno de cada uno de la pluralidad de diferentes productos sometidos a prueba en paralelo, y el segundo subconjunto de muestras de prueba también incluye uno de cada uno de la pluralidad de diferentes productos sometidos a prueba en paralelo. En una realización particular, estos productos diferentes podrían incluir una caja de engranajes y un cojinete principal en un tren de accionamiento de turbina eólica.

En otro aspecto que puede combinarse con cualquier otra característica descrita en el presente documento, la pluralidad de componentes accionados incluye una pluralidad de variantes de componentes definidas por cualquier producto similar con variaciones entre productos que no hacen que las variantes se comporten de manera diferente en las pruebas de ejecución de éxito, o productos equivalentes sometidos a diferentes cargas en uso real. En un aspecto adicional de tales realizaciones, el segundo subconjunto de muestras de prueba incluye todas las muestras de prueba para una variante de componente seleccionada, mientras que el primer subconjunto de muestras de prueba incluye todas las muestras de prueba no asociadas con la variante de componente seleccionada. El método también incluye realizar con el procesador pruebas de ejecución de éxito virtuales de una pluralidad adicional de muestras de prueba imaginarias de la pluralidad de variantes de componentes. Estas muestras de prueba se consideran "imaginarias" solo en el sentido de que no necesitan ser muestras de componente físicas para someterse a prueba en

el banco de pruebas. Para cada muestra de prueba sometida a prueba físicamente en los subconjuntos primero y segundo, una muestra de prueba imaginaria para todas las demás variantes de componentes se somete a prueba virtualmente durante una misma duración de prueba, proporcionando de ese modo resultados de nivel de confianza y fiabilidad para todas las variantes de componentes durante la misma duración de prueba. En tales realizaciones, informar del nivel de confianza acumulativo logrado para la pluralidad de componentes accionados se basa en la realización exitosa de pruebas de ejecución de éxito físicas y virtuales. La realización de las pruebas de ejecución de éxito físicas para el segundo subconjunto de muestras de prueba durante la duración de prueba mínima evita el uso innecesario excesivo del banco de pruebas.

En otro aspecto que puede combinarse con cualquier otra característica descrita en el presente documento, las etapas específicas para calcular la duración de prueba para una seleccionada de las muestras de prueba pueden incluir lo siguiente. El cálculo de duración de prueba comienza con el procesador aplicando una ecuación de Lipson para calcular una duración de prueba modificada en condiciones normales para el componente accionado asociado con la muestra de prueba seleccionada. A continuación, el procesador calcula una duración de prueba modificada en condiciones de banco de pruebas aceleradas para el componente accionado asociado con la muestra de prueba seleccionada basándose en el factor de aceleración correspondiente y la al menos una duración de prueba modificada en condiciones normales para el componente accionado correspondiente.

En otro aspecto más de la invención y que puede combinarse con cualquier otra característica descrita en el presente documento, la realización de las pruebas de ejecución de éxito físicas para una primera muestra de prueba seleccionada incluye una serie de etapas. Con este fin, la prueba física incluye montar la primera muestra de prueba en el banco de pruebas, y hacer funcionar la unidad de accionamiento para aplicar cargas aceleradas a la primera muestra de prueba en el banco de pruebas durante la duración de prueba asociada con esa primera muestra de prueba.

En otro aspecto que puede combinarse con cualquier otra característica descrita en el presente documento, calcular el nivel de confianza logrado en cuanto a la fiabilidad a continuación de una prueba exitosa de una muestra de prueba seleccionada incluye además una serie de etapas de cálculo. Con respecto a esto, el cálculo del nivel de confianza comienza con la aplicación de una ecuación de Lipson para calcular un número total de muestras de prueba que necesitarían someterse a prueba durante una duración de prueba original igual al tiempo de ejecución deseado en uso para el que está sometiéndose a prueba la fiabilidad. A continuación, el procesador aplica una ecuación de ejecución de éxito que usa el número total de muestras para calcular un nivel de confianza individual no acumulativo logrado mediante la prueba exitosa de la muestra de prueba seleccionada. A continuación, el procesador pasa a valores variables acumulativos aplicando una función de suma para calcular un número total acumulativo de muestras que necesitarían someterse a prueba durante la duración de prueba original para todas las muestras de prueba del componente accionado sometido a prueba hasta el momento, seguido de la aplicación de la ecuación de ejecución de éxito que usa este número total acumulativo de muestras para calcular el nivel de confianza acumulativo alcanzado al final de las pruebas exitosas de la muestra de prueba seleccionada en combinación con todas las demás muestras de prueba del componente accionado sometido a prueba hasta el momento.

Varias de otras variaciones son posibles en otros aspectos de este método de pruebas. En un ejemplo, la pluralidad de componentes accionados está definida por elementos de tren de potencia que van a usarse en uno o más generadores de turbina eólica. Más específicamente, los elementos de tren de potencia incluyen uno o más de un cojinete principal, un generador y una caja de engranajes.

Breve descripción de los dibujos

Diversas características y ventajas adicionales de la invención serán más evidentes para los expertos en la técnica tras la revisión de la siguiente descripción detallada de una o más realizaciones ilustrativas tomadas junto con los dibujos adjuntos. Los dibujos adjuntos, que se incorporan en y constituyen una parte de esta memoria descriptiva, ilustran una o más realizaciones de la invención y, junto con la descripción general dada anteriormente y la descripción detallada dada a continuación, sirven para explicar una o más realizaciones de la invención.

La figura 1 es una vista lateral en alzado esquemática de un generador de turbina eólica de eje horizontal (HAWT), que incluye componentes de tren de potencia sometidos a los métodos de pruebas de fiabilidad de esta invención, en una realización.

La figura 2 es un diagrama esquemático que ilustra componentes de un sistema de pruebas de fiabilidad según una realización.

La figura 3 es un diagrama esquemático del banco de pruebas usado para pruebas de fiabilidad físicas en el sistema de pruebas de fiabilidad de la figura 2.

La figura 4 es una representación gráfica que muestra resultados de prueba de nivel de confianza para pruebas físicas de dos muestras de componente según una primera variante de producto, estando determinado el gráfico por ecuaciones de pruebas de éxito bien establecidas.

La figura 5 es una representación gráfica similar a la figura 4, pero que muestra resultados de prueba de nivel de confianza para pruebas físicas de dos muestras de componente según una segunda variante de producto, comportándose esta segunda variante de producto de manera similar en pruebas físicas en un banco de pruebas con respecto a la primera variante de producto.

La figura 6 es una representación gráfica similar a las figuras 4 y 5, pero que muestra la aplicación del método de pruebas de fiabilidad de la invención descrito en esta solicitud, que aplica específicamente pruebas físicas en un banco de pruebas y pruebas virtuales de muestras de componente para lograr resultados de fiabilidad de las variantes de producto primera y segunda, siendo las pruebas físicas y virtuales simultáneas en un aspecto.

La figura 7 es una vista esquemática del software de cálculo que funciona en un procesador incluido en el sistema de pruebas de fiabilidad según una realización de la invención, incluyendo el software de cálculo fórmulas de entrada que se aplican durante pruebas secuenciales de muestras de componente.

La figura 8 es una vista esquemática similar a la figura 7 del software de cálculo que funciona en el procesador, con valores de salida a modo de ejemplo reales de las fórmulas que se muestran con fines ilustrativos.

La figura 9 es una representación gráfica similar a las figuras 4 y 5, pero que muestra resultados de prueba de nivel de confianza para pruebas físicas de cuatro muestras de componente sometidas a prueba de manera secuencial en lugar de simultáneamente, consistente con los cálculos mostrados en las figuras 7 y 8.

La figura 10 es una vista esquemática de una representación gráfica de cálculo similar a la mostrada en las figuras 7 y 8, pero aplicada en el método de pruebas de fiabilidad de otra realización de la invención descrita en esta solicitud, implicando este método algunas pruebas de muestras físicas, así como algunas pruebas virtuales.

La figura 11 es una representación gráfica similar a la figura 6, pero que muestra resultados de prueba de nivel de confianza para pruebas físicas y virtuales realizadas en cuatro variantes de producto según el método de pruebas de fiabilidad de la realización mostrada en la figura 10.

La figura 12 es un diagrama de flujo que ilustra una serie de etapas ejecutadas por componentes de un sistema de pruebas de fiabilidad cuando se realiza una realización del método de pruebas de fiabilidad de la invención.

La figura 13 es un diagrama de flujo que ilustra una serie de etapas ejecutadas por un procesador del sistema de pruebas de fiabilidad cuando se calculan valores de tiempo de duración de prueba para todas las muestras de prueba, que es una etapa del método de pruebas de fiabilidad que se muestra en la figura 12.

La figura 14 es un diagrama de flujo que ilustra una serie de etapas ejecutadas por un procesador del sistema de pruebas de fiabilidad cuando se calculan niveles de confianza individuales y acumulativos alcanzados para una muestra de prueba de una variante de producto, que es una etapa del método de pruebas de fiabilidad que se muestra en la figura 12.

La figura 15 es una representación gráfica que muestra resultados de prueba de nivel de confianza a lo largo del tiempo para una prueba combinada secuencial y simultánea de muestras de prueba para dos variantes de producto diferentes, en otra realización de los métodos de pruebas de fiabilidad de esta invención.

La figura 16 es una representación gráfica de resultados de prueba de nivel de confianza a lo largo del tiempo similar a la figura 6, que muestra una realización del método de pruebas de fiabilidad de la invención descrito en esta solicitud, y en el que el factor de similitud aplicado al convertir resultados de banco de pruebas físicas en resultados de pruebas virtuales es de aproximadamente el 100 % entre las dos variantes mostradas.

La figura 17 es una representación gráfica de resultados de prueba de nivel de confianza a lo largo del tiempo similar a la figura 16, pero en el que el factor de similitud aplicado al convertir resultados de banco de pruebas físicas en resultados de pruebas virtuales es de aproximadamente el 30 % entre las dos variantes mostradas.

La figura 18 es una representación gráfica de resultados de prueba de nivel de confianza a lo largo del tiempo similar a las figuras 16 y 17, pero en el que el factor de similitud aplicado al convertir resultados de banco de pruebas físicas en resultados de pruebas virtuales es aproximadamente el 0 % entre las dos variantes mostradas.

La figura 19 es una representación gráfica de resultados de prueba de nivel de confianza a lo largo del tiempo para otra realización del método de pruebas de fiabilidad de esta invención, ahorrando esta realización costes al reducir el tiempo total de duración de prueba física de una tercera variante de producto basándose en la aplicación de pruebas virtuales de variantes anteriores.

La figura 20 es una representación gráfica de cálculo a modo de ejemplo que muestra un procedimiento generalizado para calcular un ahorro de costes logrado aplicando el método de pruebas de fiabilidad de esta invención en

comparación con las pruebas de fiabilidad totalmente físicas convencionales, usando los resultados de la figura 19 como ejemplo.

La figura 21 es una representación gráfica similar a la figura 19, pero para otra realización en la que la reducción total del tiempo de prueba física define un ahorro de costes aún mayor.

La figura 22 es una representación gráfica de resultados de prueba de nivel de confianza a lo largo del tiempo para otra realización de esta invención, incluyendo esta realización pruebas de diferentes productos en paralelo, que se beneficia de la planificación y evaluación de pruebas físicas usando el método de pruebas de fiabilidad de esta invención.

La figura 23 es un diagrama de flujo que ilustra una serie de etapas ejecutadas por componentes de un sistema de pruebas de fiabilidad cuando se realiza otra realización del método de prueba de fiabilidad de la invención, específicamente para someter a prueba diferentes productos en paralelo como en la figura 22.

Descripción detallada

La invención descrita en las realizaciones a continuación incluye un método de pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito para demostrar la fiabilidad de componentes accionados (para funcionar a una duración de tiempo o vida útil deseada, o algún otro parámetro operativo) a un nivel de confianza deseado. Más específicamente, el método de pruebas de fiabilidad descrito a continuación incorpora tanto pruebas físicas tradicionales de muestras de componente, así como pruebas virtuales de muestras de componente, al menos cuando productos que están sometidos a prueba se consideran iguales o similares, para llegar al resultado de fiabilidad requerido por un cliente. Las pruebas de ejecución de éxito virtuales ayudan a demostrar la fiabilidad de un producto asumiendo un comportamiento de prueba igual o similar a las muestras de componente que realmente se someten a prueba físicamente, por ejemplo, los resultados de prueba física se aplican de una manera a los componentes que van a "someterse a prueba virtualmente". La combinación de las pruebas físicas, que se produce en una disposición de banco de pruebas, y las pruebas virtuales, que no requieren la disposición de banco de pruebas, permite una reducción general de la duración de prueba y/o las muestras de componente (por ejemplo, los costes totales) necesarios para producir el resultado de fiabilidad deseado a un nivel de confianza establecido. Por tanto, el ahorro de coste y tiempo puede reducir el tiempo global necesario para poner un producto de componente accionado en plena producción y en el mercado, en vista de las mejoras en eficiencia en la fase de pruebas de fiabilidad de proyectos. En otras realizaciones modificadas donde se someten a prueba diferentes componentes accionados en paralelo en un banco de pruebas, el proceso de cálculo usado con las pruebas virtuales sigue siendo útil para planificar y evaluar eficientemente los resultados de prueba física de los diferentes productos.

En algunas realizaciones, el número total de muestras de componente que requieren pruebas físicas puede reducirse ventajosamente en un 50 % cuando se usan pruebas físicas y virtuales en combinación según algunas de las realizaciones de esta invención. En otras palabras, mientras que una totalidad de una pluralidad de muestras de prueba requeriría pruebas físicas en métodos convencionales, la invención descrita en esta solicitud permite pruebas físicas de un primer subconjunto de muestras de prueba y pruebas virtuales de un segundo subconjunto de muestras de prueba. En otras realizaciones, puede reducirse la duración de tiempo total de las pruebas físicas, tal como basándose en la aplicación de pruebas virtuales para planificar y evaluar los resultados de pruebas físicas en un número establecido de muestras de prueba. Al igual que con el primer conjunto de realizaciones, los costes totales para pruebas físicas pueden reducirse como resultado de la reducción en la duración de prueba, independientemente de si el número de muestras de prueba se reduce realmente. Como tal, mayores eficiencias en la producción de componentes accionados en campos tales como trenes de potencia de turbina eólica se habilitan mediante el uso del método de pruebas de fiabilidad descrito en el presente documento, ayudando de ese modo a aliviar las cargas asociadas con las pruebas de fiabilidad que se demandan en este campo para minimizar el tiempo de inactividad no programado.

Aunque los componentes de turbina eólica se proporcionan como ejemplos en las realizaciones a lo largo de esta solicitud, se entenderá que el componente accionado sometido a pruebas de fiabilidad según el método de esta invención podría ser cualquier tipo de componente accionado mecánico, sin apartarse del alcance de esta divulgación. Con este fin, los generadores de turbina eólica y los componentes de tren de potencia asociados son solo un campo en el que las pruebas de ejecución de éxito virtuales y mecánicas pueden ser ventajosas. Del mismo modo, los métodos en el presente documento para determinar el nivel de confianza pueden aplicarse a otros parámetros operativos más allá de los ejemplos de duración de tiempo y fiabilidad en los ejemplos proporcionados en el presente documento, sin apartarse del alcance de esta divulgación.

Antes de explicar detalles del método de pruebas de fiabilidad, los tipos de componentes que se someten de manera beneficiosa a dicho método se describen en relación con la figura 1. Con este fin, la figura 1 muestra una vista esquemática de una turbina eólica a modo de ejemplo 10 del tipo de turbina eólica de eje horizontal (HAWT), que incluye una góndola 12 montada en la parte superior de una torre 14, estando montada la torre 14 sobre una cimentación o base. La góndola 12 incluye un buje 16 en su extremo frontal que porta una pluralidad de palas de rotor 18. En esta realización se muestran tres palas de rotor 18, como es común con los generadores a gran escala de

servicios, sin embargo, los expertos en la técnica apreciarán que otros números de palas de rotor 18 también pueden ser adecuados. Además, también se prevén otras construcciones de torre, por ejemplo, una torre 14 definida por un armazón de celosía estructural.

Aunque muchos de los componentes individuales no se muestran en las figuras por claridad, la góndola 12 mostrada en la figura 1 contiene un conjunto de generador 20 (que incluye una caja de engranajes 22 y un generador 24), un árbol de accionamiento de baja velocidad 26, y un árbol de salida de alta velocidad 28 (todos los cuales se muestran usando líneas discontinuas). La góndola 12 también encierra normalmente un cojinete de buje principal 30 (mostrado en líneas imaginarias) ubicado adyacente al árbol de accionamiento de baja velocidad 26 y que soporta las diversas cargas aplicadas durante la rotación del buje 16 en la estructura restante de la góndola 12 y la HAWT 10. El conjunto de generador 20 permite que se recupere energía de las palas de rotor 18, y se accione por el buje 16 a través del árbol de accionamiento de baja velocidad 26. El conjunto de generador 20 es típico de una HAWT 10, aumentando la caja de engranajes 22 la velocidad de rotación del árbol de accionamiento de baja velocidad 26 con respecto al árbol de salida de alta velocidad 28 que acciona en última instancia el generador 24. El generador 24 emite corriente alterna (CA) a una tensión y frecuencia que está determinada en gran medida por la velocidad de rotación del buje 16, a medida que se acciona por las palas de rotor 18. Se entenderá que la salida de CA del generador 24 puede convertirse por un sistema de potencia conocido (no mostrado) asociado con la HAWT en potencia de corriente continua (CC) y posiblemente de nuevo a potencia de CA antes de entregarse a un sistema de red de potencia nacional a través de una línea de suministro. Por tanto, la HAWT 10 está configurada para transferir energía eólica a la salida de potencia de CA o CC, según una operación normal.

Habiendo descrito la estructura general de la turbina eólica 10, la descripción se referirá ahora al sistema de pruebas de fiabilidad 40 usado para realizar los métodos descritos con más detalle a continuación. Con referencia específica a la ilustración esquemática de "caja negra" de la figura 2, el sistema de prueba 40 según una realización incluye un banco de pruebas 42 configurado para realizar pruebas físicas de muestras de componente de turbina eólica, más normalmente componentes de tren de potencia como la caja de engranajes 22, el generador o el cojinete de buje principal 30. El banco de pruebas 42 se describe adicionalmente con referencia a la figura 3 a continuación. El sistema de prueba 40 también incluye un procesador informático 44 acoplado operativamente al banco de pruebas 42 para recibir datos de sensores en el mismo, por ejemplo. El procesador 44 está conectado con una memoria 46 que es capaz de almacenar los algoritmos y cálculos necesarios para que el procesador 44 implemente los mismos al realizar pruebas virtuales basándose en las pruebas físicas en el banco de pruebas 42. Con respecto a esto, el procesador 44 es un dispositivo informático conocido capaz de ejecutar funciones y software según los métodos que se describen a continuación.

El procesador 44 también se conecta operativamente con un dispositivo de salida 48 tal como un panel de visualización u otro dispositivo de audio/visual que es capaz de proporcionar resultados de prueba de fiabilidad en formatos gráficos u otros a los usuarios del método de pruebas de fiabilidad. Esos resultados pueden compartirse con clientes que tienen la intención de comprar componentes similares o equivalentes a los que se someten a prueba para la fiabilidad. El sistema de pruebas de fiabilidad 40 puede incluir elementos adicionales en otras realizaciones sin apartarse del alcance de esta divulgación.

Ahora con referencia a la figura 3, el banco de pruebas 42 se muestra con más detalle. El banco de pruebas 42 incluye una ubicación para montar una muestra de componente 50 (etiquetada como "producto en prueba" en la figura 3), tal como una caja de engranajes 22, un generador 24 o cojinete de buje principal 30, y una unidad de accionamiento 52. La unidad de accionamiento 52 está controlada por software o un procesador incluido internamente en el banco de pruebas 42 en sí mismo, o a partir de señales de control comunicadas mediante el procesador 44 mencionado anteriormente del sistema de prueba 40 en otras realizaciones. Independientemente de cómo la unidad de accionamiento 52 recibe señales de accionamiento, la unidad de accionamiento 52 está configurada para hacer funcionar la muestra de componente 50 durante un período de tiempo de duración de prueba predeterminado para evaluar si esa muestra de componente 50 fallará (por ejemplo, prueba de tipo de ejecución de éxito). La unidad de accionamiento 52 es capaz de aplicar diferentes cargas (por ejemplo, cargas aceleradas) a la muestra de componente 50 para simular las condiciones ambientales y operativas del mundo real que probablemente se encontrarán con los componentes similares o equivalentes que se venden a clientes. Un experto habitual en la técnica en pruebas de fiabilidad comprenderá la funcionalidad y el funcionamiento del banco de pruebas 42 y la unidad de accionamiento 52, ya que estos son equipos convencionales usados actualmente en métodos de pruebas de fiabilidad físicas.

Los métodos de pruebas de fiabilidad usados por el beneficiario original de la invención descritos en el presente documento se basan en pruebas de ejecución de éxito, que se describió inicialmente en términos generales anteriormente. La teoría de ejecución de éxito para las pruebas de fiabilidad se rige por una ecuación primaria tal como a continuación:

$$\text{Ecuación de ejecución de éxito : } C = 1 - R(t)^N \Leftrightarrow N = \frac{\ln(1-C)}{\ln(R)}$$

$R(t)$ = fiabilidad, dependiente del tiempo

C = nivel de confianza

N = muestras de prueba

Por tanto, la fiabilidad, el nivel de confianza y el número de muestras de componente son dependientes entre sí cuando se realizan pruebas de ejecución de éxito. En circunstancias de pruebas típicas, se proporcionan los objetivos deseados para el nivel de confianza y la fiabilidad, tal como por un cliente en la configuración de turbina eólica. A partir de estos números, la ecuación de ejecución de éxito primaria anotada anteriormente puede usarse para calcular cuántas muestras de componente son necesarias. A continuación, se proporciona un ejemplo en aras de la claridad, con un nivel de confianza deseado del 50 % y una fiabilidad deseada del 90 % durante 10 horas de funcionamiento:

$$\text{Datos } \begin{cases} R(10 \text{ horas}) = 90 \% \\ C = 50 \% \end{cases}$$

$$C = 1 - R(t)^N \Leftrightarrow N = \frac{\ln(1-C)}{\ln(R)} = \frac{\ln(1-0,5)}{\ln(0,9)} \cong 7 \text{ muestras de prueba}$$

En lugar de establecer una determinada duración de prueba y calcular cuántas muestras de componente necesitan someterse a prueba a esa duración de prueba para alcanzar los niveles de confianza y fiabilidad deseados, por ejemplo, 7 muestras de componente en el cálculo de ejemplo anterior, puede desearse someter a prueba solo un número establecido de muestras de componente durante un período de tiempo más largo. Por ejemplo, el beneficiario original de esta solicitud normalmente prefiere ejecutar pruebas en hasta 2 muestras o muestras de componente. Por consiguiente, según las teorías bien entendidas que rigen las pruebas de ejecución de éxito, puede determinarse una duración de prueba necesaria para cada una de las muestras de componente usando la siguiente fórmula (se asume que el nivel de confianza C es el mismo para ambos casos y la distribución de Weibull se aplica con los parámetros b y T para modelar el fallo esperado de muestras de componente):

$$\begin{cases} C = 1 - R(t_s)^{N_s} \\ C = 1 - R(t_n)^{N_n} \end{cases} \Leftrightarrow 1 - R(t_s)^{N_s} = 1 - R(t_n)^{N_n} \Leftrightarrow R(t_s)^{N_s} = R(t_n)^{N_n} \Leftrightarrow \ln[R(t_s)^{N_s}] = \ln[R(t_n)^{N_n}] \Leftrightarrow N_s \ln R(t_s) = N_n \ln R(t_n) \Leftrightarrow \frac{\ln R(t_s)}{\ln R(t_n)} = \frac{N_n}{N_s}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\ln R(t_s)}{\ln R(t_n)} = \frac{N_n}{N_s} \\ \text{Distribución de Weibull: } R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \Leftrightarrow \frac{\ln R \left[e^{-\left(\frac{t_s}{T}\right)^b} \right]}{\ln R \left[e^{-\left(\frac{t_n}{T}\right)^b} \right]} = \frac{N_n}{N_s} \Leftrightarrow \frac{\left[-\left(\frac{t_s}{T}\right)^b \right]}{\left[-\left(\frac{t_n}{T}\right)^b \right]} = \frac{N_n}{N_s} \Leftrightarrow \left(\frac{t_s}{t_n}\right)^b = \frac{N_n}{N_s} \text{ (ecuación de Lipson)} \end{array} \right.$$

donde:

t_s : duración de prueba original

t_n : duración de prueba modificada

N_s : muestras totales en prueba expuestas a duración original t_s

N_n : muestras totales en prueba expuestas a duración modificada t_n

Esta denominada "ecuación de Lipson" rige entonces la relación entre el número de muestras de componente y la duración de prueba en una disposición de prueba de ejecución de éxito normal (por ejemplo, donde se especifica la duración de prueba) y el número de muestras de componente y la duración de prueba en la disposición de pruebas de ejecución de éxito alternativa (por ejemplo, donde se especifica el número de muestras de componente). Para ilustrar el uso de este concepto con más detalle, el ejemplo anterior se aplica de nuevo a continuación cuando el nivel

de confianza del 50 % y una fiabilidad del 90 % con una duración de funcionamiento de 10 horas normalmente requerirían que se usen 7 muestras de componente. Si solo se van a usar 2 muestras de componente para la prueba de ejecución de éxito, la nueva duración de prueba puede calcularse usando la ecuación de Lipson de la siguiente manera:

$$t_n = t_s \left(\frac{N_n}{N_s} \right)^{\frac{1}{b}} = 10 \text{ horas} \left(\frac{7 \text{ muestras}}{2 \text{ muestras}} \right)^{\frac{1}{1.5}} \cong 23 \text{ horas}$$

Por tanto, con el fin de lograr la misma determinación de fiabilidad del 90 % con un nivel de confianza del 50 %, sería necesario ejecutar 2 muestras de componente durante 23 horas sin fallo en el banco de pruebas 42. Tal como se entenderá fácilmente, cuando el número de muestras de componente que van a someterse a prueba se hace que sea un número muy bajo tal como 2, la duración de prueba tiende a aumentar significativamente, especialmente a niveles de confianza y fiabilidad más altos que en los cálculos de ejemplo en el presente documento. Con respecto a esto, puede ser necesario usar el banco de pruebas 42 durante largos períodos de tiempo para lograr los resultados de pruebas de fiabilidad requeridos por clientes para componentes de turbina eólica, y esto aclara la conveniencia de reducir la cantidad de pruebas físicas de muestras de componente. Por ejemplo, retirar una parte sustancial de las pruebas físicas (medida en la duración de tiempo total de las pruebas) que son necesarias puede hacer que los procedimientos de pruebas de fiabilidad sean más eficientes en tiempo y coste, particularmente en entornos donde los recursos del sistema de prueba son limitados. Por tanto, la combinación de pruebas de componente virtuales con las pruebas de componente físicas convencionales es ventajosa en los métodos de pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito de esta divulgación.

Volviendo a las figuras 4 y 5, se muestra una representación gráfica esquemática de pruebas físicas de muestras de componente según dos variantes diferentes de productos, estas representaciones gráficas y la descripción a continuación que se adaptan para explicar el proceso general para pruebas de fiabilidad, que también se aplica con el proceso de pruebas combinadas físicas y virtuales descrito con más detalle a continuación. Comenzando con la figura 4, los resultados de prueba muestran que la primera "muestra de prueba" o muestra de componente se somete a prueba durante un período de tiempo, provocando la ejecución exitosa de esa muestra (por ejemplo, sin fallo de producto) el nivel de confianza de que el componente no fallará en el uso en el mundo real hasta aproximadamente un 30 % (los números de tiempo a lo largo del eje de tiempo son aproximados). La segunda muestra de componente se somete a prueba en secuencia después de la finalización de la prueba de la primera muestra de componente, de nuevo durante un período de tiempo similar. La ejecución exitosa de esa muestra sin fallo de producto provoca que el nivel de confianza aumente hasta aproximadamente el 50 %, que era el valor deseado en el ejemplo proporcionado a lo largo de esta solicitud. La inclinación específica de los segmentos entre los puntos finales de las ejecuciones de prueba en estas figuras no debe considerarse limitante ya que el nivel de confianza puede variar de diferentes maneras entre los puntos finales calculados (un 30 % y un 50 % en este ejemplo).

Los puntos finales o nivel de confianza que resultan de las pruebas físicas de cada muestra de componente pueden determinarse usando las fórmulas proporcionadas anteriormente. Con este fin, se asume de nuevo que se desea una fiabilidad del 90 % durante 10 horas de funcionamiento de un componente con un nivel de confianza de al menos el 50 %. Tal como se calculó anteriormente, esto normalmente requerirá que 7 muestras de componente se sometan a prueba de manera exitosa durante 10 horas cada una para cumplir con la ecuación de ejecución de éxito. Usándose solo dos muestras de componente tal como se muestra en la representación gráfica de la figura 4, la duración de prueba se modifica y se calcula mediante la ecuación de Lipson tal como se mostró anteriormente que es de 23 horas para cada una de las dos muestras de componente. Estas mismas fórmulas pueden usarse de nuevo entonces para evaluar cuál es el nivel de confianza alcanzado después de que solo se haya sometido a prueba una de las muestras de componente. Como referencia, se usa el siguiente conjunto de fórmulas y variables:

$R(T_s)$ = fiabilidad, dependiente del tiempo

C = nivel de confianza

N_s = muestras de prueba dadas por $N_s = \frac{\ln(1-C)}{\ln(R)}$

N_n = muestras de prueba disponibles

T_n = duración de prueba de cada muestra

$$c_j = 1 - R(t)^{n_{sj}}$$

$$n_{sj} = n_{nj} \left(\frac{t_{nj}}{T_s} \right)^b$$

$$n_{nj} = 1$$

Tal como se muestra en la parte inferior de estas fórmulas, la notación minúscula "j" refiere a la muestra de componente está sometiendo a prueba. Por tanto, cuando se calcula la confianza para la primera muestra de componente c_1 , el número de muestras sometidas a prueba real n_{n1} se establece en 1 tal como se muestra. La ecuación de Lipson se usa entonces para calcular n_{s1} , que es la variable necesaria para completar el cálculo del nivel de confianza según la ecuación primaria de ejecución de éxito. En el ejemplo mencionado anteriormente, n_{n1} se establece en 1, t_{n1} se establece en 23 horas porque esa es la duración de prueba real, T_s se establece en 10 horas porque ese es el período de tiempo de ejecución que está sometiendo a prueba, y b se establece en 1,5 tal como se conoce en la técnica de pruebas de fiabilidad. Usando esos valores, el n_{s1} resulta en aproximadamente 3,488. Ese número puede conectarse con la fiabilidad del 90 % en la ecuación primaria de ejecución de éxito para dar como resultado el nivel de confianza, que se calcula en este ejemplo que es aproximadamente 0,308, también conocido como aproximadamente un 30,8 %. Por tanto, realizando estos cálculos, se sabe que el nivel de confianza alcanzado al final de las pruebas físicas de la primera muestra de componente está justo por encima del 30%. Esto se refleja en la representación gráfica que se muestra en la figura 4. Los mismos cálculos podrían ejecutarse entonces con n_{nj} estableciéndose igual a 2, lo que da como resultado un nivel de confianza de aproximadamente el 50 % (52 % para ser más precisos, provocándose la diferencia del 50 % por el redondeo de las horas y las duraciones de prueba necesarias en el conjunto inicial de cálculos anteriores). Por tanto, en la representación gráfica mostrada en la figura 4, al final de las pruebas físicas de la segunda muestra de componente, el nivel de confianza alcanza aproximadamente el 50 %. Estas fórmulas pueden usarse de manera similar para formar representaciones gráficas de nivel de confianza que aumenta a lo largo del tiempo en cualquier número de configuraciones y disposiciones de pruebas físicas diferentes, incluyendo esta disposición de prueba secuencial descrita en el ejemplo de las figuras 4 y 5.

La figura 5 muestra una variante del producto sometido a prueba en la figura 4, estando sometida esta variante a un factor de aceleración diferente. En pruebas de fiabilidad, el factor de aceleración se define como la relación entre las vidas útiles medias de campo y de banco de pruebas. Esto puede relacionarse con la vida útil total bajo cargas de campo y bajo cargas aceleradas aplicando el 63 % de la vida útil media ("T") de la distribución de Weibull tal como se muestra en la siguiente serie de fórmulas:

$$AF = \frac{\bar{t}_f}{\bar{t}_a} = \frac{\text{vida útil media bajo cargas de campo}}{\text{vida útil media bajo cargas aceleradas}}$$

$$\text{Weibull: } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \Leftrightarrow T = -\frac{t}{[\ln(1 - F)]^{\frac{1}{b}}}$$

$$AF = \frac{\bar{t}_f}{\bar{t}_a} = \frac{-\frac{t_f}{[\ln(1 - 0,63)]^{\frac{1}{b}}}}{-\frac{t_a}{[\ln(1 - 0,63)]^{\frac{1}{b}}}} = \frac{t_f}{t_a} \Leftrightarrow AF = \frac{\bar{t}_f}{\bar{t}_a} = \frac{t_f}{t_a}, \text{ para } t_f \text{ y } t_a \text{ en mismo } F$$

$$AF = \frac{t_f}{t_a} \equiv \frac{\text{vida útil bajo cargas de campo}}{\text{vida útil bajo cargas aceleradas}}$$

Por tanto, la duración de una prueba de una muestra de componente en condiciones de banco de pruebas aceleradas (etiquetadas como t_a a lo largo de este documento) se correlaciona directamente por esta relación con la vida útil exitosa esperada (etiquetada como t_f a lo largo de este documento) del mismo componente en el campo. Estos cálculos pueden usar distribuciones distintas de la de Weibull, pero el resultado final sigue siendo el mismo para calcular o definir el factor de aceleración. Además, el factor de aceleración AF puede calcularse en métodos alternativos, tal como mediante el uso de modelos empíricos para probabilidades de fallo dadas, así como también se entiende en la técnica de pruebas de fiabilidad. Lo importante a extraer de esta definición del factor de aceleración es que la variante de producto de la figura 5 requiere períodos de prueba más largos para que las muestras de prueba 1 y 2 alcancen los mismos puntos de nivel de confianza en comparación con la variante sometida a prueba en la figura 4. A continuación, se concluye a partir de las fórmulas proporcionadas anteriormente que la segunda variante sometida a prueba en la figura 5 está sometida a un factor de aceleración AF más bajo que la primera variante en la figura 4, y esto explica las duraciones de prueba más largas bajo cargas aceleradas en el banco de pruebas (que dan como resultado la misma vida útil deseada bajo cargas de campo para ambas variantes). No obstante, en todos los demás aspectos, las pruebas y los resultados logrados son los mismos con las dos variantes de producto sometidas al proceso de pruebas físicas típico.

Tal como se expone con más detalle a continuación, las diferentes variantes de producto mostradas con pruebas físicas en las figuras 4 y 5 son solo un tipo de variantes de producto que pueden usar las pruebas de fiabilidad virtuales ventajosas de la invención descrita actualmente. Con respecto a esto, se ha demostrado que las dos variantes se comportan de manera similar en la misma prueba, por ejemplo, usando las mismas cargas y duraciones de prueba.

Por consiguiente, solo es necesario someter a prueba físicamente una muestra de cada una de las dos variantes, mientras que la otra muestra de componente puede someterse a prueba virtualmente basándose en los resultados de la prueba física de la otra variante en el mismo período de tiempo, según el proceso descrito adicionalmente a continuación.

La figura 6 ilustra un primer ejemplo de resultados generados por el proceso de prueba de fiabilidad de esta invención, que es la combinación de pruebas de banco de pruebas físicas y pruebas de muestra de componente virtuales tal como se expone en esta divulgación. Con este fin, las dos variantes de producto se ilustran ahora en la misma representación gráfica de nivel de confianza, siendo las partes de línea continua el resultado de pruebas físicas y siendo las partes de línea discontinua el resultado de pruebas virtuales simultáneas. Aunque las variantes mostradas en las figuras 4 a 6 son productos similares sometidos a las mismas o diferentes cargas en uso (definiendo de ese modo diferentes factores de aceleración), se apreciará que las variantes también podrán ser dos productos equivalentes sometidos a diferentes cargas en uso en el campo, que, por supuesto, requerirán normalmente dos conjuntos distintos de pruebas físicas. El proceso de cálculo funciona de la misma manera en una realización de este tipo, por tanto no se proporciona un conjunto independiente de gráficos y explicación en el presente documento de esos tipos de “variantes de producto”.

Para resumir brevemente, puede hacerse el mismo conjunto de cálculos tal como se ha expuesto anteriormente para evaluar la duración de prueba t_{n1} que va a usarse y qué nivel de confianza se logra sometiendo a prueba físicamente solo una muestra de componente de la primera variante a lo largo de esa duración de prueba. Suponiendo que la muestra de componente de la primera variante sobreviva de manera exitosa a la operación en cargas de banco de pruebas durante toda la duración de prueba, puede proporcionarse esa parte de línea continua de la representación gráfica en la figura 6. Pueden hacerse cálculos similares independientemente con la misma duración de prueba que la prueba física, pero con la aplicación del factor de aceleración diferente de la segunda variante de producto, para determinar el nivel de confianza que se alcanzaría mediante una prueba exitosa similar (si se hace físicamente) de la segunda variante de producto durante la misma duración de prueba. Como resultado de los diferentes factores de aceleración, se muestra que el nivel de confianza alcanzado por la segunda variante de producto en una prueba virtual de este tipo es menor que el nivel de confianza de la primera variante de producto. El resultado de nivel de confianza más bajo se muestra mediante la representación gráfica de línea discontinua de la segunda variante bajo el encabezado de la muestra de prueba 1 en la figura 6. Este valor de nivel de confianza específico de la prueba virtual mostrada en líneas imaginarias para la “muestra de prueba 1, variante 2” se convierte entonces en el punto de partida para la siguiente ronda de pruebas en las segundas muestras de componente para cada variante.

Más específicamente, el objetivo sigue siendo lograr el nivel de confianza del 50 % para la fiabilidad y el tiempo de funcionamiento real que está sometándose a prueba para ambas variantes de producto. Para las segundas muestras de componente o “muestras de prueba” tal como se expone en la figura 6, la segunda variante de producto es ahora la única que se somete a prueba físicamente. Al usar la misma ecuación primaria de ejecución de éxito y la ecuación de Lipson como antes, puede determinarse la duración de prueba necesaria para elevar el nivel de confianza desde la cantidad alcanzada en las pruebas virtuales de la primera muestra de componente de la variante 2 al 50 % objetivo. La segunda muestra de componentes de la segunda variante se somete a prueba físicamente en el banco de pruebas para esa duración de prueba necesaria, y si la ejecución es exitosa, entonces la representación gráfica en línea continua mostrada en la figura 6 para la “muestra de prueba 2, variante 2” puede añadirse al gráfico de resultados.

Similar al proceso descrito anteriormente, la segunda muestra de componente para la primera variante de producto entonces puede someterse a prueba virtualmente aplicando las mismas fórmulas con la duración de prueba que se acaba de usar para la prueba física de la segunda muestra de componente de variante 2 para determinar qué nivel de confianza se lograría mediante una prueba física exitosa de la primera variante usando los mismos parámetros que se usaron para la variante 2. Como la primera variante comenzó a un nivel de confianza mucho más alto al final de la prueba de la primera muestra de componente, y en vista de las diferencias de factor de aceleración entre las variantes, los cálculos a partir de las pruebas virtuales darán como resultado un nivel de confianza alcanzado de mucho más del 50 % (aproximadamente el 90 % en el ejemplo de la figura 6). De nuevo, las pruebas virtuales pueden realizarse en estas circunstancias porque estas dos variantes de producto no se comportan de manera diferente cuando se someten a prueba físicamente en el banco de pruebas, por lo que no hay necesidad de confirmar el resultado con pruebas físicas duplicadas de la primera variante cuando se confirma que la segunda variante tiene éxito a lo largo de la duración de prueba necesaria para la muestra de componente 2. En resumen, el proceso de prueba de fiabilidad según la invención descrita en el presente documento continúa logrando resultados de nivel de confianza del nivel deseado (50 % o más en este ejemplo) para cada variante de producto al tiempo que se reduce el número total de muestras de componente que necesitan someterse a prueba físicamente de la siguiente manera:

$$\text{Potencial de ahorro teórico (TSP)} = 1 - \frac{\text{muestras físicas según Dragón Virtual}}{\text{muestras físicas según Dragón Clásico}}$$

$$TSP = 1 - \frac{2 \text{ pruebas físicas}}{2 \frac{\text{pruebas}}{\text{variante}} \times 2 \text{ variantes}} = 1 - 0,5 = 50 \%$$

Debe indicarse que el término “dragón” es un término interno del solicitante que se usa como una abreviatura para “prueba de fiabilidad de ejecución de éxito” en estas ecuaciones. Este “potencial de ahorro teórico” también se identifica como una relación de ahorro de costes en ejemplos adicionales a continuación donde los costes totales se reducen mediante la reducción del tiempo del banco de pruebas físicas, además de o alternativamente a la reducción de muestras de prueba como resultado en este ejemplo. Tal como se indicó anteriormente, a pesar de que este ejemplo simplificado proporciona aproximadamente un 50 % de reducción de costes, pueden lograrse más o menos ahorros de costes mediante otras realizaciones de los métodos de pruebas de fiabilidad de la invención descrita actualmente.

El mismo proceso ventajoso también puede usarse cuando sea necesario someter a prueba dos conjuntos de carga diferentes tal como se aplicó a un producto idéntico. Normalmente, esto requeriría que se sometieran a prueba dos muestras de componente bajo cada uno de los diferentes conjuntos de carga, pero bajo el proceso que usa pruebas de fiabilidad virtuales, solo una muestra de componente necesita someterse a prueba físicamente bajo cada uno de los diferentes conjuntos de carga, mientras que las otras muestras se someten a prueba virtualmente basándose en los resultados de prueba física. A continuación, se describen etapas adicionales para realizar tales pruebas virtuales, pero el resultado final es la reducción del tiempo de prueba física y las muestras necesarias, al mismo tiempo que siguen logrando los mismos resultados que las pruebas de fiabilidad anteriores usando únicamente resultados de banco de pruebas físicas.

Antes de pasar a tales ejemplos y realizaciones adicionales, será útil describir fórmulas que definen los ahorros de costes logrados por muchas de las realizaciones de los métodos descritos a lo largo de esta divulgación. Un ejemplo de un ahorro de este tipo se definió como el “potencial de ahorro teórico” anterior, pero el cálculo puede generalizarse para todos los contextos en los que se ahorran costes comparando los costes totales de pruebas físicas que se realizarían en un método de pruebas de ejecución de éxito convencionales o “clásicas”, con los costes totales de pruebas físicas y virtuales que se realizarían al aplicar los métodos de pruebas de fiabilidad de esta invención. De nuevo, obsérvese que el término “dragón” es un término interno del solicitante que se usa como una abreviatura para “prueba de fiabilidad de ejecución de éxito” en las siguientes ecuaciones (por ejemplo, Dragón Clásico es una prueba de ejecución de éxito convencional). En primer lugar, puede obtenerse un total de costes ahorrado en dólares reales u otra divisa mediante el siguiente cálculo:

$$\begin{aligned} & \text{Costes ahorrados por Dragón Virtual} \\ &= (\text{costes asociados con pruebas de todas las variantes y muestras según Dragón Clásico}) \\ &- (\text{costes asociados con pruebas de todas las variantes y muestras según Dragón Virtual}) \end{aligned}$$

Otra manera de ver los beneficios de los métodos de pruebas de fiabilidad de la presente invención es ver los costes ahorrados en términos de una reducción en porcentaje en los costes, que se denomina “relación de ahorro de coste” en la siguiente fórmula. Este cálculo se repite a continuación para varios ejemplos y también es consistente con el “potencial de ahorro teórico” calculado anteriormente:

$$\begin{aligned} \text{Relación de ahorro de costes} &= \frac{\text{costes ahorrados por Dragón Virtual}}{\text{costes asociados con pruebas según Dragón Clásico}} = \\ &= 1 - \frac{\text{costes asociados con pruebas según Dragón Virtual}}{\text{costes asociados con pruebas según Dragón Clásico}} \end{aligned}$$

Por tanto, en un ejemplo hipotético de cómo se usaría esta relación de ahorro de costes, asumir que las pruebas de ejecución de éxito clásicas o convencionales para 4 variantes de producto diferentes requerirían 8 pruebas totales de muestras de prueba físicas en el banco de pruebas, por ejemplo, 2 muestras por variante de producto. Los costes asociados con esas pruebas clásicas incluirían los implicados con las 8 muestras en sí mismas, así como los implicados en el propio proceso de prueba. Los costes asociados con las pruebas pueden incluir cualquiera o la totalidad de la adquisición de las muestras de prueba y cualquier equipo auxiliar requerido, preparación e instalación de muestras de sensores y similares, ejecución de secuencias de prueba a lo largo de tiempos de ejecución con inspecciones, análisis, etc., y actividades relacionadas con la resolución de problemas, así como el procesamiento posterior y la notificación de resultados. Si se usan en su lugar métodos de pruebas de fiabilidad físicas y virtuales de la invención descritos en el presente documento, se asume que el requisito de pruebas físicas en el banco de pruebas puede reducirse a una muestra de prueba por variante, consistente con el primer ejemplo proporcionado anteriormente. Como tal, los costes para realizar las pruebas de fiabilidad incluyen solo los costes de producción de 4 muestras de prueba, así como los costes implicados en la realización de las 4 pruebas en el banco de pruebas. Si se asume una simplificación adicional, los costes para realizar cada prueba son iguales, el cálculo de la relación de ahorro de costes sería de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Relación de ahorro de costes} = \\ = 1 - \frac{4 \text{ muestras} + \text{costes de 4 pruebas}}{2 \frac{\text{muestras}}{\text{variante}} \times 4 \text{ variantes} + \text{costes de 8 pruebas}} = 50 \% \end{aligned}$$

Por tanto, la relación de ahorro de costes proporciona con precisión una explicación de uno de los beneficios de los métodos de pruebas de fiabilidad de la invención descritos en esta divulgación, independientemente de si el ahorro se genera a partir del uso de menos muestras, duraciones de prueba reducidas, o alguna combinación de los mismos. Se hará referencia de nuevo a este cálculo a lo largo de los ejemplos y realizaciones proporcionados a continuación para ayudar a confirmar las diferencias de la invención descritas en el presente documento con respecto a las pruebas de ejecución de éxito convencionales, que experimenta al menos los inconvenientes descritos en la sección de antecedentes anterior.

Otro ejemplo que aplica los métodos de pruebas de fiabilidad para pruebas secuenciales de varias muestras de componente se proporciona con referencia a las figuras 7 a 9, con énfasis adicional en el proceso de cálculo que también define la base del proceso de prueba de fiabilidad de esta invención. Más específicamente, este ejemplo y la siguiente descripción aclaran la diferencia entre las ecuaciones usadas para muestras de componente individuales y las ecuaciones usadas para combinar muestras en un proceso secuencial, lo que se vuelve importante cuando se pasa de una muestra de componente a la siguiente en los métodos descritos en el presente documento. Las figuras 7 y 8 ilustran capturas de pantalla de la entrada (en la figura 7) proporcionadas a un programa de software ejecutado por el procesador 44 en el sistema de prueba 40, y las salidas de cálculo (en la figura 8) que resultan de estos cálculos. El elemento de visualización mostrado en estas figuras es un esquema de lo que se vería en el dispositivo de salida 48 del sistema de prueba 40 tal como se ha expuesto anteriormente, tal como cuando el dispositivo de salida 48 es un monitor o pantalla de ordenador. Ahora se proporciona una explicación adicional de las fórmulas y las variables mostradas en estas figuras.

Cada segmento individual de la curva de prueba, que se produce en las representaciones gráficas mostradas a lo largo del conjunto de figuras de esta solicitud, se produce a partir de un conjunto de fórmulas subyacentes que se han descrito previamente. En estas fórmulas, las variables calculadas se denominan no acumulativas y están representadas por variables en minúscula con el índice o los subíndices "j" (haciendo referencia a la muestra de componente específica). Las variables mayúsculas sin el índice "j" son constantes definidas por el objetivo de fiabilidad, y por motivos de este ejemplo, son similares a los valores proporcionados en otros ejemplos anteriores. Ese conjunto de fórmulas ahora puede resumirse de la siguiente manera:

$R(T_s)$ = fiabilidad, dependiente del tiempo

C = nivel de confianza

N_s = muestras de prueba dadas por $N_s = \frac{\ln(1-C)}{\ln(R)}$

N_n = muestras de prueba disponibles

T_n = duración de prueba de cada muestra

$$c_j = 1 - R(t)^{n_{sj}}$$

$$n_{sj} = n_{nj} \left(\frac{t_{nj}}{T_s} \right)^b$$

$$n_{nj} = 1$$

Estas fórmulas se aplican tal como se muestra más claramente por las ecuaciones introducidas en el software y mostradas en la figura 7. Por tanto, el proceso comienza con una determinación del número de muestras de componente N_s que normalmente serían necesarias si cada muestra de componente o "muestra de prueba" se sometiera a prueba físicamente en pruebas de ejecución de éxito durante la misma duración que la que está sometida a prueba en el análisis de fiabilidad. Esto depende de los valores predeterminados de las constantes, específicamente el número de fiabilidad, se muestra que es del 90 % en el ejemplo de las figuras 7 y 8, y el nivel de confianza, se muestra que es del 50 % en las figuras 7 y 8. La fórmula para N_s mostrada anteriormente puede verse en el bloque F6 del diagrama de la figura 7, y en el presente ejemplo ilustrativo, ese cálculo da como resultado 7 muestras en los resultados mostrados en la figura 8. Por tanto, para lograr una fiabilidad del 90 % durante un tiempo de ejecución T_s de 10 horas con un nivel de confianza del 50 %, la prueba de ejecución de éxito normal implicaría someter a prueba físicamente 7 muestras de componente durante el mismo período de tiempo de 10 horas.

Sin embargo, se proporcionan realmente menos muestras de componente para las pruebas que este número. En este nuevo ejemplo, las muestras de prueba disponibles para las pruebas secuenciales son 4, y la ecuación de Lipson puede aplicarse para calcular la duración de prueba T_n apropiada, para cada una de esas 4 muestras de componente tal como se muestra en el bloque F12 de la figura 7. En la figura 8, se muestra que el resultado de ese cálculo del procesador 44 es 14,5 horas en este ejemplo. Con respecto a esto, para lograr la misma fiabilidad del 90 % durante un tiempo de ejecución T_s de 10 horas con un nivel de confianza del 50 % con solo 4 muestras de componente, cada una de las muestras de componente es necesario que se someta a prueba de manera exitosa durante una duración de prueba de 14,5 horas. Este valor puede conectarse entonces como el t_n para cada una de las muestras de componente individuales en la columna F del diagrama de cálculo mostrado en la figura 7.

En este punto, las tres fórmulas inferiores proporcionadas para calcular el n_{nj} , el n_{sj} y el c_j se aplican para cada una de las cuatro muestras de componente en la parte no acumulativa del diagrama. Como cada muestra de componente se calcula individualmente en este caso, el n_{nj} siempre se establece que sea 1 porque este conjunto de cálculos asume que solo está sometiéndose a prueba la muestra de componente 1. Usando los valores de t_n determinados anteriormente y la ecuación de Lipson tal como se muestra en los bloques G22 a G25 en la figura 7, se calculan los valores de n_s para cada una de las muestras de componente $j=4$, y esto da como resultado aproximadamente 1,746 (1,75) tal como se muestra en los resultados proporcionados en la figura 8. Ese valor de n_s se ejecuta entonces a través de la ecuación primaria de ejecución de éxito tal como se muestra en los bloques I22 a I25 en la figura 7 para proporcionar cuál sería el nivel de confianza alcanzado para cada muestra de componente cuando se toman individualmente. Tal como se muestra en la figura 8, este nivel de confianza es de aproximadamente un 16,8 %, que se muestra como 0,17 en la figura 8 para cada una de las cuatro muestras de componente.

Si bien este conjunto de cálculos da como resultado información valiosa para las muestras de prueba individuales, el hecho de que las muestras de prueba se sometan a prueba realmente de manera secuencial también debe considerarse al determinar el nivel de confianza total logrado por el proceso de prueba secuencial. Por tanto, ecuaciones adicionales para combinar muestras de esta manera se muestran en uso en las figuras 7 y 8 bajo el encabezado acumulativo:

$$C_j = 1 - R(t)^{N_{sj}}$$

$$N_{sj} = \sum_{k=1}^j n_{sk}$$

Para estos valores acumulativos, se usan letras mayúsculas para las variables de nuevo con el índice o subíndice de "j" para referirse a qué muestra de componente está aplicándose. Tal como se muestra en la columna M de la figura 7, el cálculo para N_{sj} es una suma relativamente simple para todos los n_{sj} para las muestras de componente sometidas a prueba hasta la fecha (por ejemplo, aproximadamente de 0,175 para la primera muestra de componente, aproximadamente de 0,175 veces dos para la segunda muestra de componente, y así sucesivamente). Por tanto, los valores de n_{sj} para las muestras de componente individuales deben calcularse para generar estos valores de N_{sj} para las pruebas acumulativas del proceso secuencial. Después de calcular tales valores, los números de N_{sj} pueden introducirse en la ecuación primaria de ejecución de éxito tal como se muestra en la columna O del diagrama en la figura 7 para llegar al nivel de confianza alcanzado al final de cada muestra de prueba secuencial o muestra de componente. El resultado de tales cálculos se muestra en la columna O de la figura 8. Estos valores de C_j acumulativos son lo que se representaría gráficamente como criterios de valoración de segmento para una representación gráfica de cambios de nivel de confianza a lo largo del tiempo de duración de prueba. Una representación gráfica de este tipo que usa los valores en este ejemplo de las figuras 7 y 8 se proporciona en la figura 9, como referencia. Tal como se espera por el cálculo original de la duración de prueba necesaria para someter a prueba 4 muestras de componente y llegar al 50 % o más de nivel de confianza, esta serie de cálculos y pruebas de ejecución de éxito físicas confirman que el nivel de confianza deseado se logra al final de la cuarta prueba de muestra de componente. De hecho, puede usarse un conjunto similar de ecuaciones y cálculos en un diagrama de cálculo que se hace funcionar por software cargado en el procesador 44 para ejecutar el método de pruebas de fiabilidad en un número de variantes de producto similares (en lugar de solo una variante de producto como en las figuras 7 a 9), este proceso específico se describe ahora con más detalle.

Volviendo ahora con referencia a las figuras 10 y 11, las pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito que usan la combinación de resultados de prueba física y resultados de prueba virtual se muestra según una realización de la invención descrita actualmente. Comenzando con la figura 10, se muestra un diagrama de cálculo producido por software ejecutado mediante el procesador 44 del sistema de prueba 40, de una manera similar a como aparecería ese diagrama de cálculo en el dispositivo de salida 48. El diagrama de cálculo incluye una identificación del tipo de variante de producto con índice o subíndice "i" y el número de muestras de prueba con índice o subíndice "j". El número

de muestras de prueba disponible n_n (normalmente establecido en 1 debido a que cada línea representa solo una de las muestras de componente), se muestran las otras variables no acumulativas t_n , n_s y c , y las variables acumulativas N_s y C se muestran de manera similar al ejemplo anterior en las figuras 7 y 8. Cada uno de estos elementos puede etiquetarse adicionalmente con los subíndices de la variante de producto "i" y el número de muestra "j" tal como se muestra en las versiones abreviadas en cada bloque del diagrama de cálculo (por ejemplo, el nivel de confianza acumulativo alcanzado para la segunda variante de producto después de que se someta a prueba la cuarta muestra se indica en la columna final como C_{24} , por ejemplo, C_{ij}). Se apreciará que puede usarse un número diferente de muestras de componente en otras realizaciones similares sin apartarse del alcance de la invención.

Se entenderá que las constantes necesarias para estos cálculos, tales como la fiabilidad deseada, el tiempo de funcionamiento que se somete a prueba para su uso real, y el nivel de confianza deseado, pueden establecerse por el usuario en otra parte no visible del diagrama de cálculo. El conjunto de fórmulas usado para calcular las variables no acumulativas y acumulativas en el diagrama son de la siguiente manera, que es un conjunto similar al descrito en los ejemplos anteriores, pero con los subíndices dobles "ij" apropiados añadidos para la variante y la muestra específicas:

$$\begin{aligned} c_{ij} &= 1 - R_i(t)^{n_{sij}} \\ n_{sij} &= n_{nij} \left(\frac{t_{nij}}{T_{si}} \right)^b \\ C_{ij} &= 1 - R_i(t)^{N_{sij}} \\ N_{sij} &= \sum_{k=1}^j n_{sik} \end{aligned}$$

Tal como se entenderá fácilmente, el proceso o lógica de cálculo sigue un proceso similar para cada línea del diagrama de cálculo tal como se expuso anteriormente en los ejemplos de las pruebas físicas. Los valores de n_{sij} y c_{ij} para la parte no acumulativa del diagrama se calculan a partir de valores conocidos (y los valores de tiempo expuestos a continuación), y luego los valores N_{sij} y C_{ij} pueden calcularse para cada línea de la parte acumulativa del diagrama. Esos valores de C_{ij} determinan entonces cómo debe moverse la representación gráfica de nivel de confianza de segmento a segmento para las diferentes muestras de prueba. Un ejemplo de una representación gráfica de este tipo se muestra en la figura 11 para aplicar el método de pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito a cuatro variantes de producto similares.

Tal como se aludió anteriormente, una diferencia específica e importante en este proceso de cálculo proviene del cálculo de las variables de duración de prueba t_{nij} . Como cuestión preliminar, para la misma muestra de prueba de cada variante de producto, la duración de prueba de la prueba física (en condiciones de carga acelerada) también se aplica para que sea la duración de prueba para la prueba virtual de las muestras de las otras variantes. Esta disposición de la duración de prueba en condiciones aceleradas (t_a) puede resumirse mediante las siguientes fórmulas:

$$\begin{cases} t_{aij} = t_{ajj} \\ t_{aai} = \frac{t_{nii}}{AF_{ii}} \end{cases}$$

Tal como se ha expuesto anteriormente, el factor de aceleración AF se calcula de antemano para cada una de las variantes de producto y es de manera efectiva la relación de la vida útil bajo cargas de campo y la vida útil bajo cargas aceleradas. El valor de t_{nii} en la segunda de estas fórmulas puede especificarse para que sean valores diferentes en diversas realizaciones, pero por motivos de ejemplo, pueden usarse las siguientes fórmulas para tales valores:

$$\begin{cases} t_{nii} = T_n \equiv T_s \left(\frac{N_s}{N_n} \right)^{\frac{1}{b}} \\ t_{nij} = t_{aij} \cdot AF_{ij} \end{cases}$$

$$\text{Con } AF_{ij} = \frac{t_{fij}}{t_{aij}}$$

Con respecto a esto, el valor de t_{nii} en este ejemplo se establece usando el valor de duración de prueba T_n que se calcularía bajo la prueba física normal de muestras. Los otros valores en esa fórmula para calcular T_n se entenderán a partir de la descripción anterior. Este valor puede introducirse en la primera columna de la sección no acumulativa del diagrama de cálculo en los bloques t_{n11} , t_{n22} , y así sucesivamente. Esos valores de t_{nii} pueden usarse entonces junto con los factores de aceleración predeterminados y las fórmulas anteriores para calcular la duración de prueba t_a en condiciones aceleradas para todas las combinaciones de variante de producto y muestra de prueba (cabe recordar que t_{a11} se establece igual a t_{a12} , t_{a13} , y así sucesivamente, y esto es lo que define la longitud de los segmentos en el eje horizontal de la representación gráfica tal como se muestra en la figura 11, por ejemplo). Esos valores de t_{nii} también pueden usarse junto con los factores de aceleración predeterminados y las fórmulas anteriores para calcular los valores de duración de prueba t_{nij} que se introducen en la primera columna de la sección no acumulativa del diagrama de cálculo mostrado en la figura 10.

Con toda la primera columna de la sección no acumulativa del conjunto de diagramas de cálculo, así como las duraciones de prueba reales en condiciones aceleradas en el banco de pruebas 42 tal como se identifican por los valores de t_a , la serie de fórmulas con los subíndices dobles "ij" enumerados anteriormente pueden usarse en secuencia para calcular las otras variables no acumulativas y acumulativas que conducen a los puntos de nivel de confianza que van a representarse gráficamente en la representación gráfica. Estos cálculos son sustancialmente similares al ejemplo proporcionado anteriormente para la prueba secuencial de una única variante de producto, pero con la aplicación de pruebas físicas y virtuales de las diferentes variantes de producto tal como se describió anteriormente en relación con la figura 6. Con respecto a esto, para la primera muestra de prueba de cada variante de producto, el proceso comienza usando las fórmulas para calcular todos los valores en esa línea del diagrama de cálculo (para la variante de producto 1, muestra de prueba 1) para determinar qué nivel de confianza acumulativo C_{11} resultará del funcionamiento exitoso de esa variante y muestra en pruebas físicas en el banco de pruebas 42 durante la duración de prueba específica t_a en las condiciones aceleradas del banco de pruebas 42. Suponiendo que la prueba de ejecución de éxito es exitosa, las otras variantes de producto en la muestra de prueba 1 pueden someterse a prueba virtualmente haciendo que el procesador 44 calcule todos los valores en las líneas correspondientes del diagrama de cálculo para revelar qué nivel de confianza C_{ij} se alcanza al final de la prueba virtual de la primera muestra de prueba de todas las demás variantes de producto. Estos valores pueden representarse gráficamente entonces en la representación gráfica tal como se muestra con líneas discontinuas en la figura 11 con los diferentes niveles de confianza como resultado de los diferentes factores de aceleración para las variantes de producto. El resultado de prueba física para la primera variante de producto también se representa gráficamente con línea continua en la figura 11.

El método de pruebas de fiabilidad se mueve entonces a la segunda muestra de prueba de cada variante de producto. En este caso, la segunda variante de producto es la que va a someterse a prueba físicamente en el banco de pruebas 42, por lo que el procesador 44 comienza con completar la línea correspondiente del diagrama de cálculo usando la serie de fórmulas proporcionadas anteriormente. Se determina el nivel de confianza acumulativo C_{22} alcanzado y luego se aplica la prueba de ejecución de éxito física a la muestra de componente física, por consiguiente. Si esa prueba de ejecución de éxito funciona sin fallo, entonces las pruebas virtuales de las otras variantes de la segunda muestra de prueba pueden realizarse haciendo que el procesador 44 calcule cada una de las variables en las líneas correspondientes del diagrama de cálculo usando la serie de fórmulas proporcionadas anteriormente. Este conjunto individual de cálculos para cada una de las segundas muestras de prueba da como resultado valores de nivel de confianza acumulativos que alcanzarán las diferentes variantes al final de las pruebas físicas y virtuales de las segundas muestras de prueba, esos valores reflejados en el diagrama tal como se muestra en la figura 11 (algo inferior al 80 % para la variante 1, algo inferior al 40 % para la variante 2, y así sucesivamente).

Para cada muestra de prueba restante, se repiten estas mismas etapas para calcular niveles de confianza y someter a prueba físicamente una de las variantes de producto para confirmar que todas las variantes de producto pasarán la prueba de ejecución de éxito. A continuación de la muestra de prueba final, que es la cuarta muestra de prueba en el ejemplo de la figura 11, cada variante de producto puede evaluarse para determinar si realmente alcanzó el nivel de confianza deseado. Tal como se muestra en la figura 11, las variantes de producto 1, 2 y 3 lograron todas niveles de confianza del 80 % o más altos, lo que sería aceptable según el objetivo de ejemplo del 50 % descrito anteriormente. Por el contrario, la variante de producto 4 solo logra la fiabilidad deseada a un nivel de confianza de aproximadamente un 40 %, lo que puede no ser aceptable dependiendo de los parámetros de prueba especificados y las demandas del

cliente. En eventos tales como este, pueden requerirse pruebas adicionales de la cuarta variante de producto antes de que se apruebe para la producción y venta a operadores de HAWT, pero las tres primeras variantes de producto están listas para la producción con una cantidad minimizada de pruebas físicas. Con este fin, la relación de ahorro de costes o “potencial de ahorro teórico” con 3 o 4 variantes de producto (en lugar de 2 variantes en el cálculo a continuación) de pruebas físicas en este ejemplo es aproximadamente del 50 % según lo siguiente:

$$\text{Potencial de ahorro teórico (TSP)} = 1 - \frac{\text{muestras físicas según Dragón Virtual}}{\text{muestras físicas según Dragón Clásico}}$$

$$TSP = 1 - \frac{2 \text{ pruebas físicas}}{2 \frac{\text{pruebas}}{\text{variante}} \times 2 \text{ variantes}} = 1 - 0,5 = 50 \%$$

El método de pruebas de fiabilidad de esta divulgación puede entenderse adicionalmente mediante el resumen etapa por etapa de una realización del método usando pruebas de productos físicas y virtuales, tal como se describe en las figuras 12 a 14. Con este fin, el método de pruebas de fiabilidad global se muestra como diagrama de flujo 100 en la figura 12, con etapas específicas de este diagrama de flujo 100 que se ilustran adicionalmente en los diagramas de flujo de las figuras 13 y 14, descritas a continuación. El método de pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito de esta invención produce resultados de prueba de nivel de confianza similares a las pruebas de componentes completamente físicas convencionales, mientras se necesita significativamente menos tiempo de banco de pruebas y otros recursos.

Con referencia específica a la figura 12, el método comienza haciendo que el procesador 44 recupere de la memoria 46 o de un dispositivo de entrada de usuario (no mostrado, puede ser el mismo que el dispositivo de salida 48) diversas constantes de entrada y valores necesarios para los cálculos y proceso de prueba, en el bloque 102. Por ejemplo, estas constantes de entrada pueden incluir, pero no se limitan a: el tiempo de funcionamiento durante el que está sometido a prueba, la fiabilidad deseada, el nivel de confianza que se desea alcanzar, el número de muestras de prueba disponibles para cada variante, y factores de aceleración para todas las muestras de prueba. Se entenderá que, aunque el término “variante” se usa a lo largo de esta solicitud y los diagramas de flujo, este término debe considerarse lo suficientemente amplio como para cubrir cualquier conjunto de componentes que se someten a prueba simultáneamente usando este proceso. Con este fin, “variantes” podría ser el mismo producto/un producto igual sometido a diferentes cargas y/o pequeñas variaciones del mismo producto, a partir de un contexto de fiabilidad. Además, en otras realizaciones descritas adicionalmente a continuación, diferentes productos sometidos a prueba en paralelo también pueden estar sometidos a beneficiarse de los métodos de pruebas de fiabilidad descritos en el presente documento, a pesar de que no son “variantes” tal como se entiende en las otras realizaciones.

El método continúa entonces con un cálculo de los valores de tiempo de duración de prueba, tanto en condiciones aceleradas como en condiciones normales, mediante el procesador 44 para todas las muestras de prueba, en el bloque 104. Este cálculo se expone con más detalle con referencia a la figura 13 a continuación. Después de que se determinen los valores de tiempo de duración de prueba, el procesador 44 calcula entonces el nivel de confianza individual y acumulativo que se alcanza a continuación de una prueba exitosa de la primera muestra de la primera variante, en el bloque 106. Este cálculo se expone con más detalle con referencia a la figura 14 a continuación. El banco de pruebas 42 y la unidad de accionamiento 52 se hacen funcionar para someter a prueba físicamente la primera muestra de la primera variante a lo largo de la duración de prueba (condiciones aceleradas), en el bloque 108. El banco de pruebas 42 o el usuario comunica al procesador 44 si la prueba física de esta primera muestra fue exitosa, en el bloque 110. Si la prueba física no fue exitosa, por ejemplo, la muestra falló antes del final de la duración de prueba especificada, entonces el procesador 44 usa el dispositivo de salida 48 para notificar al usuario que la prueba de fiabilidad no fue exitosa, en el bloque 112, y el método termina en esta confluencia. Se entenderá que los cálculos de nivel de confianza en el bloque 106 pueden realizarse después de la prueba física en el bloque 108, sin apartarse del alcance de este método ventajoso.

Alternativamente, si la prueba física fue exitosa en el bloque 110, el método continúa con la realización de una prueba virtual de las primeras muestras para todas las demás variantes, en el bloque 114. Con este fin, el procesador 44 calcula los niveles de confianza individuales y acumulativos alcanzados por las pruebas exitosas de esas primeras muestras. Este cálculo se expone con detalle adicional con referencia a la figura 14 a continuación, y es sustancialmente el mismo que el cálculo realizado en el bloque 106. Con todos los resultados de nivel de confianza para las primeras muestras determinadas, el procesador 44 representa gráficamente los aumentos del nivel de confianza a lo largo de la duración de prueba (condiciones aceleradas) para todas las primeras muestras de las variantes y envía esta información al usuario, tal como mediante el dispositivo de salida 48, en el bloque 116.

El procesador 44 continúa el método de esta realización determinando si todas las muestras de prueba se han sometido a una prueba, ya sea física o virtual, en el bloque 118. Si no se han sometido a prueba todas las muestras, entonces las etapas descritas en los bloques 106 a 116 (según sea necesario) se repiten para la siguiente muestra de todas las variantes, en el bloque 120. El banco de pruebas 42 y el procesador 44 deben someter a prueba físicamente una variante diferente de la que se ha probado físicamente antes mientras se repiten estas etapas, si es posible. Por

ejemplo, en el ejemplo de cuatro variantes de producto y cuatro muestras de prueba para cada variante, la segunda variante se sometería a prueba físicamente para el conjunto de segundas muestras de prueba (todas las demás sometidas a prueba virtualmente), la tercera variante se sometería a prueba físicamente para el conjunto de terceras muestras de prueba (todas las demás sometidas a prueba virtualmente), y así sucesivamente. Este proceso conducirá a que todas las muestras de prueba reciban uno de los tipos de pruebas, o, alternativamente, un fallo de una ejecución física de una de las pruebas tal como se describe con relación al bloque 112 anterior. Si todas las muestras de prueba se han sometido a prueba en el bloque 118, entonces el método avanza haciendo que el procesador 44 notifique al usuario el nivel de confianza acumulativo final alcanzado para cada variante al final de la prueba, tal como por el dispositivo de salida 48, en el bloque 122. El método de pruebas de fiabilidad entonces finaliza.

Volviendo ahora con referencia específica a la figura 13, la etapa en el bloque 104 del método en el diagrama de flujo de la figura 12 se expande para explicar las etapas del proceso que se realiza por el procesador 44 para calcular los valores de tiempo de duración de prueba para todas las muestras de prueba, en condiciones aceleradas, así como en condiciones normales. Este proceso de cálculo comienza recibiendo constantes de entrada que incluyen el número total "i" de tipos de variantes de producto y el número total "j" de muestras de prueba proporcionadas para cada variante, así como factores de aceleración para para cada una de las muestras y variantes, en el bloque 140. El tiempo de duración de prueba para condiciones normales de algunas de las muestras de prueba (t_{nij}), que van a someterse a prueba físicamente, se calcula que es igual a T_n usando la ecuación de Lipson tal como se ha expuesto anteriormente, o calculado/determinado a partir de algunas condiciones de entrada distintas, en el bloque 142. Con respecto a esto, la duración de prueba normal para las muestras sometidas a prueba físicamente puede establecerse en valores alternativos en otras realizaciones consistentes con las prácticas de prueba de fiabilidad, pero la ecuación de Lipson se usa en este caso por consistencia con el resto del método. Para esas muestras de prueba que van a someterse a prueba físicamente, la duración de prueba en condiciones aceleradas (t_{aij}) se calcula basándose en los factores de aceleración aplicables a esas muestras, en el bloque 144. Este valor determina cuál será la duración de prueba física real en el banco de pruebas 42 para cada variante, y este valor también establece la distancia horizontal en las representaciones gráficas del nivel de confianza a lo largo del tiempo que finalmente se generan en el método de pruebas de fiabilidad.

El proceso de cálculo continúa entonces estableciendo la duración de prueba en condiciones aceleradas para todas las demás muestras (t_{aij}) para que sea equivalente a la duración de prueba en condiciones aceleradas para la muestra correspondiente de la variante que se somete a prueba físicamente en ese grupo (por ejemplo, $t_{aij} = t_{aij}$), en el bloque 146. Con esa duración de prueba en valores de condición acelerada disponibles, el procesador 44 calcula entonces la duración de prueba en condiciones normales (t_{nij}) para todas las demás muestras de prueba basándose en los factores de aceleración correspondientes, en el bloque 148. Todos los valores de tiempo de duración de prueba para todas las muestras de prueba pueden enviarse entonces al procesador 44 para su uso adicional en el método de pruebas de fiabilidad, en el bloque 150. Como referencia, las duraciones de prueba de condición acelerada definen las duraciones de prueba física y el eje horizontal de la representación gráfica de nivel de confianza a lo largo del tiempo, mientras que las duraciones de prueba de condición normal se usan en fórmulas adicionales para calcular el nivel de confianza alcanzado por las pruebas. Por tanto, el proceso de cálculo de la figura 13 proporciona toda la información necesaria para que el procesador 44 continúe con el método de pruebas de fiabilidad descrito en detalle en el presente documento.

Volviendo ahora a la figura 14, el cálculo del nivel de confianza individual (no acumulativo) y acumulativo alcanzado al final de una prueba física o virtual se proporciona en detalle en un diagrama de flujo etapa por etapa, realizándose cada una de las etapas mediante el procesador 44. Este diagrama de flujo es el proceso de cálculo que se produce en los bloques 106 y 114 del diagrama de flujo y el método de la figura 12, por ejemplo. Este proceso de cálculo comienza recibiendo constantes de entrada y valores de tiempo de duración de prueba (calculados en el bloque 104 y descritos en detalle anteriormente en la figura 13) para la variante específica "i" y la muestra de prueba "j" que se considera actualmente, en el bloque 170. El procesador 44 establece n_{nij} igual a 1 para esta muestra que está sometiéndose a prueba realmente de manera física o virtual, en el bloque 172. Con esa información, la variable no acumulativa n_{nij} puede calcularse para esta muestra y variante usando la ecuación de Lipson de la manera expuesta en detalle anteriormente, en el bloque 174. Esa variable no acumulativa se introduce entonces en la ecuación de ejecución de éxito mediante el procesador 44 para calcular el nivel de confianza individual o no acumulativo c_{ij} que se lograría sometiendo a prueba esta muestra en el resumen, por ejemplo, por sí mismo, en el bloque 176. Estos son todos los valores necesarios para llenar el diagrama de cálculo bajo el encabezado no acumulativo.

Entonces, el procesador 44 calcula las variables acumulativas y el nivel de confianza logrado. Más específicamente, el procesador 44 calcula el N_{sij} acumulativo para esta muestra usando una función de suma descrita en detalle anteriormente, en el bloque 178. El procesador 44 usa entonces esta variable acumulativa en la ecuación de ejecución de éxito para calcular el nivel de confianza acumulativo C_{ij} logrado después de una prueba física o virtual exitosa de la muestra en cuestión, en el bloque 180. Los valores de nivel de confianza para esta muestra de prueba pueden enviarse entonces al procesador 44 para informar al usuario, en el bloque 182. Esta etapa finaliza el proceso de cálculo para niveles de confianza. Ese nivel de confianza acumulativo es lo que determina la parte vertical de la representación gráfica de cambios de nivel de confianza a lo largo del tiempo para la muestra de prueba, cuando esta información se representa gráficamente más tarde en el método de pruebas de fiabilidad. Se entenderá que las modificaciones y el reordenamiento de algunas etapas en los métodos expuestos en las figuras 12 a 14 pueden ser posibles en otras

realizaciones mientras permanecen consistentes con el alcance de la invención descrita actualmente.

Tal como se describió inicial y anteriormente, los métodos de pruebas de fiabilidad descritos en algunas de las realizaciones de esta divulgación reducen ventajosamente el número de muestras de componente que deben someterse a prueba física, al tiempo que también se reduce significativamente la duración de prueba total para pruebas físicas en el banco de pruebas 42 del sistema de prueba 40, mientras se siguen proporcionando resultados de nivel de confianza y fiabilidad durante la duración de tiempo de funcionamiento (tal como se describió en los ejemplos anteriores) y/u otros parámetros operativos deseados. Por ejemplo, el número de muestras de prueba o muestras de componente que necesitan someterse a prueba físicamente puede reducirse en un 50 % cuando se usa este método. En otras palabras, mientras que una totalidad de una pluralidad de muestras de prueba requeriría pruebas físicas en métodos convencionales, la invención descrita en esta solicitud permite las pruebas físicas de un primer subconjunto de muestras de prueba y las pruebas virtuales de un segundo subconjunto de muestras de prueba. En otras realizaciones, la duración de prueba de las pruebas físicas puede reducirse incluso cuando no se reduce el número total de muestras de componente, pero esto sigue dando como resultado un ahorro de costes. Estos beneficios se aplican independientemente de si las pruebas de ejecución de éxito están dispuestas para ser pruebas simultáneas de muestras de prueba (tal como en la figura 6 anterior), las pruebas secuenciales de muestras de prueba (tal como en la figura 9 anterior), o una combinación/híbrido de pruebas simultáneas y secuenciales.

Una representación gráfica de ejemplo de una combinación de este tipo de pruebas simultáneas y secuenciales de muestras según los métodos de pruebas de fiabilidad descritos anteriormente se muestra en la figura 15, usando las etapas de proceso y los cálculos tal como se detalló anteriormente. Estos cálculos dan como resultado la representación gráfica de la figura 15 del nivel de confianza a lo largo del tiempo de la misma manera que los ejemplos proporcionados anteriormente, y, por tanto, se entenderá fácilmente sin una descripción detallada adicional en el presente documento. Con este fin, los cálculos y métodos funcionan igual cuando se someten a prueba las cuatro muestras mostradas en la figura 15 como en las pruebas simultáneas y los ejemplos de pruebas secuenciales proporcionados con detalle anteriormente. La única diferencia es que dos muestras en la primera variante se someten a prueba físicamente de manera secuencial (sometiéndose a prueba dos muestras en la segunda variante simultáneamente de manera virtual), y entonces dos muestras de la segunda variante se someten a prueba físicamente de manera secuencial (sometiéndose a prueba dos muestras de la primera variante simultáneamente de manera virtual).

Como con los ejemplos anteriores, la figura 15 muestra que los costes de las pruebas pueden reducirse en aproximadamente un 50 % (o más) con respecto a pruebas de fiabilidad convencionales que se basan completamente en el banco de pruebas físicas, en vista de reducir el número de muestras de prueba sometidas a prueba física de 8 a 4. Por consiguiente, los beneficios de la reducción de costes pueden lograrse en pruebas secuenciales, pruebas simultáneas y una combinación de las mismas. Con referencia específica a este ejemplo mostrado en la figura 15, la relación de ahorro de costes puede resumirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Relación de ahorro de costes} &= \\ &= 1 - \frac{4 \text{ muestras} + \text{costes de 4 pruebas}}{2 \frac{\text{muestras}}{\text{variante}} \times 4 \text{ variantes} + \text{costes de 8 pruebas}} = \\ &= 50 \% \end{aligned}$$

La combinación de pruebas físicas y virtuales en el contexto de ejecución de éxito es apropiada en varios tipos de contextos técnicos, incluyendo las pruebas mencionadas anteriormente de componentes de tren de accionamiento de HAWT. En un contexto de este tipo, productos similares que se ha determinado previamente que se comportan de manera similar durante las pruebas pueden someterse a prueba física y virtualmente según el método de pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito. De nuevo, la suposición que permite las pruebas virtuales es que estos productos similares continuarían comportándose de manera similar en las pruebas de fiabilidad física, haciendo de ese modo que sea discutible la necesidad de más de una variante que va a someterse a prueba físicamente. Dos cajas de engranajes de diseño similar, dos generadores de diseño similar o dos cojinetes de buje de diseño similar podrían estar sometidos a tal proceso, por ejemplo. En otro contexto apropiado para los métodos de esta invención, un conjunto de productos equivalentes o líneas de productos que se someterán a diferentes cargas de campo se someten a prueba usando el método, ya que tales productos equivalentes probablemente se comportarán de manera similar en pruebas de fiabilidad física. De nuevo, algunas de las pruebas físicas de las diferentes cargas serían redundantes, por lo que las pruebas virtuales pueden usarse junto con pruebas físicas para llegar a los mismos resultados y niveles de confianza.

Aunque se asume una similitud del 100 % en la descripción de realizaciones a modo de ejemplo anteriores, también podría establecerse un factor de similitud de menos del 100 % basándose en el grado de correlación o comparabilidad de resultados de prueba física típicos, usándose este factor de similitud para afectar a una o más de las variables de fiabilidad R, t, C o N en el proceso descrito anteriormente. El factor de similitud entre variantes puede estimarse basándose en una similitud de componentes que integran las variantes, los conjuntos de carga de diseño, los

parámetros de diseño, los riesgos de modo de fallo y las condiciones de prueba tales como cargas, factores de aceleración, y similares. En gran medida, independientemente de la cantidad específica de similitud entre las muestras y las variantes que se someten a prueba, las pruebas de ejecución de éxito físicas y virtuales según los métodos de pruebas de fiabilidad descritos anteriormente pueden usarse para reducir los costes de prueba globales y los recursos necesarios. La excepción a esta regla o beneficio es cuando hay un 0 % de similitud entre las variantes, ya que entonces las pruebas físicas para una variante no tendrán ninguna relación sobre cómo la segunda variante se sometería a prueba físicamente en el banco de pruebas. En términos generales, la cantidad de nivel de confianza de fiabilidad u otras variables de funcionamiento deseadas que se alcanzarán al aplicar las pruebas virtuales a otras variantes de producto disminuirá a medida que disminuya el factor de similitud.

Cuando el factor de similitud no es igual al 100 %, tal como se ha asumido en los ejemplos a lo largo de esta memoria descriptiva, se incluye una etapa modificada en el proceso de cálculo del nivel de confianza alcanzado durante una prueba exitosa de una muestra de prueba, que se describió previamente tal como se muestra en la figura 14. Con este fin, la ecuación de Lipson que se usa normalmente en la etapa 174 de este diagrama de flujo para calcular la variable no acumulativa n_{sij} se modifica de la siguiente manera para tener en cuenta el factor de similitud:

$$n_{sij} = f_{sij} \cdot n_{nij} \left(\frac{t_{nij}}{T_{si}} \right)^b$$

La variable f_{sij} es el factor de similitud, que se estima o se calcula de antemano para todas las variantes. Todos los demás valores en esta ecuación de Lipson modificada ya se conocen y/o se definieron anteriormente. Los factores de similitud pueden definirse en una matriz X por X para X variantes donde los valores a lo largo de una de las diagonales de la matriz siempre son el 100 %. En otras palabras, f_{sij} o f_{sji} siempre es igual al 100 % porque siempre va a considerarse someter a prueba una variante de manera idéntica a sí misma durante el proceso de pruebas, por tanto, el factor de similitud es del 100 %. Sin embargo, todos los demás valores de f_{sij} pueden no ser del 100 % como resultado de las diferencias entre cómo se someten a prueba las variantes en las pruebas de fiabilidad. Por tanto, la etapa de cálculo en el bloque 174 de la figura 14 no se ve afectada para las muestras sometidas a prueba físicamente en el/los ejemplo(s) anterior(es) donde estas son la primera muestra de prueba de variante 1, la segunda muestra de prueba de variante 2, y así sucesivamente (n_{s11} , n_{s22} , y así sucesivamente). Sin embargo, para todas las demás muestras, por ejemplo, aquellos que van a someterse a prueba virtualmente (n_{s12} , n_{s21} , y así sucesivamente), la variable “n” que se usa más tarde para calcular el nivel de confianza logrado mediante una prueba virtual exitosa se ve afectada por el cálculo anterior porque los valores de f_{sij} correspondientes pueden no ser del 100 %.

Ahora se proporciona un ejemplo del efecto de diferentes factores de similitud en los resultados de representación gráfica como los mostrados anteriormente para aclarar aún más este concepto. Las figuras 16 a 18 muestran resultados de prueba exitosa física/virtual a modo de ejemplo usando las mismas variantes y las mismas duraciones de prueba para las pruebas físicas (hechas por el proceso de los métodos de pruebas de fiabilidad descritos en detalle anteriormente), pero con diferentes factores de similitud entre las variantes. Con respecto a esto, la figura 16 muestra los resultados de aplicar los resultados de prueba física con línea continua para someter a prueba virtualmente otras muestras de prueba tal como se muestra con línea discontinua imaginaria. Tal como se observa fácilmente en la figura 16, puede producirse una transferencia completa de los resultados de pruebas entre variantes para cada una de las muestras de prueba primera y segunda cuando el factor de similitud es del 100 %. Ahora se compara esa representación gráfica con las diferencias en la figura 17, en la que el factor de similitud es el 30 %, y la figura 18, en la que el factor de similitud es el 0 %. Las pruebas virtuales proporcionan un nivel de confianza significativamente menor que puede transferirse usando la ejecución de prueba física exitosa de la otra muestra de prueba para cada una de las muestras de prueba primera y segunda. De hecho, en la situación de factor de similitud del 0 % de la figura 18, las pruebas virtuales no pueden proporcionar ninguna información valiosa de fiabilidad en esta circunstancia, y el nivel de confianza se estanca en estos segmentos de línea discontinua en consecuencia. Dicho de otra manera, los resultados físicos para variantes diferentes con factores de similitud del 0 % no pueden transferirse de ninguna manera significativa a las otras variantes.

Este resultado de variar la ecuación de Lipson en la etapa 174 de la figura 14 en las representaciones gráficas de nivel de confianza en las figuras 16 a 18 coincide con lo que esperaríamos un experto en la técnica, ya que la aplicabilidad y las ventajas de combinar pruebas físicas y virtuales son más evidentes cuando las variantes que están sometiéndose a prueba son muy similares entre sí. Por tanto, con la excepción de circunstancias en las que las variantes o productos que van a someterse a prueba tienen un factor de similitud del 0 %, los métodos de pruebas de fiabilidad de la invención descritos en el presente documento se ajustan adecuadamente basándose en la similitud de las variantes que se someten a prueba física y virtualmente. Por consiguiente, el nivel de confianza logrado, fiabilidad y/u otros resultados similares pueden ser adecuadamente fiables para el consumidor final de estos componentes accionados que se someten a prueba con estos métodos.

Volviendo a las figuras 19 y 20, se proporciona otra realización de las pruebas de ejecución de éxito física y virtual según los métodos de pruebas de fiabilidad de esta divulgación. Más particularmente, esta realización ilustra ahorros

de costes potenciales de una manera diferente a la reducción de las muestras de componente físicas que van a someterse a prueba, tal como ha sido un beneficio principal de muchos de los ejemplos descritos anteriormente. Con respecto a esto, productos de componente accionados tales como cajas de engranajes en una turbina eólica pueden desarrollarse y modificarse adicionalmente de manera simultánea con las pruebas de la línea de producto. Como tal, los resultados de pruebas físicas de versiones anteriores o variantes de un producto pueden estar disponibles cuando las últimas versiones o variantes están listas para pruebas de fiabilidad. Aplicando los métodos de pruebas de fiabilidad descritos en detalle anteriormente, estas pruebas físicas anteriores de las variantes anteriores pueden convertirse en resultados de pruebas virtuales de la nueva variante, y esto conduce a una reducción del tiempo de prueba total en el banco de pruebas que se requerirá para alcanzar el nivel de confianza deseado para la fiabilidad de producto de la nueva variante. Este mismo concepto puede aplicarse para reducir los tiempos de prueba para cualquier circunstancia en la que están disponibles pruebas físicas anteriores (y donde el factor de similitud no sea el 0 %, por las razones descritas anteriormente).

Volviendo a los detalles de la figura 19, los resultados del banco de pruebas físicas anteriores que usan pruebas de ejecución de éxito clásicas/con convencionales están disponibles para la variante 1 y la variante 2, tal como se muestra. La muestra de prueba individual de variante 1 se sometió a prueba durante un tiempo de 18 unidades de tiempo, que fue suficiente para alcanzar un nivel de confianza de un 50 % cuando se aplicaron las ecuaciones de ejecución de éxito y la metodología resumidas anteriormente en las figuras 12 a 14. Otra muestra de prueba individual de variante 2 se sometió a prueba durante un tiempo de duración de 4 unidades de tiempo. Estos resultados de prueba se muestran por las partes de representación gráfica de línea continua en las secciones DUT1 y DUT2 del gráfico de la figura 19. Una tercera variante va a someterse a prueba ahora de tal manera que alcance un nivel de confianza de un 50 % para una determinada fiabilidad establecida. Usando los cálculos de ecuación de ejecución de éxito clásicos descritos anteriormente con el número de muestras de componente establecido en dos, se determina que completar esta prueba con solo pruebas físicas de las muestras de la tercera variante (por ejemplo, calcular la t_n) requerirá que ambas muestras de prueba se ejecuten de manera exitosa en el banco de pruebas durante 22 unidades de tiempo cada una. En otras palabras, se necesitarán 2 muestras de prueba y 44 unidades de tiempo totales según la aplicación clásica o convencional de pruebas de ejecución de éxito para lograr el resultado deseado.

Sin embargo, las pruebas anteriores de las muestras individuales de la variante 1 y la variante 2 pueden aplicarse para dar como resultado una duración de prueba global reducida necesaria para las muestras de prueba de la tercera variante. Tal como se describió anteriormente en otros ejemplos, la prueba de la muestra de la variante 1 se convierte en resultados de prueba virtuales para las otras dos variantes de producto calculando el nivel de confianza que se habría logrado por las otras dos variantes de producto si la misma prueba para 18 unidades de tiempo se ejecutara de manera exitosa según las ecuaciones de ejecución de éxito. Dependiendo de las diferencias en los factores de aceleración y los factores de similitud, las variantes de producto segunda y tercera pueden alcanzar diferentes niveles de confianza después de esta primera prueba, tal como se indica en el gráfico de la figura 19. Luego se realiza un proceso similar para convertir la prueba exitosa de la muestra individual de la segunda variante (bajo la sección DUT2) en resultados de prueba virtuales del nivel de confianza acumulativo que se habría alcanzado para las otras variantes que se someten a la misma prueba exitosa durante 4 unidades de tiempo. Como con los ejemplos anteriores, los resultados de prueba virtual se representan gráficamente en el gráfico en formato de línea discontinua.

A continuación, se realizan cálculos para la tercera muestra de prueba, que proviene de la tercera variante de producto tal como se ha expuesto anteriormente. En este ejemplo, la tercera variante aún no alcanza el nivel de confianza del 50 % deseado al final de las 22 unidades de tiempo completas de pruebas físicas, por tanto, puede aplicarse teóricamente un período de tiempo de prueba similar para las otras dos variantes de producto, así como mediante el uso de procesos de cálculo descritos anteriormente. Al repetir estos cálculos para el nivel de confianza acumulativo logrado usando la cuarta muestra de prueba, que también proviene de la tercera variante de producto, se determina que esta cuarta muestra de prueba solo requiere pruebas exitosas durante 7 unidades de tiempo para alcanzar el nivel de confianza deseado del 50 %. Una vez más, este resultado de prueba física de la muestra, si tiene éxito en el banco de pruebas, se convierte también en resultados de prueba virtuales para las otras dos variantes de producto. El nivel de confianza acumulativo global logrado en cuanto a la fiabilidad de las tres variantes de producto se muestra a continuación en la representación gráfica de la figura 19, y puede observarse que las variantes de producto primera y segunda también exceden el nivel de confianza del 50 % deseado. En resumen, la aplicación de las pruebas de ejecución de éxito físicas y virtuales según los métodos de esta invención mejora los resultados de nivel de confianza logrados de todas las variantes de producto, al tiempo que también se reducen los costes de someter a prueba la tercera variante de producto más reciente o la más nueva.

El ahorro de costes para esta realización se muestra en detalle en un diagrama de cálculo en la figura 20, que también proporciona un procedimiento para calcular un ahorro de costes para cualquiera de las realizaciones descritas en el presente documento. Tal como se ha expuesto anteriormente, el punto central de la realización mostrada en la figura 19 era proporcionar pruebas de fiabilidad de la variante de producto nueva/tercera, por lo que el cálculo de los costes totales se limita solo a esa variante y las muestras de prueba correspondientes. Tal como se ha expuesto anteriormente, las pruebas de ejecución de éxito convencionales de la tercera variante de producto habrían necesitado dos muestras de prueba, cada una de las cuales se somete a prueba físicamente durante 22 unidades de tiempo cada una en el banco de pruebas para alcanzar el nivel de confianza deseado, y esas dos muestras y 44 unidades de tiempo totales se muestran en la parte superior del diagrama de cálculo de la figura 20. Para simplificar los resultados, el

coste de cada muestra se establece en un valor de 1, tal como es el coste de cada unidad de tiempo de duración de prueba (aunque tales costes serán normalmente valores diferentes basados en los detalles de las pruebas realizadas y los bancos de pruebas/recursos usados). Esto da como resultado un coste total para la prueba de ejecución de éxito clásica o convencional de 46. Pueden hacerse los mismos cálculos para las pruebas reales realizadas usando las pruebas de ejecución de éxito físicas y virtuales de la invención descrita en actualmente, siendo la única modificación que la segunda muestra de prueba ("muestra j = 4") se somete a prueba solo durante 7 unidades de tiempo de duración de prueba. Tal como se muestra en la parte inferior del diagrama de cálculo de la figura 20, los costes totales de las pruebas físicas y virtuales dan como resultado 31. Las siguientes ecuaciones (inicialmente introducidas anteriormente) pueden aplicarse para determinar los costes ahorrados, y la relación de ahorro de costes:

$$\begin{aligned} &\text{Costes ahorrados por Dragón Virtual} \\ &= (\text{costes asociados con pruebas de todas las variantes y muestras según Dragón Clásico}) \\ &- (\text{costes asociados con pruebas de todas las variantes y muestras según Dragón Virtual}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Relación de ahorro de costes} &= \frac{\text{costes ahorrados por Dragón Virtual}}{\text{costes asociados con pruebas según Dragón Clásico}} = \\ &= 1 - \frac{\text{costes asociados con pruebas según Dragón Virtual}}{\text{costes asociados con pruebas según Dragón Clásico}} \end{aligned}$$

Obsérvese que el término "dragón" se usa nuevamente como una abreviatura para las pruebas de fiabilidad de ejecución de éxito en estas ecuaciones. Aplicando estas ecuaciones a los costes totales determinados en el diagrama de cálculo de la figura 20, los costes ahorrados mediante el uso de las pruebas físicas y virtuales de la presente invención son iguales a la diferencia entre los costes totales de las pruebas de ejecución de éxito convencionales y los costes totales del método de pruebas físicas y virtuales, que es 15 en el ejemplo mostrado. Este valor puede usarse entonces para calcular una relación de ahorro de costes, que en este caso es de un 33 %. Por consiguiente, mediante el uso de los resultados de prueba anteriores de las otras variantes de producto cuando se realizan las pruebas de fiabilidad de variante 3, el ahorro de costes es de aproximadamente el 33 % en este ejemplo. El ahorro de costes específico variaría basándose en el coste diferente por muestra y el coste por unidad de tiempo de duración de prueba, cada uno de los cuales se estableció en 1 para simplificar el ejemplo. Sin embargo, este cálculo de la figura 20 confirma que los métodos de pruebas de fiabilidad físicas y virtuales de esta divulgación continúan proporcionando beneficios de ahorro de costes incluso cuando se requiere el mismo número de muestras de prueba para confirmar la fiabilidad a un nivel de confianza deseado.

Se entenderá a partir del ejemplo de las figuras 19 y 20 que cualquier combinación de duración de prueba, número de variantes de producto, número de muestras de prueba, factores de aceleración, y factores de similitud pueden usarse cuando se aplican los métodos de pruebas de fiabilidad físicas y virtuales de esta divulgación. Por ejemplo, los resultados de prueba de solo la primera variante podrían haberse aplicado para reducir la duración de prueba necesaria para la tercera variante en una alternativa a la mostrada en la figura 19, aunque sería evidente que la falta de resultados de la segunda variante de prueba reduciría el ahorro de costes logrado en tal alternativa, en comparación con el 33 % de ahorro de costes descrito anteriormente. Del mismo modo, si estuvieran disponibles más pruebas de las variantes primera y segunda y/u otras variantes, esos resultados de prueba también podrían usarse en otras alternativas similares para reducir además los costes necesarios para someter a prueba la tercera variante. Con este fin, dependiendo de la cantidad de pruebas anteriores realizadas y los factores de similitud (que determinan cómo de aplicables son esos resultados de prueba anteriores a la confianza de otras variantes), la duración de tiempo total y los costes pueden reducirse en una cantidad significativa, incluso más del 50 % tal como se muestra en el siguiente ejemplo a continuación.

La figura 21 muestra un ejemplo que es similar a la figura 19 en el que implica aplicar pruebas físicas anteriores de otras variantes de producto para reducir los costes de someter a prueba una nueva tercera variante de producto. Los ahorros de costes en este ejemplo son mayores como resultado de duraciones de prueba más largas de las muestras y variantes anteriores. El ejemplo de la figura 21 es el mismo que el expuesto anteriormente para la figura 19, con una excepción: la muestra de prueba individual de la segunda variante de producto se sometió a prueba físicamente durante 18 unidades de tiempo al igual que la muestra de prueba individual de la primera variante de producto, en lugar de las 4 unidades de tiempo mostradas en la realización de la figura 19. La tercera variante de producto es la misma que antes, lo que significa que las pruebas de ejecución de éxito convencionales basadas en cálculos de t_n anterior requerirían dos muestras de prueba para ejecutarse de manera exitosa durante 22 horas cada una en el banco de pruebas para lograr la fiabilidad deseada a un nivel de confianza del 50 % o más.

Sin embargo, la duración de prueba más larga de la segunda variante de producto ahora conduce a que el nivel de

confianza acumulativa de la tercera variante de producto alcance aproximadamente el 40 % basándose en las pruebas virtuales convertidas a partir de estas pruebas físicas anteriores de las variantes primera y segunda. Este es un nivel de confianza más alto que el punto similar en el gráfico de la figura 19 al final de las pruebas virtuales de la tercera variante de producto, y conduce a cálculos que determinan que solo una de las dos muestras de prueba de la tercera variante de producto necesita someterse a prueba físicamente de manera exitosa durante 14 unidades de tiempo de duración de prueba para alcanzar el nivel de confianza acumulativo deseado del 50 %. Esta prueba física también se muestra en la figura 21, junto con las pruebas virtuales correspondientes que pueden calcularse para las otras variantes de producto según los cálculos y las etapas del proceso expuestos anteriormente.

Cuando se calcula el ahorro de costes de la realización de la figura 21, puede usarse un diagrama de cálculo similar al mostrado en la figura 20. En este ejemplo, la cuarta muestra de prueba global se vuelve innecesaria, así como 30 unidades de tiempo totales de duración de prueba: 22 para la cuarta muestra no usada y 8 (diferencia entre 22 y 14) para la tercera muestra. Al aplicar las mismas suposiciones simplificadas de un coste por muestra de 1 y un coste por unidad de tiempo de 1, el ahorro de costes total para la realización de la figura 21 en cuanto a la variante 3 sería de 31 unidades de coste. La relación de ahorro de costes entonces sería de aproximadamente el 67 % en esta realización. Por tanto, el ahorro de costes beneficioso puede ser incluso de más del 50 % cuando hay suficientes resultados de prueba anteriores disponibles para su uso con los métodos de pruebas de fiabilidad de esta divulgación, y también es posible, basándose en este ejemplo, ahorrar tanto en el número de muestras de prueba necesarias para la prueba física así como en la duración de prueba.

En cualquier caso, se apreciará a partir de cada uno de los diferentes tipos de ejemplos y realizaciones anteriores que una reducción de duración de prueba (y/o una reducción de muestra de prueba) y el ahorro de costes asociado pueden resultar del uso de los métodos descritos en el presente documento con cualquier combinación existente de pruebas físicas anteriores, si incluyen uno o más de: número variable de muestras sometidas a prueba, duraciones arbitrarias de las pruebas, diferentes factores de aceleración, y diferencias en la fiabilidad lograda, nivel de confianza o vida útil de producto.

Tal como inicialmente se identificó anteriormente, otro contexto en el que los métodos de pruebas de fiabilidad descritos en el presente documento se consideran útiles son las pruebas de diferentes productos en paralelo. Por ejemplo, en el tren de accionamiento de una HAWT, la caja de engranajes y los elementos de cojinete principal a menudo se someten a prueba juntos en paralelo porque las cargas de entrada para esos componentes se generan a partir de la misma fuente compartida, en este caso, el rotor de turbina eólica. Aunque el número total de muestras de prueba física puede no ser capaz de reducirse del típico de dos muestras por componente, las pruebas físicas que deben producirse para ambos conjuntos de muestras pueden planificarse y evaluarse según reglas y metodología similares a las expuestas anteriormente, para lograr así la máxima eficiencia en las pruebas de fiabilidad. En lugar de usar las pruebas virtuales para transferir resultados de una variante o producto a otro, esta realización de los métodos de pruebas de fiabilidad proporciona una planificación y evaluación simple y eficiente de los resultados de prueba de diferentes productos en paralelo.

Con referencia específica a la figura 22, los resultados de prueba física para los componentes de tren de accionamiento se muestran como un aumento en el nivel de confianza (para fiabilidad o alguna otra variable de proceso) a lo largo de un tiempo de duración de prueba, similar a las realizaciones anteriores. Con este fin, los diferentes productos en esta realización que van a someterse a prueba en paralelo son la caja de engranajes y el cojinete principal de una HAWT (aunque también serán posibles otros ejemplos de diferentes componentes accionados juntos en uso según el alcance de esta divulgación, tal como un generador). Como con un diseño de pruebas de ejecución de éxito convencionales o clásicas, para las pruebas de fiabilidad se proporcionan dos muestras del mismo tren de accionamiento, incluyendo cada tren de accionamiento una caja de engranajes y un cojinete. Estos elementos están etiquetados como caja de engranajes 1 (muestra de prueba 1A) y cojinete 1 (muestra de prueba 1B) para el primer tren de accionamiento en la representación gráfica de la figura 22, y caja de engranajes 2 (muestra de prueba 2A) y cojinete 2 (muestra de prueba 2B) para el segundo tren de accionamiento. La planificación y evaluación de una prueba de este tipo se maneja usando la metodología y las etapas descritas anteriormente.

Con este fin, al igual que con las pruebas virtuales de muestras sometidas a prueba de manera no física, los componentes para un tren de accionamiento dado se someten a la misma duración de prueba a pesar de que estos elementos se someten a diferentes cargas. Por ejemplo, el cojinete principal se somete a cargas en forma de fuerzas y momentos alrededor de todos los ejes x, y, y z en el espacio tridimensional, excepto por el par de torsión, que es la carga relevante en la caja de engranajes. Una carga o tensión común en ambos componentes es la velocidad rotacional procedente del rotor, que se usa para ambos componentes sometidos a prueba en paralelo. Por tanto, sometiendo a prueba la caja de engranajes a las velocidades relevantes que van a usarse en la producción real, pueden aplicarse las mismas velocidades al cojinete que también se usarán en la producción real.

Por tanto, la caja de engranajes puede usarse para accionar la planificación de las pruebas físicas para ambos componentes de tren de accionamiento. Con respecto a esto, la figura 23 ilustra un diagrama de flujo 200 que muestra una serie de etapas que pueden usarse en esta realización de los métodos de pruebas de fiabilidad de la presente divulgación para planificar e implementar eficientemente las pruebas de los componentes de tren de accionamiento en paralelo. Al igual que con las realizaciones y productos anteriores, los factores de aceleración independientes para

las pruebas en el banco de pruebas 42 estarán definidos por el cojinete y la caja de engranajes, y el método comienza haciendo que el procesador 44 recupere de la memoria 46 o de un dispositivo de entrada de usuario (no mostrado, puede ser el mismo que el dispositivo de salida 48) diversas constantes de entrada y valores necesarios para los cálculos y el proceso de pruebas, en el bloque 202, incluyendo los diversos factores de aceleración para cada muestra de prueba en los trenes de accionamiento primero y segundo (también denominados subconjuntos de muestras de prueba en el diagrama de flujo 200). Entonces, la duración de prueba t_n de la caja de engranajes del primer tren de accionamiento puede calcularse por el procesador 44 usando el factor de aceleración correspondiente, en el bloque 204. Este cálculo puede realizarse usando algunas de las etapas mostradas en la figura 13 y descritas anteriormente. Por ejemplo, este cálculo de la duración de prueba puede basarse en suposiciones similares a una prueba de ejecución de éxito clásica o convencional con respecto al número de muestras y similares.

Basándose en la representación gráfica en la figura 22 y la disposición descrita anteriormente, se apreciará que esta duración de prueba calculada para la caja de engranajes en el bloque 204 también es la duración de prueba para el cojinete en el primer tren de accionamiento o subconjunto. Aunque los objetivos de fiabilidad y los factores de aceleración pueden diferir entre la caja de engranajes y el cojinete, la duración de tiempo siempre será la misma para estos componentes en vista de los diferentes productos que se someten a prueba simultáneamente en paralelo en el banco de pruebas 42. El método continúa entonces sometiendo a prueba físicamente el primer tren de accionamiento o el primer subconjunto de muestras de prueba en el banco de pruebas 42 en el bloque 206. El procesador 44 determina entonces si la prueba física del primer tren de accionamiento fue exitosa en el banco de pruebas 42 en el bloque 208, y si no, puede notificarse al usuario, tal como en el dispositivo de salida 48, que la prueba de fiabilidad no tuvo éxito en el bloque 210 (entonces la prueba de fiabilidad finalizaría). Si la prueba del primer subconjunto o primer tren de accionamiento en este ejemplo es exitosa, puede calcularse un nivel de confianza alcanzado al final de la prueba física del primer tren de accionamiento para cada muestra de prueba en el primer tren de accionamiento mediante el procesador 44 en el bloque 212, en gran medida según las etapas de proceso expuestas en la figura 14 y descritas anteriormente. En esta realización, los valores de nivel de confianza se calcularán tanto para la primera caja de engranajes como para el primer cojinete, y esos valores pueden representarse gráficamente en el gráfico tal como se muestra en la primera parte de la figura 22.

Entonces, suponiendo que el objetivo de fiabilidad se establece para el cojinete y la caja de engranajes, que, en aras de la simplicidad, es el mismo nivel de confianza del 50 % para ambas partes tal como se expone en los ejemplos anteriores, la duración necesaria de la prueba del segundo tren de accionamiento puede determinarse usando cálculos similares a los expuestos anteriormente para pruebas virtuales de componentes con referencia a las figuras 12 a 14. En el ejemplo específico mostrado en la figura 22, el cojinete ha alcanzado un nivel de confianza más bajo después de someter a prueba el primer tren de accionamiento (muestras 1A y 1B) que la caja de engranajes. Con los mismos elementos idénticos que se someten a prueba en el segundo tren de accionamiento o segundo subconjunto de muestras de prueba, se entenderá inmediatamente que el cojinete (muestra 2B) definirá la duración mínima de la prueba física para que las muestras de prueba 2A y 2B alcancen los objetivos de nivel de confianza deseados. Con este fin, las ecuaciones de ejecución de éxito descritas anteriormente en relación con las pruebas secuenciales de componentes se usarán para determinar durante cuánto tiempo es necesario ejecutar una prueba en el segundo tren de accionamiento (específicamente el segundo cojinete) con el fin de hacer que el segundo cojinete, y, por tanto, ambos componentes, alcance el nivel de confianza acumulativo deseado cuando se combina con la prueba exitosa del primer tren de accionamiento. En otras palabras, el método continúa haciendo que el procesador 44 calcule una duración de prueba mínima necesaria para un producto (el cojinete) en el segundo tren de accionamiento usando las ecuaciones de ejecución de éxito y los resultados de las pruebas físicas en el primer tren de accionamiento, en el bloque 214.

Por consiguiente, de manera similar a las realizaciones de las figuras 19 a 21, los resultados de prueba reales anteriores se usan en la evaluación y el cálculo de una duración de prueba para el siguiente subconjunto de productos o muestras que van a someterse a prueba, que es el segundo tren de accionamiento en esta realización. Al igual que con el primer tren de accionamiento, la segunda caja de engranajes debe accionarse durante la misma duración de prueba que el segundo cojinete con estos productos sometidos a prueba en paralelo en el banco de pruebas 42. El método continúa entonces sometiendo a prueba físicamente el segundo tren de accionamiento o el segundo subconjunto de muestras de prueba en el banco de pruebas 42 en el bloque 216, usando específicamente la duración mínima calculada para el segundo tren de accionamiento (para evitar así el uso excesivo o el desperdicio de recursos de pruebas). El procesador 44 determina entonces si la prueba física del segundo tren de accionamiento fue exitosa en el banco de pruebas 42 en el bloque 218, y si no, puede notificarse al usuario, tal como en el dispositivo de salida 48, que la prueba de fiabilidad no tuvo éxito en el bloque 220 (entonces la prueba de fiabilidad finalizaría). Si la prueba del segundo tren de accionamiento en esta realización es exitosa, un nivel de confianza acumulativo logrado al final de la prueba física del segundo tren de accionamiento puede calcularse por el procesador 44 para cada muestra de prueba en el segundo tren de accionamiento en el bloque 222, en gran medida según las etapas del proceso expuestas en la figura 14 y descritas anteriormente. En este ejemplo, se definirá un nivel de confianza acumulativo tanto para la caja de engranajes como para el cojinete. Los resultados de nivel de confianza se notifican al usuario mediante el dispositivo de salida 48 en el bloque 224, tal como representando gráficamente estos valores en el gráfico a lo largo del tiempo como se muestra en la segunda parte de la figura 22. Esta etapa también lleva el método mostrado en el diagrama de flujo 200 de la figura 23 al final, ya que los niveles de confianza deseados se han notificado al usuario y el proceso de pruebas de fiabilidad según esta realización de la invención está completo.

Tal como se muestra en la representación gráfica de resultados de la figura 22, después de completar con éxito las pruebas físicas para los subconjuntos primero y segundo de muestras, que son los trenes de accionamiento primero y segundo en esta realización, ambos de los diferentes productos (caja de engranajes y cojinete) se calcularán para exceder el nivel de confianza deseado del 50 %. Además, las pruebas físicas se han llevado a cabo con la máxima eficiencia porque la planificación de usar las muestras de prueba y el banco de pruebas 42 durante una cantidad mínima de tiempo requerida evitará costes y retrasos innecesarios asociados con las pruebas de fiabilidad. También puede considerarse que el proceso expuesto en la figura 23 se aplica en el contexto de las realizaciones expuestas anteriormente en las figuras 19 a 21, en el que las pruebas de una variante de producto posterior se reducen aplicando los resultados de prueba física de muestras de prueba anteriores, que en ese caso era para variantes anteriores del producto. Omitiendo la etapa del bloque 204 de calcular la duración de prueba para el primer subconjunto de muestras de prueba en el método de la figura 23, que el diagrama de flujo 200 contiene efectivamente las mismas etapas descritas anteriormente para aplicar cualquier resultado de pruebas de variante anterior para reducir la duración de tiempo necesaria para pruebas de fiabilidad exitosas de una nueva variante de producto. Por tanto, el proceso de la figura 23 es en gran medida aplicable a algunas realizaciones que evalúan variantes de producto para ahorrar costes de pruebas, así como el contexto de planificación y evaluación de diferentes productos sometidos a prueba en paralelo asociados con la figura 22.

Por consiguiente, aunque ninguna muestra de prueba queda sin usar por el banco de pruebas físicas en el ejemplo de la figura 22 de diferentes productos sometidos a prueba en paralelo, las pruebas se planifican y se evalúan usando muchas de las mismas etapas y ecuaciones de proceso que los otros ejemplos proporcionados anteriormente de los métodos de pruebas de fiabilidad. Por tanto, incluso sin usar explícitamente "pruebas virtuales" de muestras adicionales mediante la aplicación de resultados de prueba física a muestras de componente sometidas a prueba de manera no física, los métodos descritos en el presente documento garantizan la simplicidad y la eficiencia al planificar y evaluar tales pruebas de diferentes productos. De hecho, tal planificación y evaluación evita cualquier riesgo de tiempos de duración de prueba física excesivos, que de otro modo podría aplicarse a estas muestras en ausencia de los métodos descritos en el presente documento. Un beneficio de este tipo es efectivamente similar a una reducción en los costes de pruebas, aunque las fórmulas numéricas para la relación de ahorro de costes no se han aplicado en esta realización. En cualquier caso, los métodos de pruebas de fiabilidad de la presente divulgación proporcionan eficiencias y ventajas en la planificación y evaluación de diferentes productos que van a someterse a prueba en paralelo.

Combinando pruebas de fiabilidad físicas y virtuales (o al menos los métodos de cálculo de las mismas) en los métodos descritos en el presente documento, las pruebas de fiabilidad y el uso de sistemas de prueba de fiabilidad se optimizan en cuanto a eficiencia en tiempo y costes. Por consiguiente, se proporcionan ventajas tanto para el fabricante de componentes de HAWT como para el cliente, que recibe el mismo nivel de garantía de fiabilidad durante la duración de tiempo de funcionamiento u otros parámetros operativos, sin retrasos ni costes adicionales asociados con las pruebas convencionales. Los métodos de pruebas de fiabilidad más eficientes permiten un recorrido más rápido entre la concepción del producto y la producción y/o venta completa en el mercado, lo que ayuda a avanzar la tecnología más rápidamente en el campo de las turbinas eólicas u otros campos cuando se usan los métodos de esta invención. Además, el objetivo de minimizar el tiempo de inactividad no programado para los componentes sometidos a prueba de una HAWT continúa lográndose cuando se usa el método de pruebas de fiabilidad. Del mismo modo, se logran beneficios similares cuando se usa este método de pruebas de fiabilidad en cualquier campo donde es necesario someter a prueba los componentes accionados para la fiabilidad antes de su instalación.

Aunque la presente invención se ha ilustrado mediante la descripción de diversas realizaciones de la misma, y aunque las realizaciones se han descrito con considerable detalle, no se pretende restringir o limitar de ninguna manera el alcance de las reivindicaciones adjuntas a tal detalle.

Se harán evidentes fácilmente para los expertos en la técnica ventajas y modificaciones adicionales. Por tanto, la invención en sus aspectos más amplios no se limita a los detalles específicos ni a los ejemplos ilustrativos mostrados y descritos. Por consiguiente, pueden hacerse desviaciones de tales detalles sin apartarse del alcance del concepto inventivo general, definido por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un método para someter a prueba la fiabilidad de una pluralidad de componentes accionados (22, 24, 30), en el que se proporciona al menos una muestra de prueba (50) para cada uno de la pluralidad de componentes accionados (22, 24, 30), las muestras de prueba (50) se dividen en un primer subconjunto y un segundo subconjunto, y el método comprende:

calcular, para cada uno de la pluralidad de componentes accionados (22, 24, 30), un factor de aceleración (AF) para pruebas de fiabilidad en un banco de pruebas (42), definiendo el factor de aceleración (AF) una relación entre la vida útil de producto bajo cargas de campo y la vida útil de producto bajo cargas aceleradas en el banco de pruebas (42);

realizar, mediante el banco de pruebas (42) y una unidad de accionamiento (52) acoplada operativamente a un procesador (44), pruebas de ejecución de éxito físicas del primer subconjunto de muestras de prueba (50), en el que cada muestra de prueba (50) en el primer subconjunto se hace funcionar por la unidad de accionamiento (52) durante una misma duración de prueba;

calcular, mediante el procesador (44), un primer nivel de confianza logrado en cuanto a la fiabilidad de cada uno de los componentes accionados basándose en las pruebas de ejecución de éxito físicas del primer subconjunto de muestras de prueba (50); caracterizado por:

calcular, mediante el procesador (44), una duración de prueba mínima para una muestra de prueba del segundo subconjunto de muestras de prueba (50) que se requerirá para confirmar la fiabilidad de cada uno de los componentes accionados (22, 24, 30) a un nivel de confianza objetivo predeterminado, en el que la duración de prueba mínima determina durante cuánto tiempo es necesario que se ejecute una prueba sobre el segundo subconjunto de muestras de prueba (50) con el fin de que las muestras de prueba del segundo subconjunto de muestras de prueba alcancen un nivel de confianza acumulativo deseado cuando se combinan con las pruebas de ejecución de éxito físicas del primer subconjunto de muestras de prueba (50), basándose la duración de prueba mínima en el factor de aceleración (AF) de una muestra de prueba del segundo subconjunto de muestras de prueba (50) y basándose en el primer nivel de confianza logrado;

realizar, mediante el banco de pruebas (42) y la unidad de accionamiento (52), pruebas de ejecución de éxito físicas del segundo subconjunto de muestras de prueba (50), en la que el banco de pruebas (42) somete a prueba cada muestra de prueba del segundo subconjunto de muestras de prueba (50) durante la duración de prueba mínima; y

notificar, mediante un dispositivo de salida (48) acoplado operativamente al procesador (44), un nivel de confianza acumulativo logrado en cuanto a la fiabilidad de la pluralidad de componentes accionados (22, 24, 30) basado en la realización exitosa de pruebas de ejecución de éxito físicas,

caracterizado porque la pluralidad de componentes accionados (22, 24, 30) incluye una pluralidad de diferentes productos (22, 24, 30) sometidos a prueba en paralelo en el banco de pruebas (42), y caracterizado porque el primer subconjunto de muestras de prueba (50) incluye uno de cada uno de la pluralidad de diferentes productos (22, 24, 30) sometidos a prueba en paralelo, y el segundo subconjunto de muestras de prueba (50) también incluye uno de cada uno de la pluralidad de diferentes productos (22, 24, 30) sometidos a prueba en paralelo, y

caracterizado porque realizar las pruebas de ejecución de éxito físicas del segundo subconjunto de muestras de prueba (50), que es durante la duración de prueba mínima que se ha calculado, minimiza el uso del banco de pruebas (42).

2. El método según la reivindicación 1, que comprende además:

calcular, mediante el procesador (44), una duración de prueba para una muestra de prueba del primer subconjunto de muestras de prueba (50), basándose en el factor de aceleración (AF) de la muestra de prueba del primer subconjunto de muestras de prueba (50).

3. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que calcular la duración de prueba para una seleccionada de una de las muestras de prueba (50) comprende además:

aplicar una ecuación de Lipson para calcular una duración de prueba modificada en condiciones normales para el componente accionado (22, 24, 30) asociado con la seleccionada de las muestras de prueba (50); y

calcular una duración de prueba modificada en condiciones de banco de pruebas aceleradas para el componente accionado (22, 24, 30) asociado con la seleccionada de las muestras de prueba (50), basándose en el factor de aceleración (AF) correspondiente y la al menos una duración de prueba modificada en

condiciones normales para el componente accionado (22, 24, 30) asociado con la seleccionada de las muestras de prueba (50).

4. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que realizar las pruebas de ejecución de éxito físicas para una primera muestra de prueba seleccionada (50) comprende:

montar la primera muestra de prueba (50) en el banco de pruebas (42); y

hacer funcionar la unidad de accionamiento (52) para aplicar cargas aceleradas a la primera muestra de prueba (50) en el banco de pruebas (42) durante una duración de prueba asociada con la primera muestra de prueba (50).

5. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que calcular un nivel de confianza acumulativo logrado en cuanto a la fiabilidad tras una prueba exitosa de una muestra de prueba seleccionada (50) comprende además:

aplicar una ecuación de Lipson para calcular un número total de muestras (50) que necesitarán someterse a prueba durante una duración de prueba original igual a un tiempo de ejecución deseado en uso durante el que está sometiéndose a prueba la fiabilidad;

aplicar una ecuación de ejecución de éxito usando el número total de muestras (50) para calcular un nivel de confianza individual no acumulativo logrado mediante una prueba exitosa de la muestra de prueba seleccionada (50);

aplicar una función de suma para calcular un número total acumulativo de muestras (50) que necesitarán someterse a prueba durante la duración de prueba original para todas las muestras de prueba (50) del componente accionado (22, 24, 30) sometido a prueba hasta el momento; y

aplicar la ecuación de ejecución de éxito usando el número total acumulativo de muestras (50) para calcular el nivel de confianza acumulativo logrado al final de pruebas exitosas de la muestra de prueba seleccionada (50) y todas las demás muestras de prueba (50) del componente accionado (22, 24, 30) sometidas a prueba hasta el momento.

6. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la pluralidad de componentes accionados (22, 24, 30) están definidos por elementos de tren de potencia que van a usarse en una o más turbinas eólicas.

7. El método según la reivindicación 6, en el que los elementos de tren de potencia incluyen uno o más de un cojinete principal (30), un generador (24) y una caja de engranajes (22).

8. El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el factor de aceleración (AF) se calcula aplicando la vida útil media del 63 % de la distribución de Weibull a una relación de una vida útil media de producto bajo cargas de campo y una vida útil media de producto bajo cargas de banco de pruebas aceleradas.

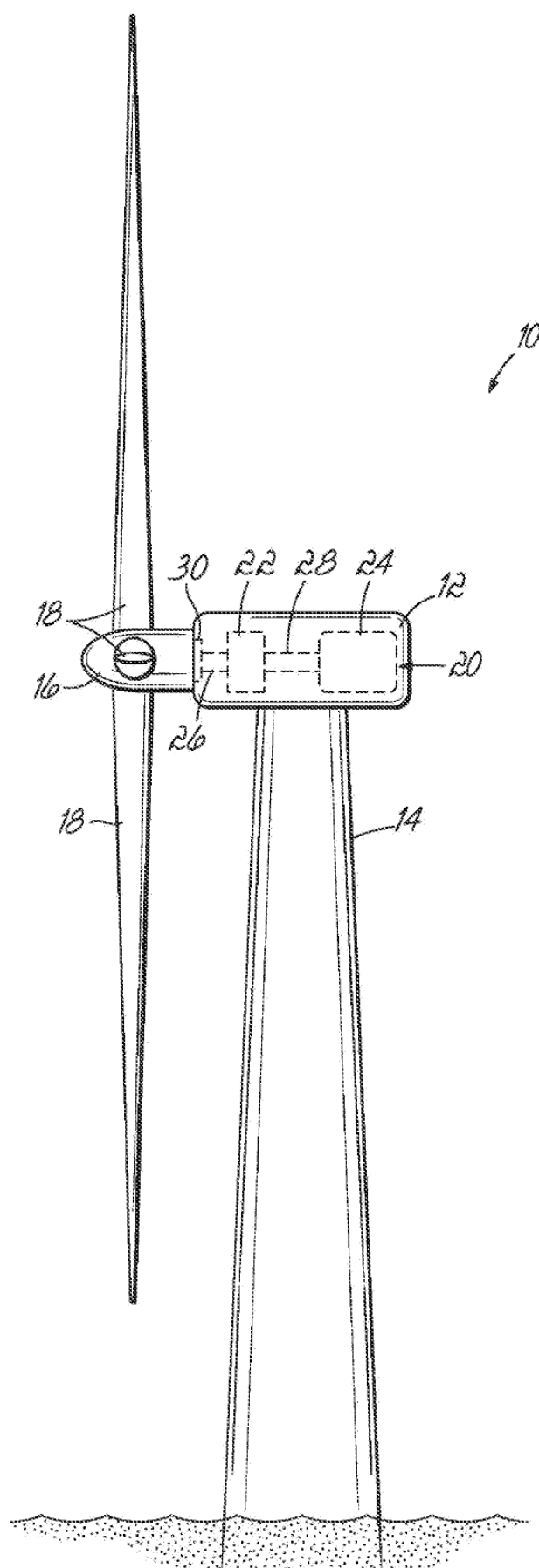


FIG. 1

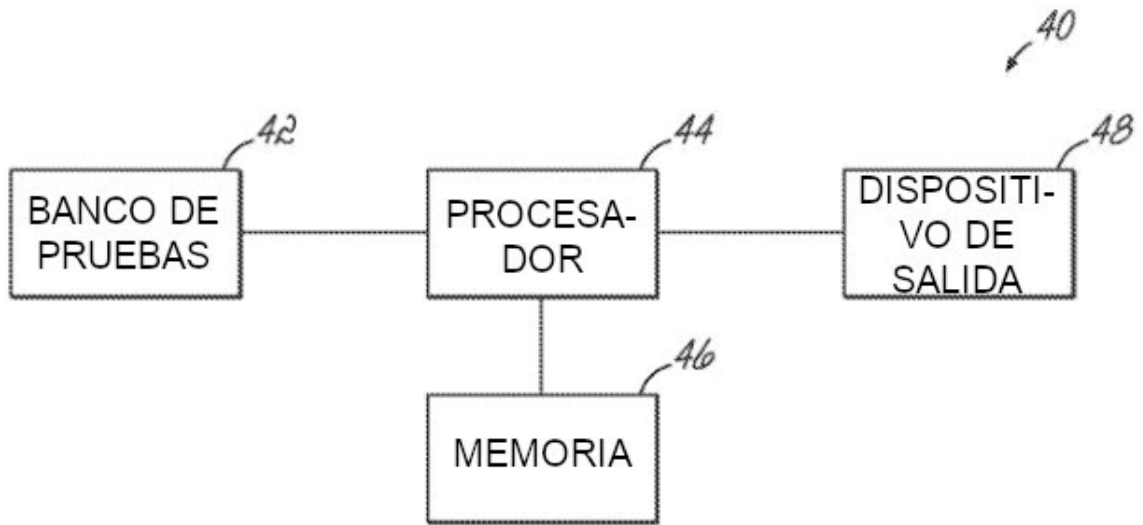


FIG. 2

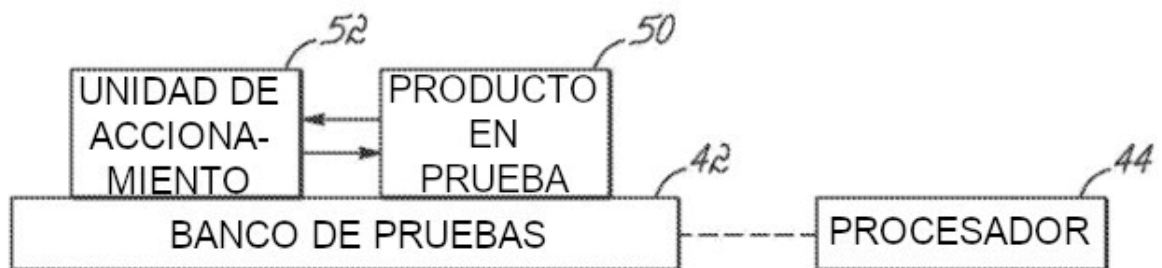


FIG. 3

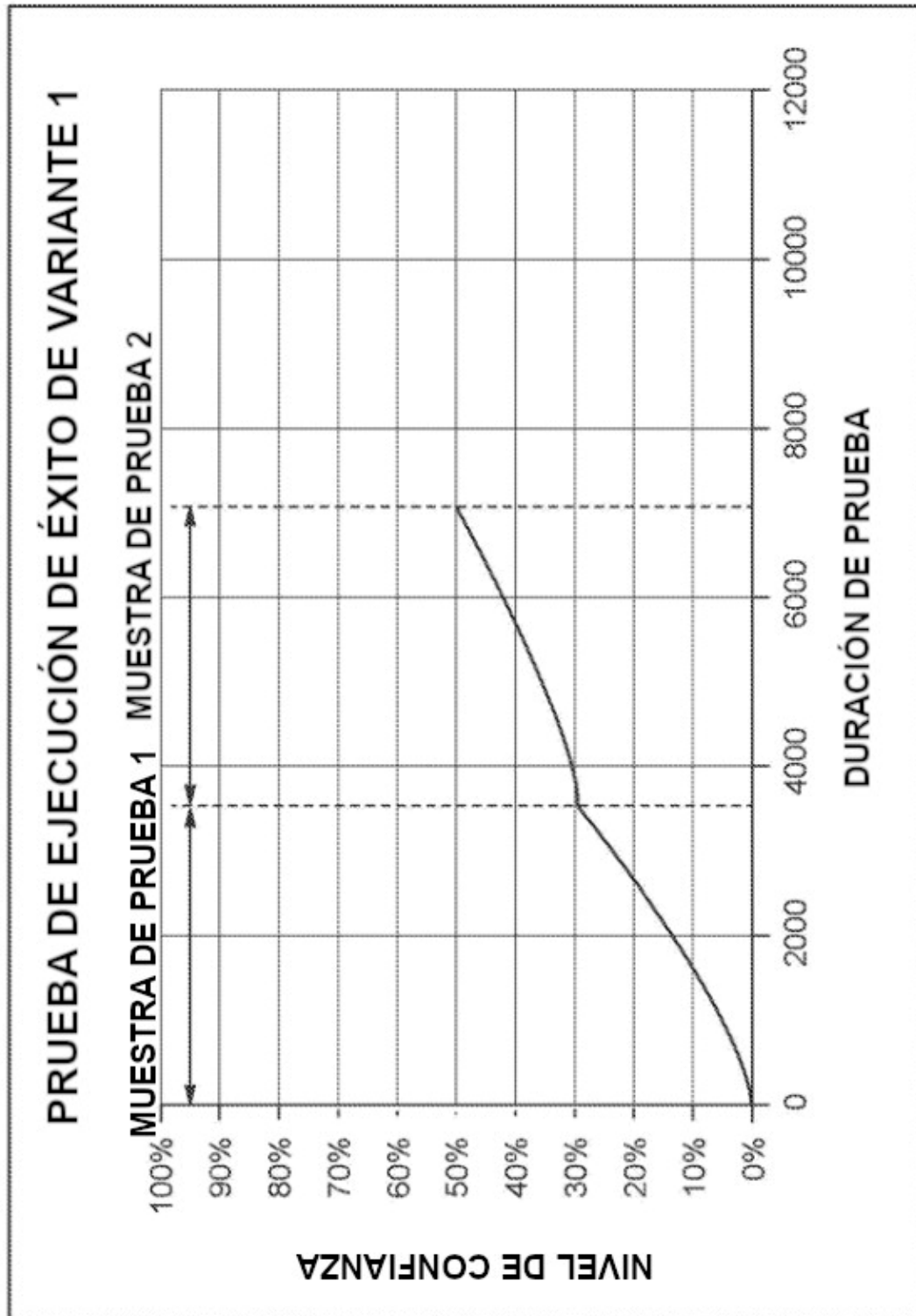


FIG. 4

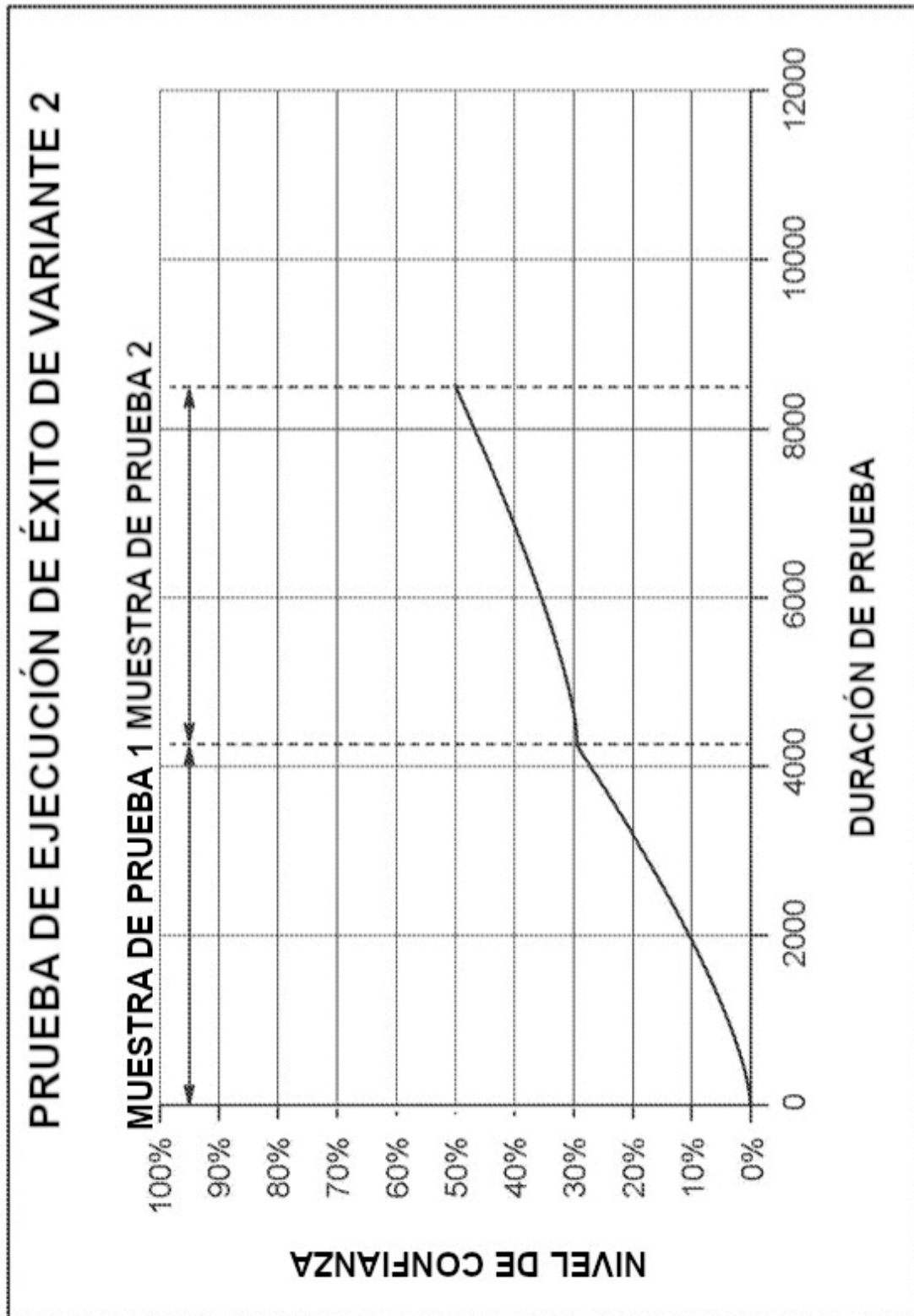


FIG. 5

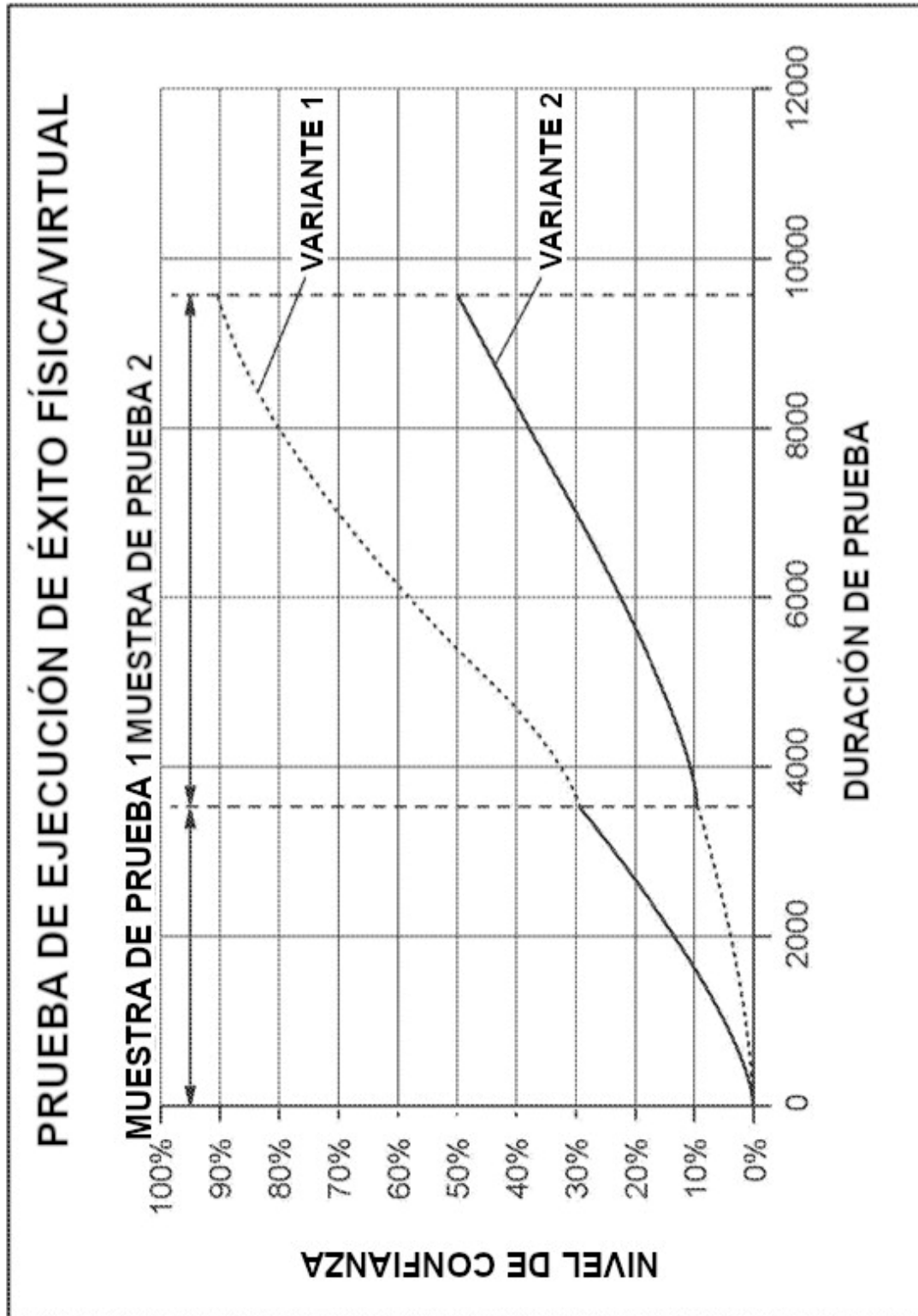


FIG. 6

Δ	A	C	E	F	G	I	M	O
3								
4			R 0,9					
5			C 0,5					
6			Ns	=REDONDEAR(LN(1-F5)/LN(F4);0)	muestras			
7			Nh 4		muestras			
8			b 1,5					
9			Ts 10		horas			
12			Tn	=F9*(F6/F7)^(17F8)	horas			
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
no acumulativo								
acumulativo								
	J	nn	tn	ns	c	Ns	C	
0								
1		1	=F\$12	=E22*(F22/\$F\$9)^\$F\$8	=1-(F\$4^(G22))	=SUM(\$G\$22:G22)	=1-(F\$4^M22)	
2		1	=F\$12	=E23*(F22/\$F\$9)^\$F\$8	=1-(F\$4^(G23))	=SUM(\$G\$22:G23)	=1-(F\$4^M23)	
3		1	=F\$12	=E24*(F22/\$F\$9)^\$F\$8	=1-(F\$4^(G24))	=SUM(\$G\$22:G24)	=1-(F\$4^M24)	
4		1	=F\$12	=E25*(F22/\$F\$9)^\$F\$8	=1-(F\$4^(G25))	=SUM(\$G\$22:G25)	=1-(F\$4^M25)	

FIG. 7

Δ	A	C	E	F	G	I	M	O
3								
4			R	0,9				
5			C	0,5				
6			Ns	7,00	muestras			
7			Nn	4	muestras			
8			b	1,5				
9			Ts	10	horas			
12			Tn	14,5	horas			
18								
19								
20		j	nn	tn	ns	c	Ns	C
21		0						
22		1	1	14,5	1,75	0,17	1,75	0,168
23		2	1	14,5	1,75	0,17	3,50	0,308
24		3	1	14,5	1,75	0,17	5,25	0,425
25		4	1	14,5	1,75	0,17	7,00	0,522

FIG. 8

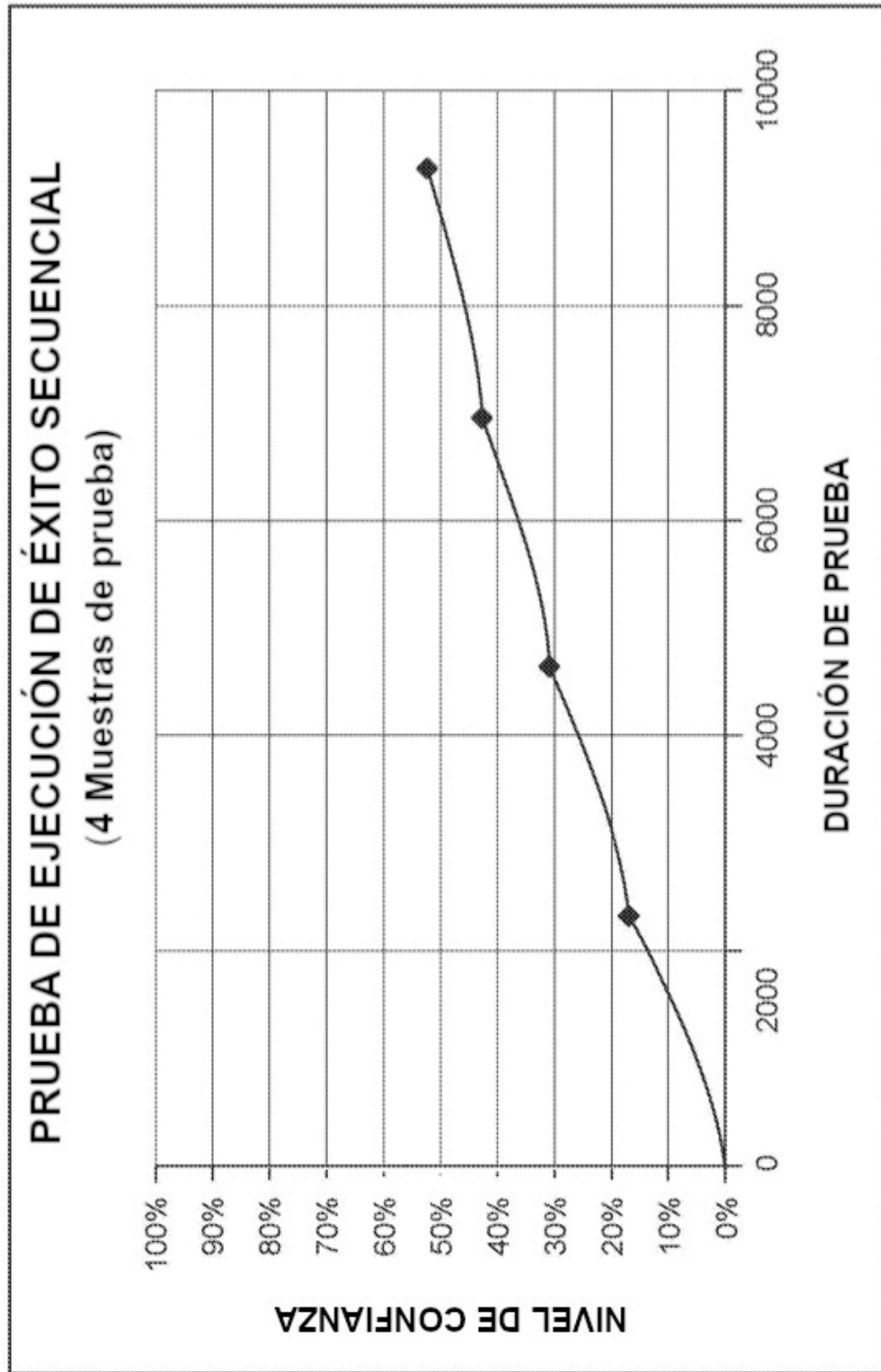


FIG. 9

variante		muestra		no acumulativo		acumulativo	
i	j	nn	tn	ns	c	Ns	C
1	0						
1	1	nn11	tn11	ns11	c11	Ns11	C11
1	2	nn12	tn12	ns12	c12	Ns12	C12
1	3	nn13	tn13	ns13	c13	Ns13	C13
1	4	nn14	tn14	ns14	c14	Ns14	C14
2	0						
2	1	nn21	tn21	ns21	c21	Ns21	C21
2	2	nn22	tn22	ns22	c22	Ns22	C22
2	3	nn23	tn23	ns23	c23	Ns23	C23
2	4	nn24	tn24	ns24	c24	Ns24	C24
3	0						
3	1	nn31	tn31	ns31	c31	Ns31	C31
3	2	nn32	tn32	ns32	c32	Ns32	C32
3	3	nn33	tn33	ns33	c33	Ns33	C33
3	4	nn34	tn34	ns34	c34	Ns34	C34
4	0						
4	1	nn41	tn41	ns41	c41	Ns41	C41
4	2	nn42	tn42	ns42	c42	Ns42	C42
4	3	nn43	tn43	ns43	c43	Ns43	C43
4	4	nn44	tn44	ns44	c44	Ns44	C44

FIG. 10

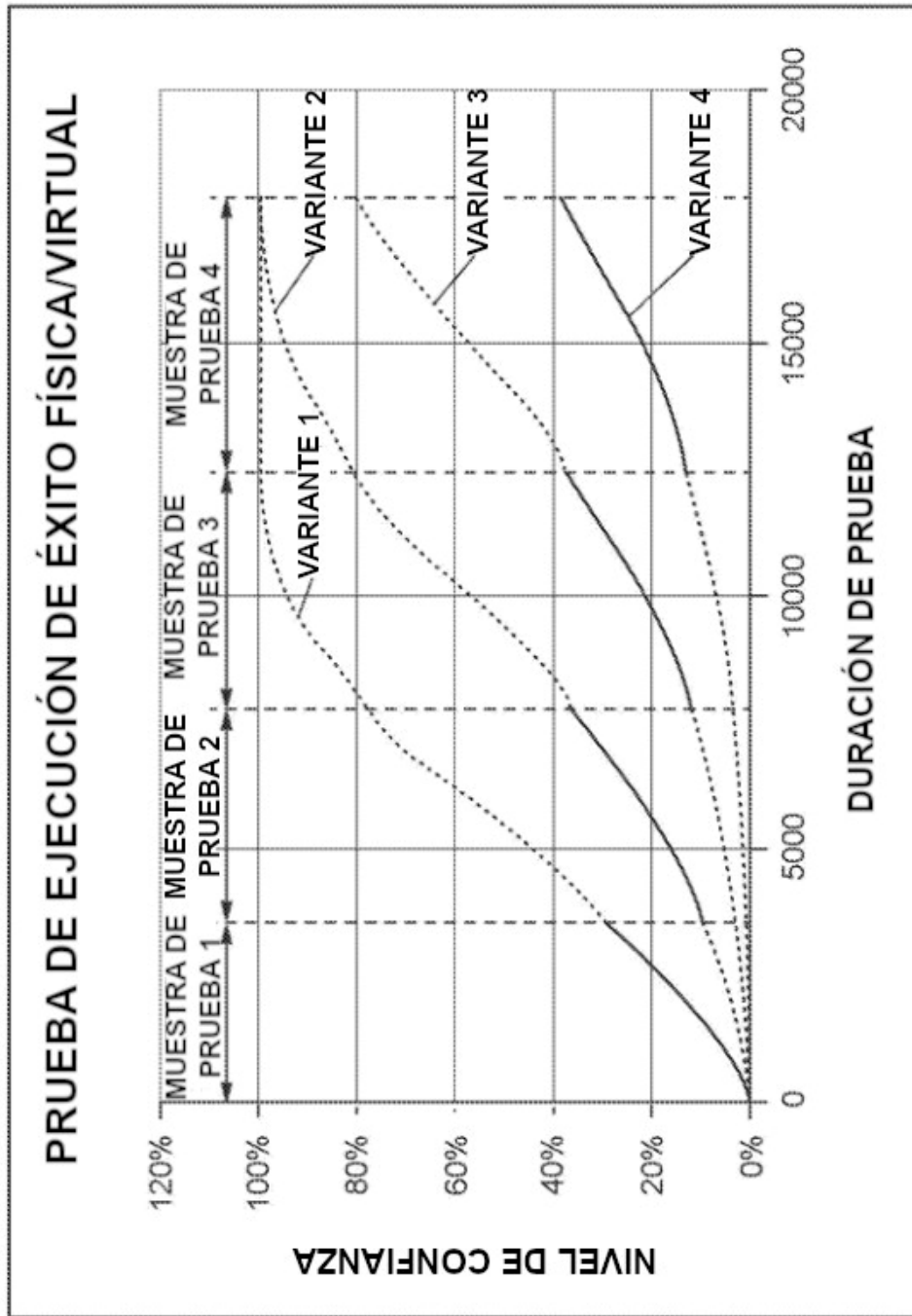
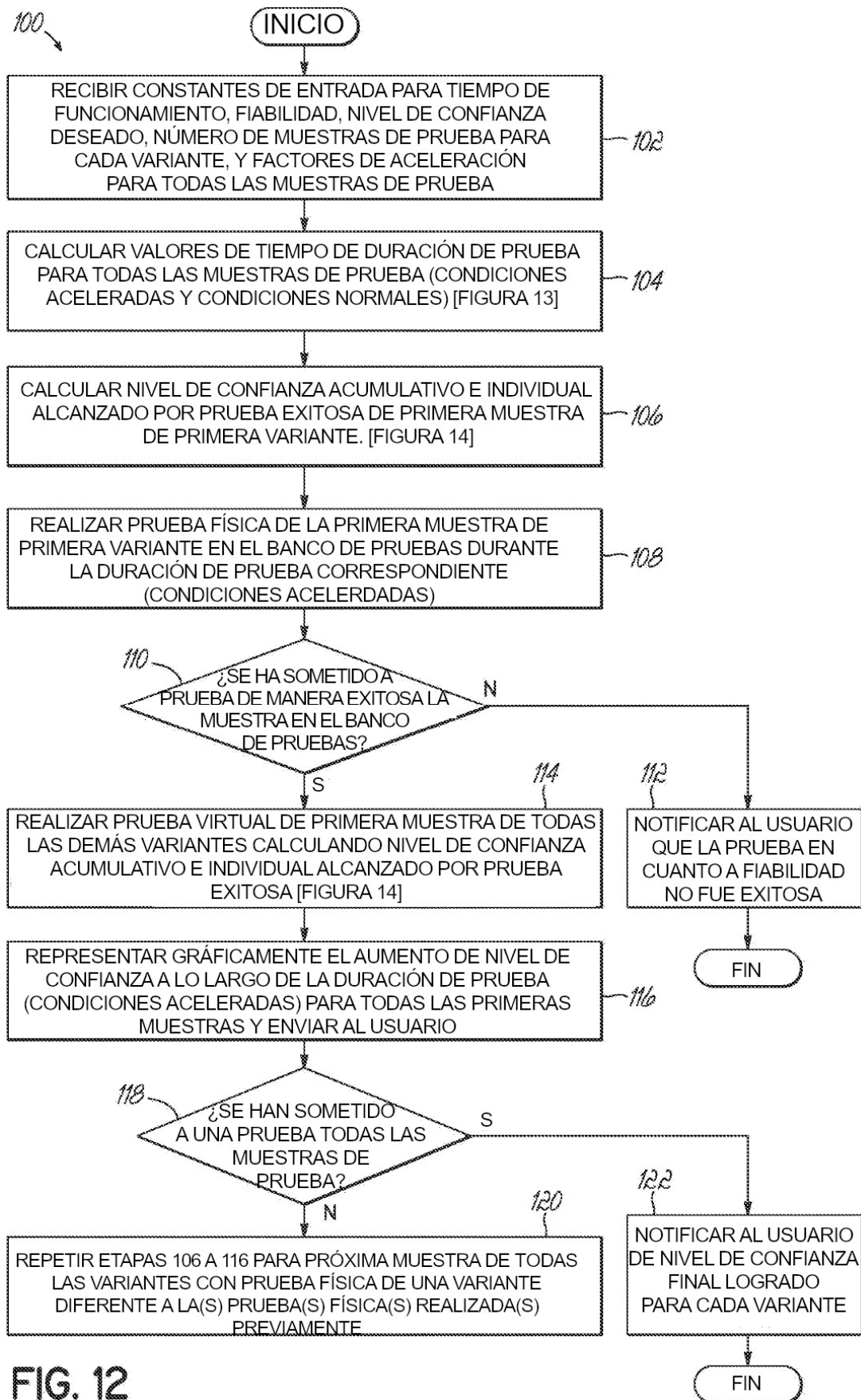


FIG. 11



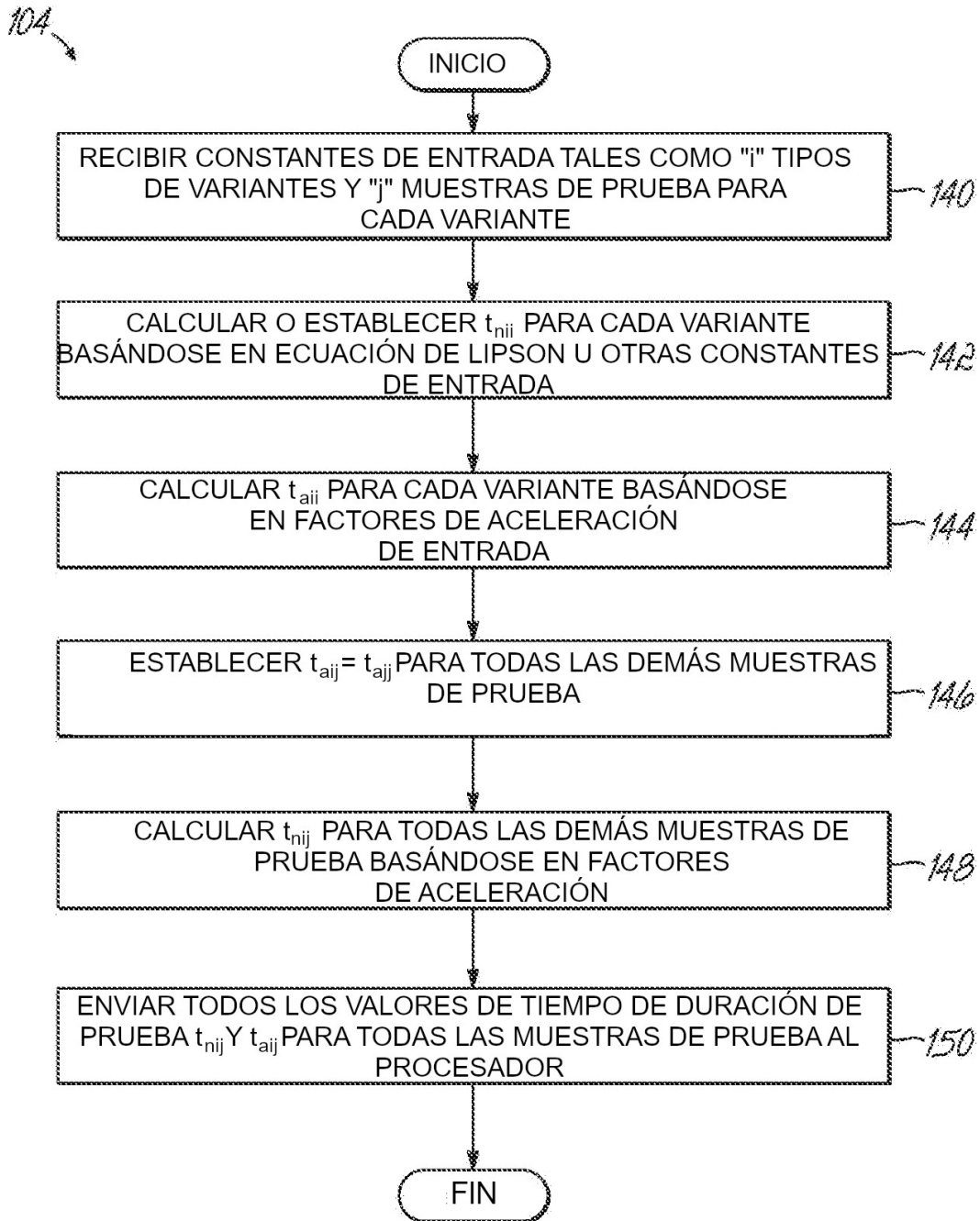


FIG. 13

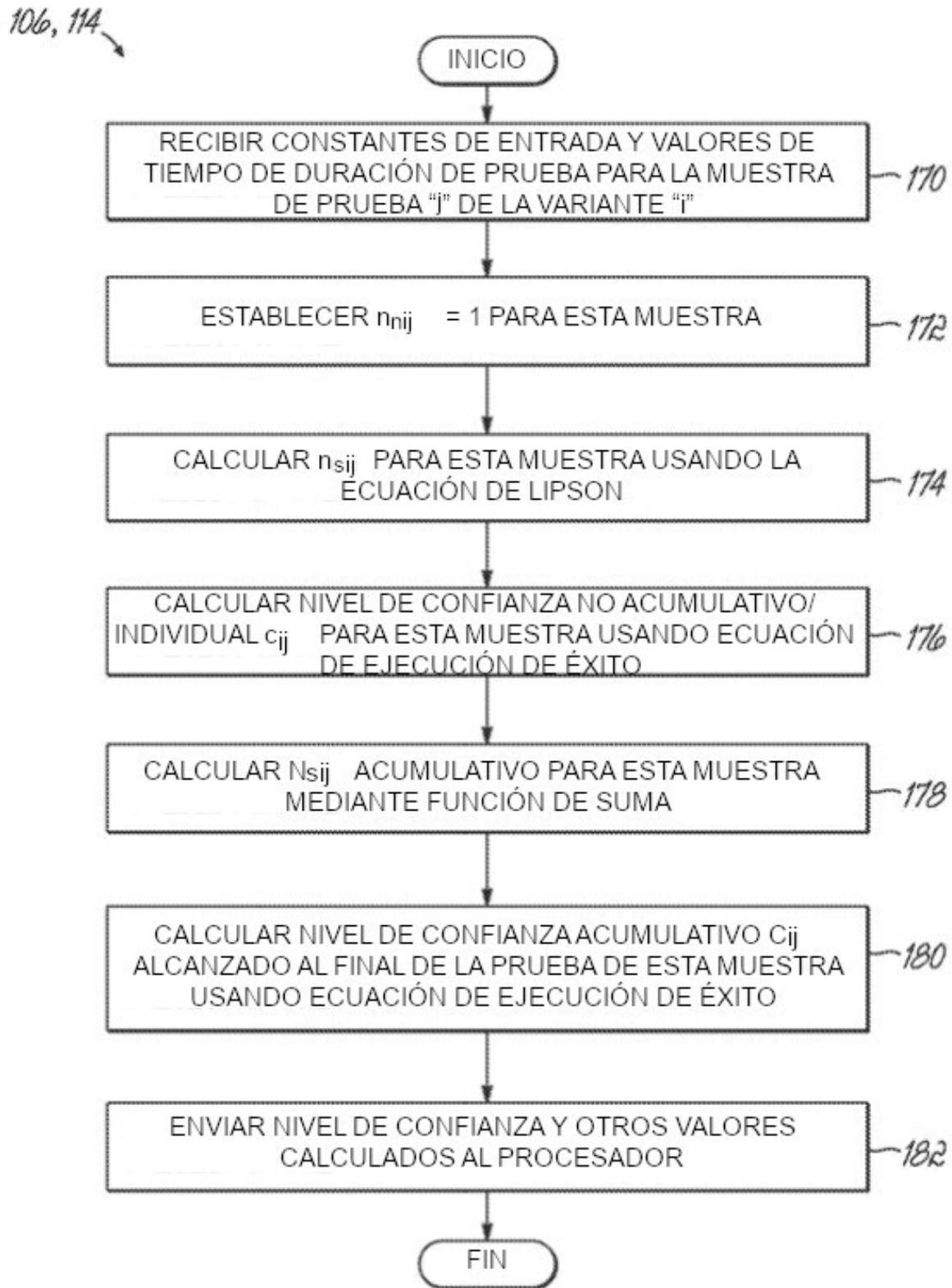


FIG. 14

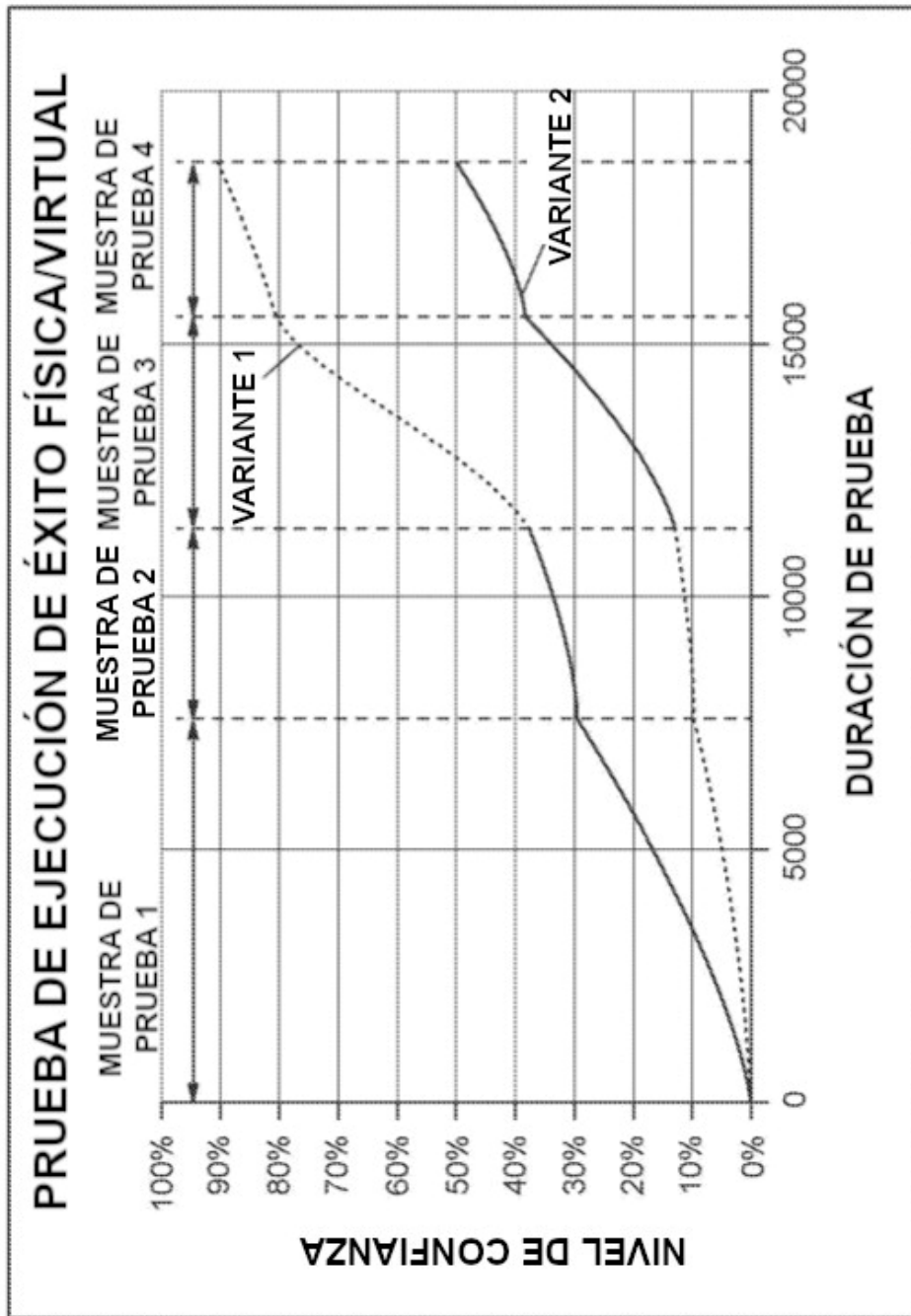


FIG. 15

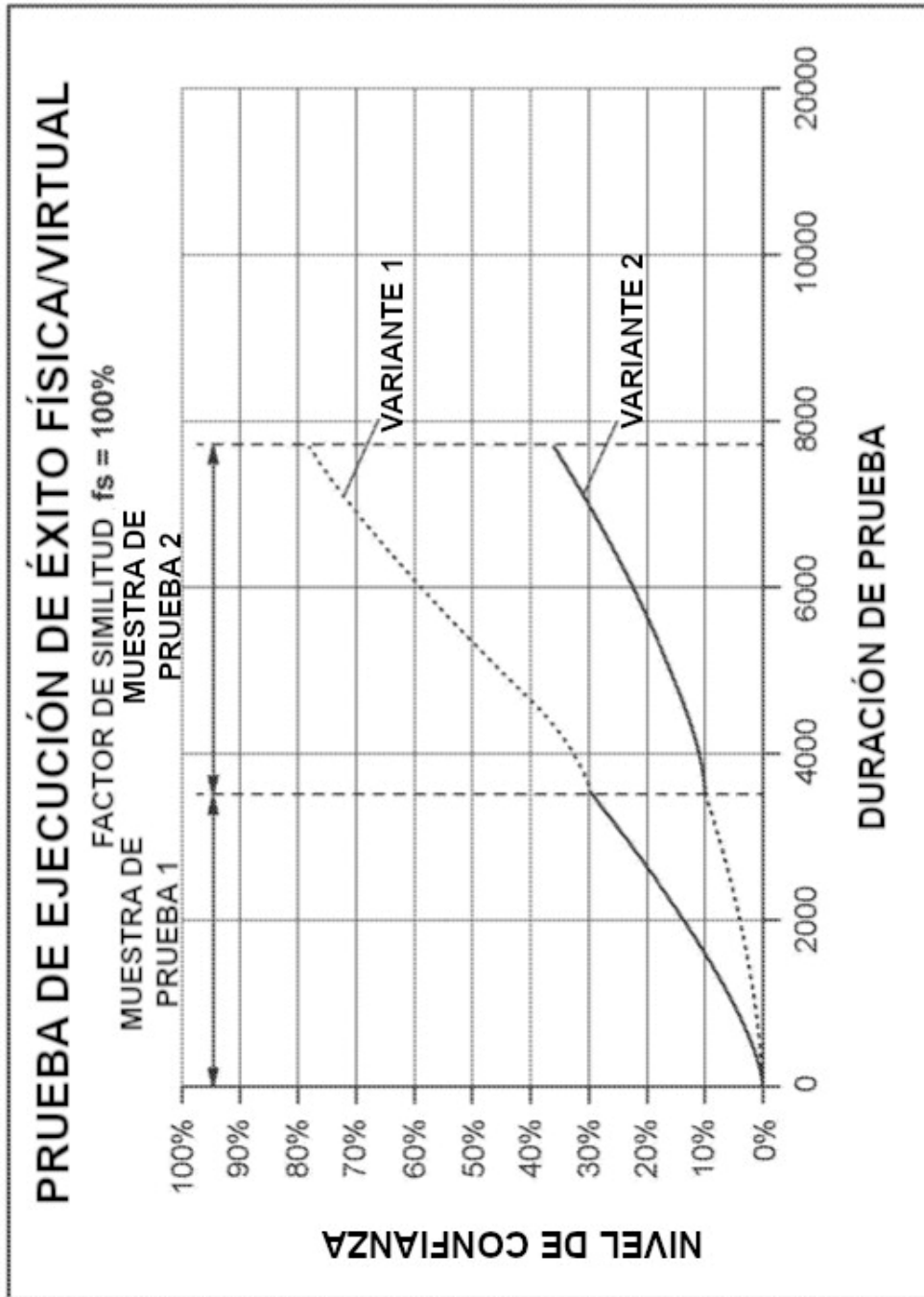


FIG. 16

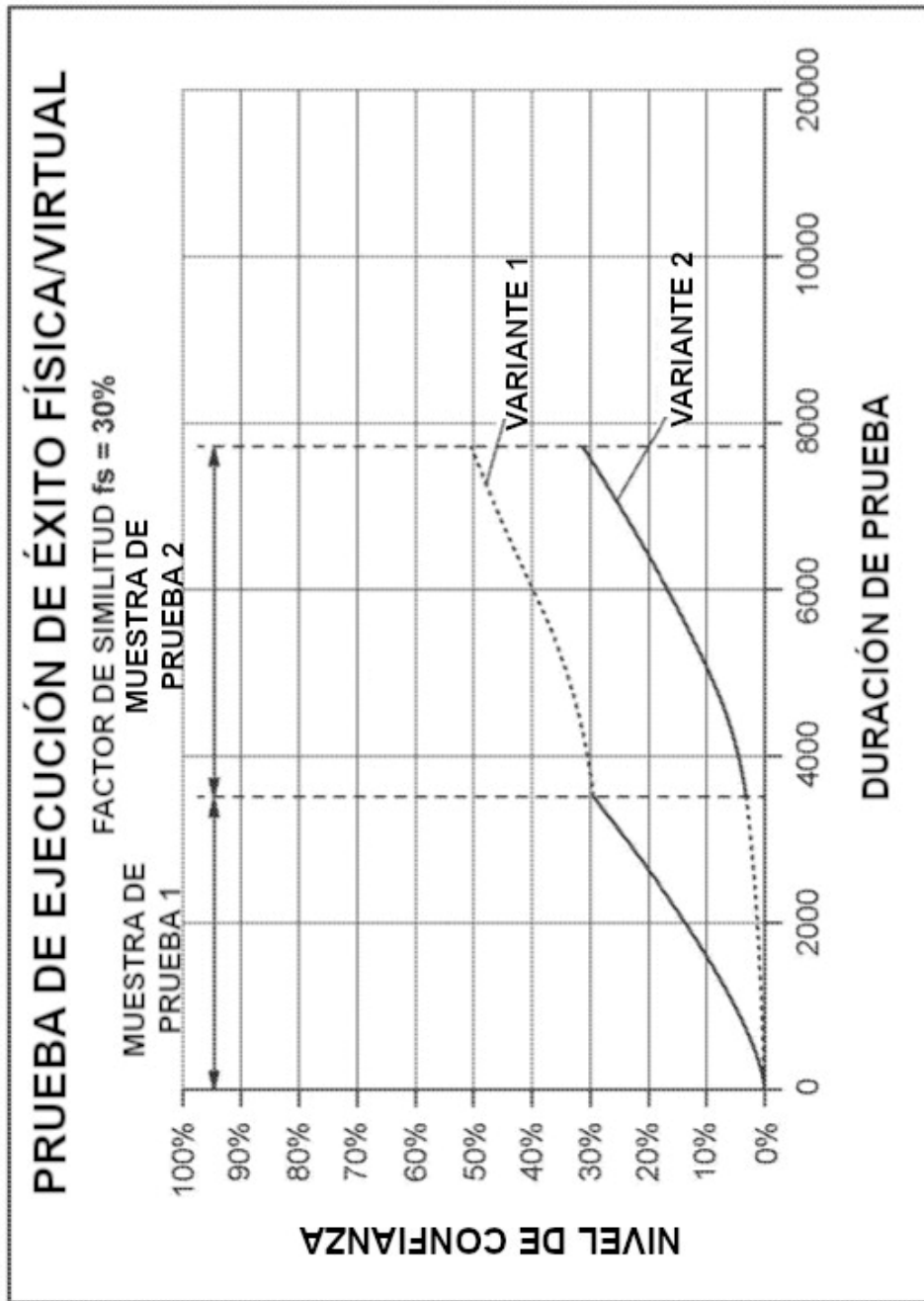


FIG. 17

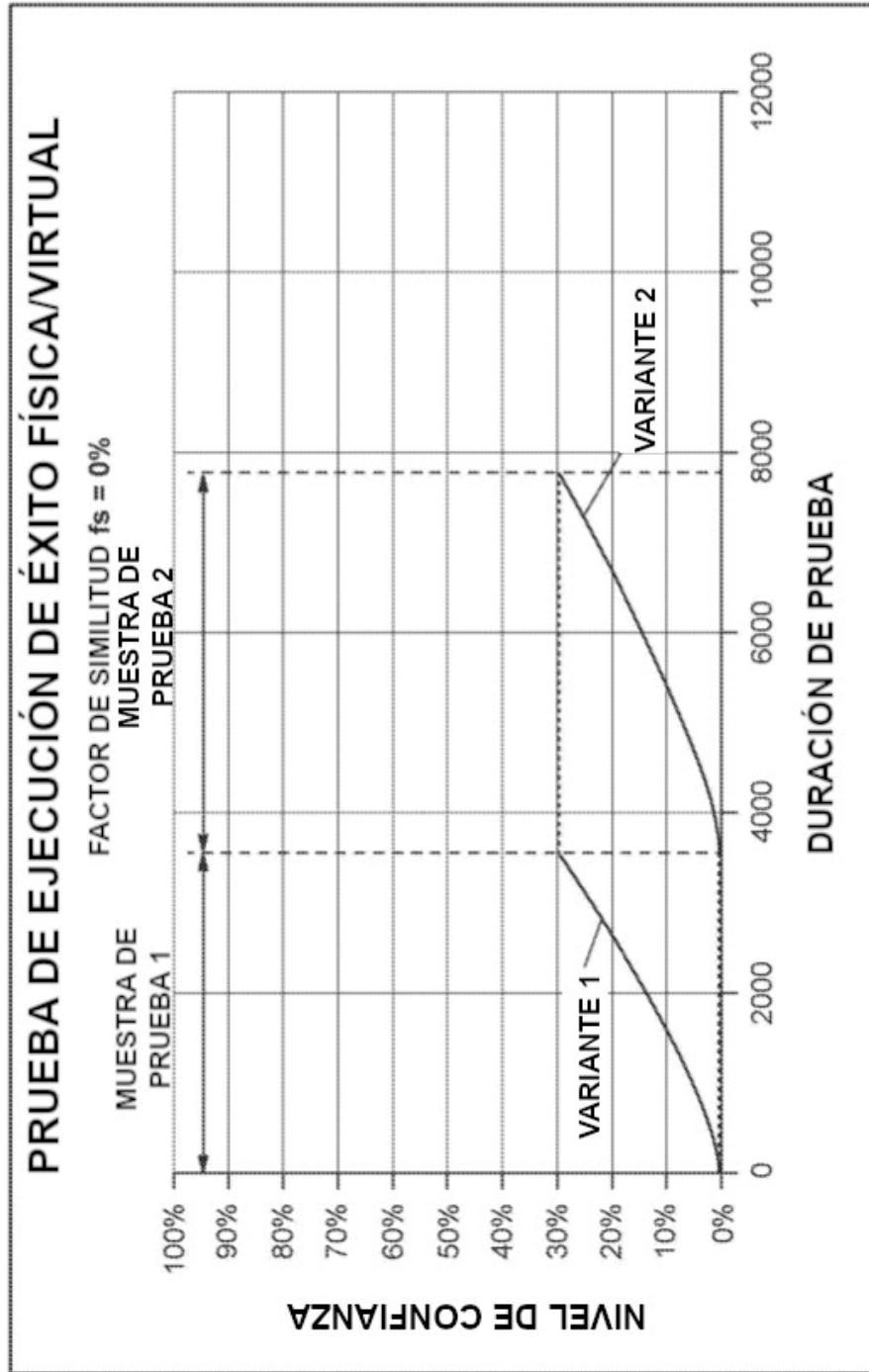


FIG. 18

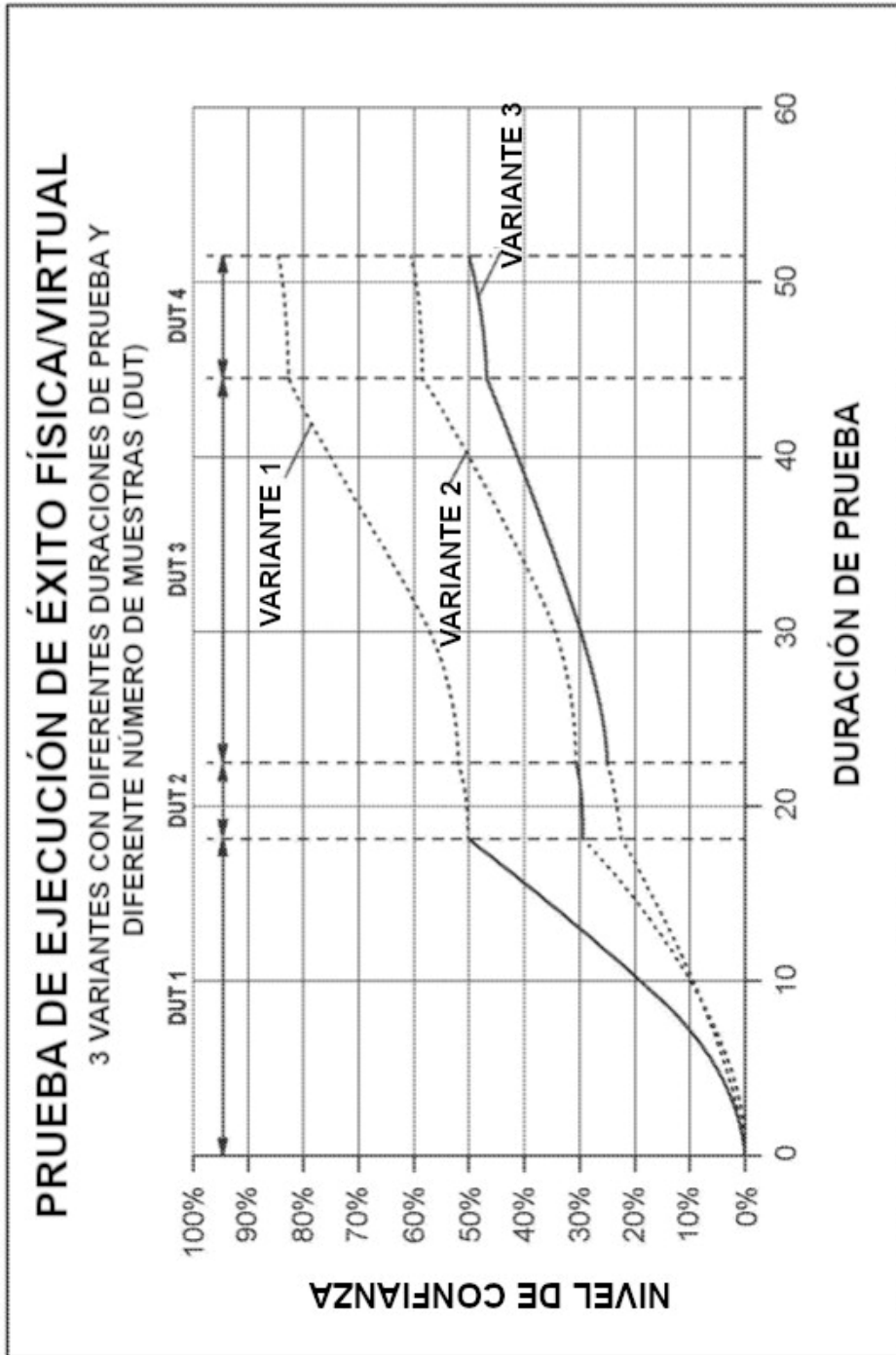


FIG. 19

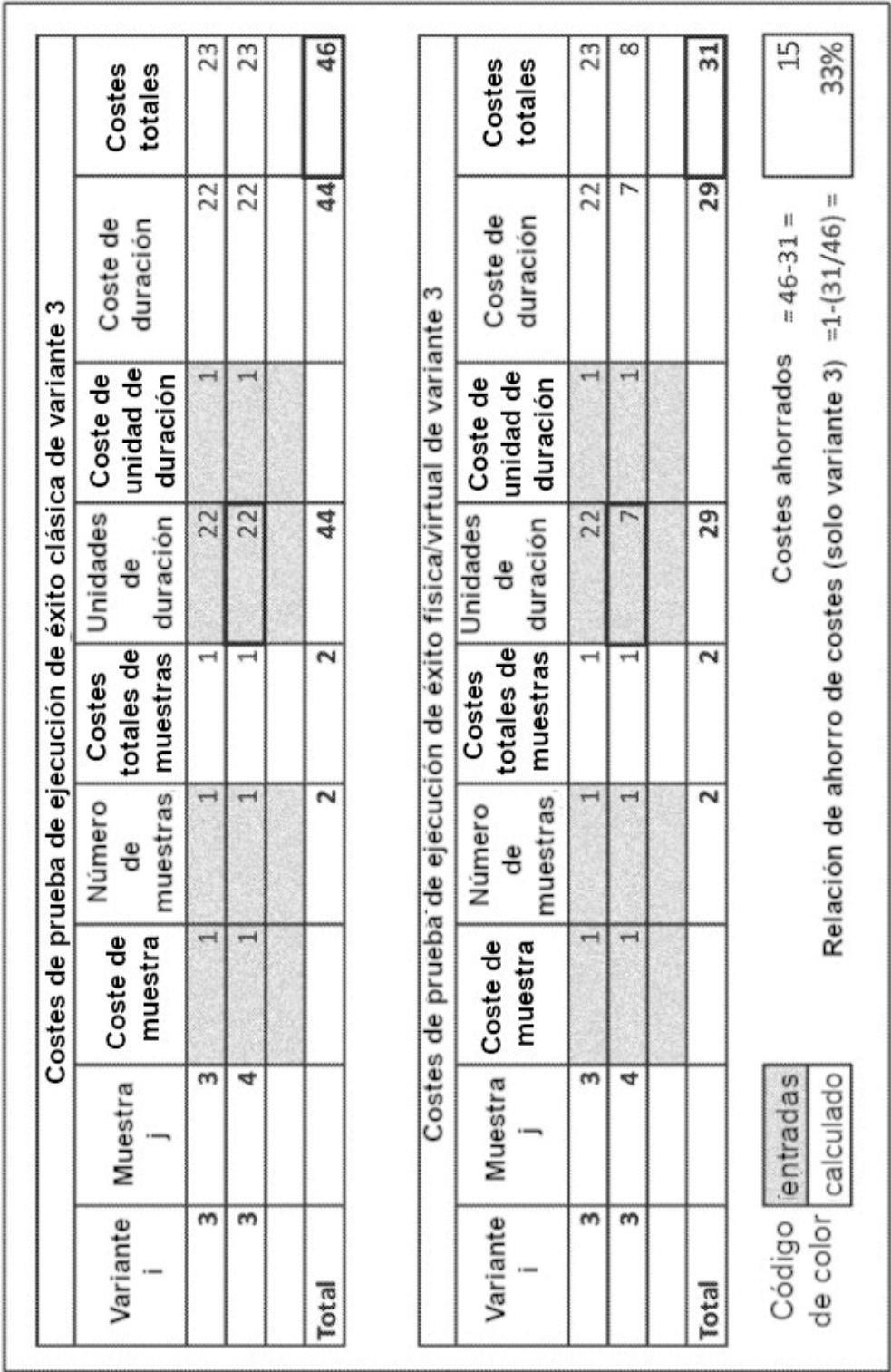


FIG. 20

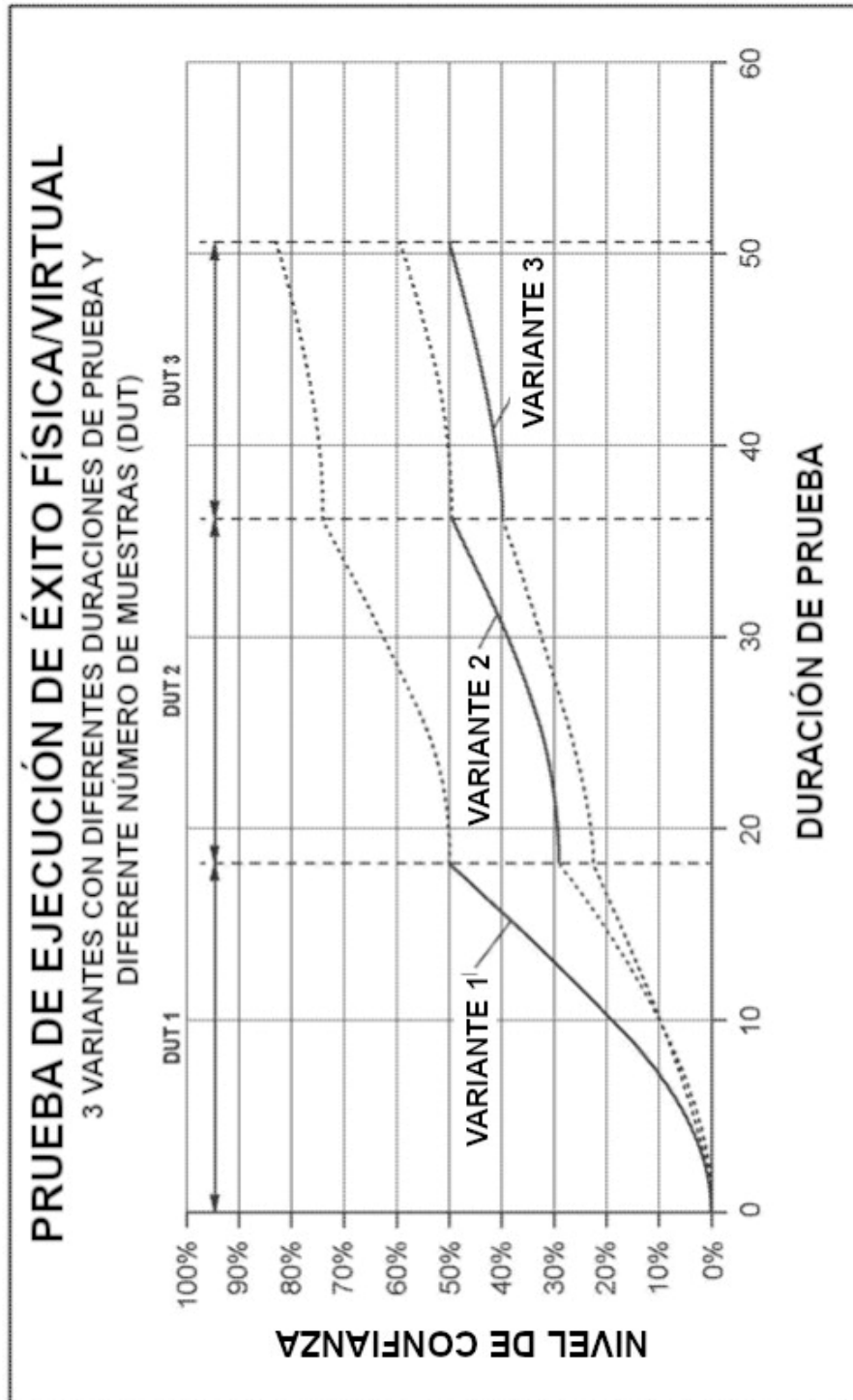


FIG. 21

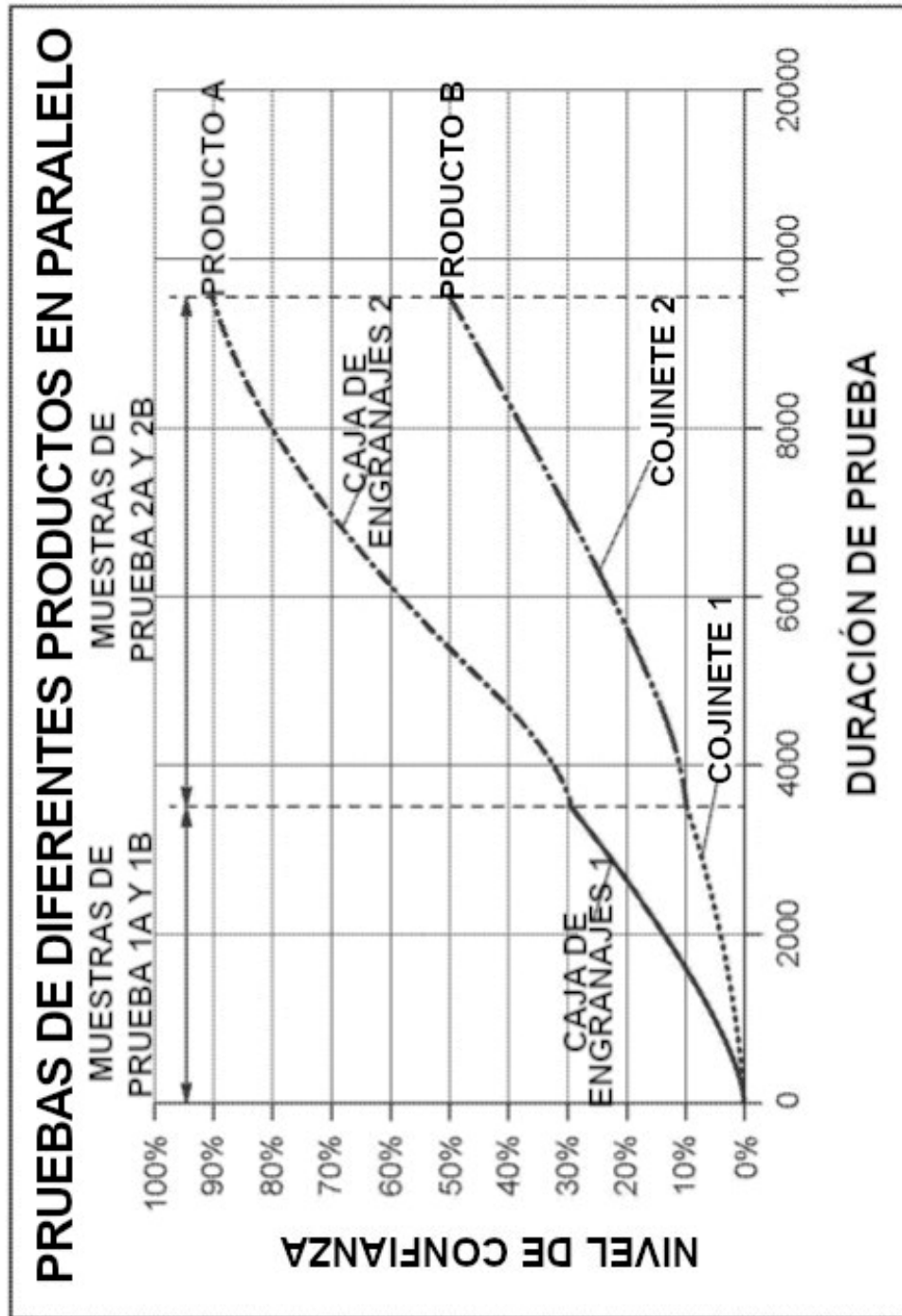


FIG. 22

