

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 522 832**

51 Int. Cl.:

H02J 3/00 (2006.01)

H02J 13/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.11.2011** **E 11306435 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.07.2014** **EP 2590289**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
18.11.2014

73 Titular/es:

**RTE RÉSEAU DE TRANSPORT D'ELECTRICITÉ
(100.0%)
Tour Initiale, 1 terrasse Bellini, TSA 41000
92919 Paris La Défense Cedex , FR**

72 Inventor/es:

STEVENIN, PIERRE

74 Agente/Representante:

AZNÁREZ URBIETA, Pablo

ES 2 522 832 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

Procedimiento y dispositivo de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión. También se refiere a un dispositivo para la puesta en práctica de dicho procedimiento y a un programa de ordenador correspondiente.

En particular, la invención se refiere a un procedimiento de control que incluye:

- 10 – la determinación previa de la corriente admisible (ampacidad) de la línea de alta tensión a partir de una temperatura límite de funcionamiento de la línea de alta tensión, llamada temperatura de reparto, parámetros de conducción de la línea de alta tensión y parámetros meteorológicos;
- la medición de una intensidad de corriente transmitida efectivamente por la línea de alta tensión con ayuda de al menos un sensor dispuesto en la línea de alta tensión; y
- 15 – el control, mediante un dispositivo de control conectado con el sensor, de una superación de la corriente admisible por la intensidad de corriente medida.

20 La corriente admisible (ampacidad) de una línea de alta tensión es el valor límite admisible de la intensidad de corriente transportada por dicha línea, expresado en amperios. En general se postula que esta corriente admisible es una constante cuyo valor depende de la temperatura de reparto, que a su vez también es constante, y se calcula en base a parámetros geométricos supuestamente constantes de la línea de alta tensión y a parámetros meteorológicos. Por tanto, la relación entre la corriente admisible y la temperatura de reparto se expresa según una ecuación que proporciona de forma determinista un valor de la intensidad en función de un valor de la temperatura del conductor de la línea de alta tensión, de parámetros meteorológicos y de datos intrínsecos del conductor. Como parámetros meteorológicos se eligen *a priori* los más desfavorables posible en el entorno de la línea de alta tensión, para asegurar que la corriente admisible resultante así calculada constituye un valor límite realmente pertinente con respecto a los riesgos de superación de la temperatura de reparto. En consecuencia, en general, la corriente admisible calculada es subóptima. Dado que los parámetros meteorológicos son elegidos *a priori*, los riesgos reales de superar la temperatura de reparto, aunque limitados, generalmente no están controlados.

30 En la solicitud de patente internacional publicada bajo el número WO 2010/054072, este problema se plantea y evita mediante el cálculo de una corriente admisible instantánea dinámica en base a parámetros meteorológicos procedentes de sensores y proporcionados de forma regular. Evidentemente, esta corriente admisible instantánea proporciona una estimación bastante mejor de la intensidad límite de funcionamiento, pero requiere medios de procesamiento en tiempo real que tienen cierta complejidad y sobre todo la aportación de sensores convenientes para recoger los parámetros meteorológicos pertinentes. Por tanto, no es óptima desde un punto de vista económico. Además, se sigue basando en una relación simplificada entre la temperatura del conductor y la intensidad resultante.

35 Así, sigue siendo necesaria una corriente admisible estática definida por defecto.

El documento US 2010/0017153 A1 describe un procedimiento de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión que incluye:

- 40 – medir una temperatura de la línea con ayuda de un sensor de temperatura;
- determinar y predecir una variación de carga eléctrica con el paso del tiempo con ayuda de la medida de temperatura y de parámetros de carga ponderados;
- determinar y predecir una variación de temperatura de línea con el paso del tiempo a partir de la variación estimada de la carga eléctrica; y
- 45 – estimar una capacidad de carga límite correspondiente a una temperatura límite de funcionamiento, teniendo en cuenta esta estimación de los parámetros meteorológicos que caracterizan el entorno de la línea, parámetros técnicos de la línea y las predicciones anteriores.

50 Así, puede ser deseable prever un procedimiento de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión que permita evitar al menos parte de los problemas y restricciones arriba mencionados, en particular que permita realizar un cálculo más preciso y fiable de un valor de corriente admisible estática.

Por tanto, se propone un procedimiento de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión que incluye:

- la determinación previa de la corriente admisible (ampacidad) de la línea de alta tensión a partir de una temperatura límite de funcionamiento de la línea de alta tensión, llamada temperatura de reparto, parámetros de conducción de la línea de alta tensión y parámetros meteorológicos;
- la medición de una intensidad de corriente transmitida efectivamente por la línea de alta tensión con ayuda de al menos un sensor dispuesto en la línea de alta tensión; y
- el control, mediante un dispositivo de control conectado con el sensor, de una superación de la corriente admisible por la intensidad de corriente medida

caracterizado porque la determinación previa de la corriente admisible incluye:

- seleccionar un valor de esta corriente admisible mediante optimización de la probabilidad de superar la temperatura de reparto, estando definida esta probabilidad en base a un modelo de probabilidad conjunta de temperatura e intensidad de funcionamiento dependiente de los parámetros meteorológicos, y
- registrar el valor de la corriente admisible seleccionado en medios de almacenamiento del dispositivo de control.

De este modo, integrando un modelo probabilístico de superación de la temperatura de reparto en el cálculo de la corriente admisible, se obtiene un valor de esta última que tiene en cuenta directamente un factor de riesgo. Simplemente es suficiente que el modelo esté construido en base a datos realistas, por ejemplo datos reales y numerosos de muestreo, para proporcionar un resultado fiable. Por otro lado, debido a que los datos pueden ser geolocalizados, el propio valor final obtenido para la corriente admisible de la línea de alta tensión en cuestión puede ser igualmente pertinente geográficamente.

Opcionalmente, la selección de un valor de corriente admisible incluye:

- la inicialización de la corriente admisible a un primer valor;
- el bucle de las siguientes etapas, ejecutado al menos una vez:
 - estimar la probabilidad de superar la temperatura de reparto para el valor de corriente admisible dado;
 - comparar esta probabilidad con un valor límite; y
 - actualizar el valor de corriente admisible en función de esta comparación.

También de forma opcional, la actualización del valor de corriente admisible consiste en aumentar este valor cuando la probabilidad estimada es inferior al valor límite y reducirlo si la probabilidad estimada supera el valor límite.

Igualmente de forma opcional, el bucle de etapas incluye un criterio de interrupción, en particular un número máximo de repeticiones del bucle de etapas o una diferencia entre la probabilidad estimada y el valor límite inferior a un umbral predeterminado cuando esta probabilidad estimada es inferior al valor límite.

Igualmente de forma opcional, la actualización del valor de la corriente admisible incluye aplicar una convergencia por dicotomía.

Igualmente de forma opcional, el modelo de probabilidad conjunta de temperatura e intensidad de funcionamiento se define como el producto, integrado sobre múltiples intensidades comprendidas entre 0 y la corriente admisible, de una probabilidad dependiente de los parámetros meteorológicos de que la temperatura de funcionamiento sea superior a la temperatura de reparto para una intensidad dada por una probabilidad de que esta intensidad sea alcanzada teniendo en cuenta la corriente admisible.

Igualmente de forma opcional, la probabilidad, dependiente de los parámetros meteorológicos, de que la temperatura de funcionamiento sea superior a la temperatura de reparto para una intensidad dada se calcula en base a un modelo establecido por muestreo estocástico a partir de muestras de variables aleatorias meteorológicas y de una función de transferencia predeterminada que relaciona los parámetros meteorológicos y los parámetros de conducción de la línea de alta tensión a una temperatura de funcionamiento de la línea de alta tensión.

Igualmente de forma opcional, en régimen transitorio de desequilibrio térmico entre las potencias de calentamiento y enfriamiento de un conductor aéreo de la línea de alta tensión, la probabilidad de superar la temperatura de reparto se define con más precisión en base al modelo de probabilidad conjunta de temperatura y de intensidad de funcionamiento corregido al menos mediante los dos factores multiplicadores siguientes:

- un factor que cuantifica la probabilidad de que aparezca un defecto en la línea de alta tensión, y

- un factor que cuantifica la probabilidad de la duración de sobrecarga máxima de la línea de alta tensión.

La invención tiene igualmente por objeto un programa de ordenador descargable desde una red de comunicaciones y/o registrado en un soporte legible por ordenador y/o ejecutable por un procesador, caracterizado porque incluye instrucciones para la ejecución de las etapas de un procedimiento de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión tal como se define más arriba, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.

Esta invención también tiene por objeto un dispositivo de control de una línea de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión que incluye:

- un calculador diseñado para la determinación previa de una corriente admisible de la línea de alta tensión a partir de una temperatura límite de funcionamiento de la línea de alta tensión, de dicha temperatura de reparto, de los parámetros de conducción de la línea de alta tensión y de parámetros meteorológicos;
 - medios de almacenamiento del valor de la corriente admisible determinado;
 - una interfaz de transmisión de datos diseñada para recibir los datos de la medición de una intensidad transmitida efectivamente por la línea de alta tensión procedentes de al menos un sensor dispuesto en la línea de alta tensión; y
 - un detector de superación de la corriente admisible por la intensidad medida;
- caracterizado porque:
- los medios de almacenamiento incluyen parámetros de un modelo de probabilidad conjunta de temperatura y de intensidad de funcionamiento dependiente de los parámetros meteorológicos; y
 - el calculador está diseñado más particularmente para determinar la corriente admisible de la línea de alta tensión mediante la selección de un valor de dicha corriente admisible por la optimización de una probabilidad de superar la temperatura de reparto, estando definida esta probabilidad en base al modelo de probabilidad almacenado.

La invención se entenderá mejor con ayuda de la siguiente descripción, dada únicamente a modo de ejemplo, y con referencia a las figuras adjuntas, en las cuales:

- Figura 1: representa esquemáticamente la estructura general de una instalación que incluye una línea de alta tensión y un dispositivo de control de acuerdo con una forma de realización de la invención;
- Figuras 2 y 3: representan esquemáticamente dos formas de realización diferentes del dispositivo de control de la figura 1;
- Figura 4: ilustra las etapas sucesivas de un procedimiento de control puesto en práctica con el dispositivo de vigilancia de la figura 2 o 3, de acuerdo con una forma de realización de la invención;
- Figuras 5 y 6: diagramas que ilustran modelos de leyes de probabilidades cuyos parámetros son almacenados por el dispositivo de control de la figura 2 o 3; y
- Figura 7: ilustra una etapa de cálculo del procedimiento de la figura 4, donde se utilizan los modelos de las figuras 5 y 6.

La instalación mostrada en la figura 1 incluye una línea 10 de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión que comprende al menos un conductor aéreo 12 fijado a postes 14 a intervalos regulares. Esta instalación está destinada a funcionar en régimen permanente, durante el cual se observa un equilibrio térmico entre las potencias de calentamiento y enfriamiento del conductor aéreo, o en régimen transitorio, durante el cual las potencias de calentamiento y enfriamiento del conductor aéreo están en desequilibrio térmico. Los postes 14 están previstos para mantener el conductor aéreo por encima de una determinada altura mínima H_{min} en régimen permanente o H'_{min} en régimen transitorio.

La instalación de la figura 1 también incluye al menos un sensor 16 dispuesto a lo largo del conductor aéreo 12 y diseñado para medir en todo momento una intensidad transmitida efectivamente por la línea de alta tensión 10.

En general, la altura mínima H_{min} a respetar entre el conductor aéreo 12 y el suelo (o una instalación cualquiera dispuesta bajo el conductor aéreo) cuando éste está bajo tensión en régimen permanente en una obra de tensión nominal U se calcula como la suma de una distancia b mínima, llamada "distancia de base", y una distancia t dependiente de U , llamada "distancia de tensión". La distancia de base b es determinada por consideraciones de obstrucción a partir de la asignación del suelo y la naturaleza de las instalaciones que éste incluye. También depende del riesgo a tener en cuenta que se deriva del nivel de tensión y del aislamiento eventual de los conductores. La distancia de tensión t depende de la tensión nominal U de las

obras y de la probabilidad de que, en un intervalo de tiempo dado, una persona o un objeto estén situados a la distancia de base b del suelo o de la instalación en cuestión. De este modo, resulta conveniente adoptar para la distancia t una de las tres evaluaciones t_1 , t_2 o t_3 dependiendo de que la probabilidad de proximidad se considere débil, media o fuerte:

- 5
- $t_1 = 0,0025 U$,
 - $t_2 = 0,005 U$ y
 - $t_3 = 0,0075 U$,

expresándose t_1 , t_2 y t_3 en metros y U en kilovoltios. El valor t se obtiene redondeando t_1 , t_2 o t_3 (según el caso) al decímetro más cercano. En concreto, la distancia de tensión permite prevenir contra fenómenos de sobretensión en el conductor aéreo 12.

Así, para que se produzca una descarga disruptiva en régimen permanente (es decir, la formación de un arco eléctrico a partir de la línea de alta tensión en cuestión), es necesario que se cumplan las tres condiciones siguientes:

- 15
- que no se respete la altura H_{min} ;
 - que se produzca una sobretensión en la línea de alta tensión; y
 - que un tercer elemento se encuentre verticalmente bajo la línea de alta tensión.

20 A la altura H_{min} le corresponde una temperatura máxima del conductor aéreo 12 o temperatura límite de funcionamiento de la línea de alta tensión 10, llamada "temperatura de reparto". El valor T_{rep} de esta temperatura de reparto se puede calcular de forma determinista y conocida en sí a partir de la altura H_{min} y de parámetros geométricos locales de la línea de alta tensión, tales como la altura de fijación del conductor aéreo entre dos postes y la distancia entre los postes, la altura H entre el punto más bajo del conductor aéreo y el suelo a una temperatura de referencia dada, etc.

25 Un razonamiento similar se aplica al régimen transitorio, a no ser que la altura H'_{min} a respetar entre el conductor aéreo 12 y el suelo (o una instalación cualquiera dispuesta bajo el conductor aéreo) se calcule como la suma de la distancia de base b y una distancia de tensión t' que no tiene en cuenta las sobretensiones. La distancia de tensión t' es inferior a t , de modo que la altura H'_{min} es inferior a H_{min} y la temperatura de reparto T'_{rep} en régimen transitorio es superior a T_{rep} . En cambio, la temperatura de reparto T_{rep} en régimen permanente se tolera permanentemente, mientras que la temperatura de reparto T'_{rep} en régimen transitorio sólo se tolera durante un tiempo predeterminado, por ejemplo 10, 20 o 30 minutos.

30 La instalación ilustrada en la figura 1 incluye además un dispositivo de control 18 conectado con el sensor 16 y diseñado para:

- 35
- determinar previamente un valor de la corriente admisible de la línea de alta tensión 10 a partir de la temperatura de reparto, de parámetros de conducción de la línea de alta tensión 10 y de parámetros meteorológicos, tales como los valores de temperatura ambiente, irradiación solar y velocidad del viento;
 - almacenar este valor de corriente admisible;
 - recibir datos de medición de la intensidad transmitida efectivamente por la línea de alta tensión 10 procedentes del sensor; y
 - detectar la superación de la corriente admisible por la intensidad medida, pudiendo provocar esta superación el disparo de una alarma o la interrupción de la transmisión de corriente a través de la línea de alta tensión 10.
- 40

Dado que la corriente admisible depende de la temperatura de reparto, su valor dependerá igualmente del régimen permanente o transitorio. En régimen permanente generalmente se califica de intensidad "de emergencia temporal" y en régimen transitorio de intensidad "transitoria".

45 Para la ejecución del dispositivo de control 18 se pueden concebir diferentes formas de realización, dos de las cuales se detallarán con referencia a las figuras 2 y 3. En la figura 1, este dispositivo está representado de forma realizable mediante un ordenador. Típicamente, este ordenador incluye un microprocesador, una memoria dinámica para ejecutar procesos controlados por el microprocesador, una memoria no volátil para almacenar parámetros y programas de ordenador, un bus para el intercambio de datos entre el microprocesador, la memoria dinámica y la memoria no volátil, al menos un puerto de comunicación para el intercambio de datos con dispositivos externos, tales como el sensor 16, etc. Más concretamente, la memoria no volátil puede almacenar un programa de ordenador diseñado para la determinación previa de la corriente admisible y un programa de ordenador diseñado para detectar la superación de la corriente admisible a través de la intensidad medida y el disparo eventual de una alarma.

50

Para la conexión entre el dispositivo de vigilancia 18 y el sensor 16 se muestra una conexión por cable 20, pero esta conexión puede ser igualmente hertziana, al menos parcialmente.

5 En la primera forma de realización mostrada en la figura 2, por ejemplo según la ilustración de la figura 1, el dispositivo de control 18 es un aparato electrónico programable, por ejemplo un ordenador o un circuito integrado programable, en comunicación con el sensor 16 a través de la conexión por cable o hertziana 20, que incluye:

- un puerto 22 de intercambio de datos con el sensor 16, que funciona de acuerdo con un protocolo de comunicación compatible con la conexión 20, para la recepción de los datos de medida de una intensidad transmitida efectivamente por la línea de alta tensión 10;
- 10 - primeros medios de almacenamiento 24, por ejemplo parte de una memoria no volátil, que incluyen un primer programa de ordenador 26 diseñado para una determinación previa de la corriente admisible de la línea de alta tensión 10 y un segundo programa 28 diseñado para la detección de una superación de la corriente admisible por la intensidad medida;
- 15 - segundos medios de almacenamiento 30, por ejemplo parte de una memoria no volátil, que incluyen los parámetros P (o P' en régimen transitorio) de un modelo de probabilidad conjunto de temperatura e intensidad de funcionamiento de la línea de alta tensión 10 dependiente de parámetros meteorológicos y un valor de la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) a calcular con ayuda del primer programa de ordenador 26;
- 20 - eventualmente una alarma 32, acústica y/o visual; y
- un procesador 34 conectado al puerto 22 para recibir los valores de intensidad transmitida efectivamente, estando la alarma 32 lista para dispararse bajo determinadas condiciones definidas por ejemplo en el segundo programa 28, los primeros medios de almacenamiento 24 para la ejecución de los programas 26 y 28, y los segundos medios de almacenamiento 30 para la utilización de los parámetros P (o P' en régimen transitorio) y para registrar la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio).

25 Más concretamente, el primer programa de ordenador 26 está diseñado para determinar la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) mediante la selección de un valor de dicha corriente admisible por optimización de una probabilidad de superar la temperatura de reparto Trep (o T'rep en régimen transitorio), estando definida esta probabilidad en base a los parámetros P (o P' en régimen transitorio) del modelo de probabilidad almacenado en memoria 30.

30 Se observará que, alternativamente, es posible realizar el dispositivo de control 18 en forma de un circuito integrado no programable. En este caso, a cambio de una menor flexibilidad, se pueden acelerar los cálculos.

35 En otra forma de realización ilustrada en la figura 3, una parte de los procesos del dispositivo de vigilancia 18 se pueden acercar al sensor 16 y, por tanto, ejecutar en una caja 36 que lo contiene, estando dispuesta esta caja a lo largo del conductor aéreo 12. Esta parte de los procesos en cuestión es aquella que trata específicamente del control de la línea de alta tensión 10 cuando se conoce su corriente admisible A (o A' en régimen transitorio). Se corresponde con las funciones realizadas con ayuda del programa de ordenador 28 de la forma de realización anterior.

40 Además del sensor 16, la caja 36 incluye una memoria para almacenar la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) de la línea de alta tensión 10, un comparador 38 para detectar si se supera la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) por la intensidad medida por el sensor 16, y un órgano de activación de una acción, por ejemplo cuando la intensidad medida supera el valor de la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) durante un tiempo superior a una duración umbral predeterminada. Este elemento 40 es, por ejemplo, una alarma acústica y/o visual, como en la forma de realización anterior, o, ventajosamente en esta forma de realización, un dispositivo de corte de la corriente que atraviesa el conductor aéreo 12.

45 La otra parte de los procesos realizados por el dispositivo de control, es decir aquellos procesos que se refieren a la determinación previa de la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio), es ejecutada en otro aparato 42, por ejemplo un ordenador o dispositivo electrónico cualquiera. Así, este otro aparato 42 es más simple que el dispositivo electrónico a modo de dispositivo de control de la forma de realización anterior: por ejemplo sólo incluye el procesador 34, una memoria no volátil 24 de almacenamiento del primer programa de ordenador 26 y una memoria no volátil 30 de almacenamiento de los parámetros P (o P' en régimen transitorio). Está en comunicación con la caja 36 para la transmisión de un valor de la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) cuando ha realizado su procesamiento.

También son posibles otras formas de realización. Por ejemplo, el dispositivo de control 18 podría estar totalmente integrado en la caja 36.

55 A continuación se detalla un funcionamiento posible del dispositivo de control 18 con referencia a la figura 4 para realizar un procedimiento de control de la línea de alta tensión 10.

5 Durante una fase previa 100, este procedimiento consiste en determinar, para el régimen permanente, un valor de la corriente admisible A de la línea de alta tensión 10, de modo que la probabilidad de superar la temperatura de reparto Trep mientras la intensidad I transmitida se mantiene por debajo de A esté lo más cerca posible, sin superarlo, de un valor umbral Ps considerado como óptimo. De forma opcional y complementaria, el procedimiento puede consistir además en determinar, para el régimen transitorio, un valor de la corriente admisible A' de la línea de alta tensión 10 de modo que la probabilidad de superar la temperatura de reparto T'rep mientras la intensidad I transmitida se mantiene por debajo de A' esté lo más cerca posible, sin superarlo, de un valor umbral P's considerado como óptimo.

10 El valor umbral Ps para el régimen permanente es, por ejemplo, un valor predeterminado fijado *a priori*. Lo mismo ocurre en el caso del valor umbral P's para el régimen transitorio.

En régimen permanente, la probabilidad de superar la temperatura de reparto Trep cuando la intensidad de funcionamiento se mantiene por debajo de la corriente admisible A depende de parámetros meteorológicos θ significativos de un entorno (lugar, estación,...) donde se encuentra la línea de alta tensión 10. Se puede escribir ventajosamente de la siguiente manera:

$$15 \quad p_{\theta}(T > Trep, I < A) = \int_0^A p_{\theta}(T > Trep, I) dI . \quad (1)$$

Así, la probabilidad se define en base a un modelo de probabilidad conjunta $p_{\theta}(T > Trep, I)$ de temperatura e intensidad de funcionamiento, dependiendo esta probabilidad conjunta de los parámetros meteorológicos e integrándose la misma en los límites de intensidades comprendidas entre 0 y la corriente admisible A. Más concretamente y conforme a las reglas de análisis bayesiano, esta probabilidad conjunta $p_{\theta}(T > Trep, I)$ es el producto de una probabilidad *a posteriori* de temperatura para una intensidad de funcionamiento dada dependiente de los parámetros meteorológicos, expresada como $p_{\theta}(T > Trep|I)$, y de una probabilidad *a priori* de intensidad de funcionamiento dependiente de los parámetros meteorológicos, expresada como $p_{\theta}(I)$, es decir:

$$p_{\theta}(T > Trep, I) = p_{\theta}(T > Trep|I) \cdot p_{\theta}(I) .$$

25 En la práctica, la probabilidad *a priori* $p_{\theta}(I) = p(I)$ es independiente de los parámetros meteorológicos θ y de la corriente admisible A. Sigue una ley cuyos parámetros pueden ser estimados en base a un muestreo estadístico de intensidades de funcionamiento de las líneas de alta tensión en todo un territorio, a lo largo de todo un año y para todas las categorías de niveles de tensión. Por tanto, se puede representar mediante una función de reparto representativa de la monotonía de carga de la línea de alta tensión 10, como la ilustrada en la figura 5, entre 0%A y 100%A.

30 Se trata o bien de los parámetros estadísticos (media, varianza, ...) de una ley que sigue esta probabilidad *a priori*, o bien directamente de los valores de muestreo que ésta toma, que están registrados como parámetros P en los medios de almacenamiento 30. Estos parámetros pueden estar predeterminados. También pueden ser calculados por el dispositivo de control 18 durante la ejecución del primer programa 26 en el curso de una etapa 104, a partir de un conjunto de muestras representativo de las intensidades de funcionamiento de líneas de alta tensión en todo un territorio, a lo largo de todo un año y para todas las categorías de niveles de tensión.

35 También en la práctica, la probabilidad *a posteriori* $p_{\theta}(T > Trep|I)$ depende de los parámetros meteorológicos θ y de la intensidad de funcionamiento I. Sigue una ley cuyos parámetros pueden ser estimados en base a un muestreo estocástico, por ejemplo según un método de convergencia de cadena de Markov Monte Carlo (procedimiento de muestreo MCMC, del inglés "Markov Chain Monte Carlo") con un muestreo numérico de Gibbs, realizado a partir de una función de transferencia que relaciona los parámetros meteorológicos θ y los parámetros de conducción de la línea de alta tensión 10, por una parte, y una temperatura de la línea de alta tensión, por otra, para un valor de intensidad de funcionamiento dada. Este muestreo se realiza con ayuda de muestras de parámetros meteorológicos representativos del entorno en el que se encuentra la línea de alta tensión 10. Cada muestra es, por ejemplo, una tríada de parámetros de temperatura ambiente, irradiación solar y velocidad del viento. Estas muestras pueden variar en particular no sólo en función del lugar (se puede realizar una zonificación), sino también en función de la estación. En concreto, en un territorio como Francia se han realizado estudios meteorológicos sobre datos trihorarios de 125 estaciones a lo largo de un período de 20 años (1988-2007) en base a una fragmentación del territorio en varias zonas geográficas homogéneas con respecto a las distribuciones de temperatura de conductor (16 zonas) e igualmente en base a una definición de estaciones homogéneas.

La función de transferencia utilizada es, por ejemplo, una función normalizada, tal como la ecuación Cigré, definida en el documento titulado "Thermal behaviour of overhead conductors", publicado por el comité de estudio "B2-lignes aériennes" de la organización Cigré, WG 22.12, en agosto de 2002, o la ecuación IEEE, definida en el documento titulado "IEEE standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors", publicada por IEEE Power Engineering Society bajo la referencia IEEE Std 738™-2006, en enero de 2007. Entre los parámetros de esta función de transferencia, únicamente los parámetros meteorológicos y la temperatura del conductor resultante son considerados como variables aleatorias para el muestreo estocástico. Los parámetros de conducción de la línea de alta tensión 10 son considerados como constantes. Además, los parámetros geométricos que intervienen eventualmente en la función de transferencia se fijan por ejemplo a partir de un análisis estadístico de parámetros geométricos que abarcan toda una red.

Por tanto, la probabilidad *a posteriori* $p_{\theta}(T > Trep|I)$ se puede representar mediante una función de reparto tal como la ilustrada en la figura 6, para I variable entre 0 e I_{max}, seleccionándose I_{max} de modo que sea un valor de intensidad de funcionamiento muy desfavorable teniendo en cuenta los parámetros meteorológicos θ , en todo caso superior al valor final A de la corriente admisible buscado.

Se trata directamente, por ejemplo, de los valores de muestreo que toma para I variable entre 0 e I_{max} amperios que están registrados como parámetros P en los medios de almacenamiento 30. Estos parámetros pueden estar predeterminados. También pueden ser calculados por el dispositivo de control 18 durante la ejecución del primer programa 26 en el curso de una etapa 106, a partir de un conjunto de muestras representativo de los parámetros meteorológicos θ en el entorno de la línea de alta tensión 10. Esta ejecución no se detalla aquí, pero aplica de forma clásica el muestreo estocástico anteriormente mencionado.

Cuando se conocen los valores de Ps y los parámetros P, bien de forma predeterminada, bien por ejecución de las etapas 104 y 106, se pasa a una etapa 108 de inicialización realizada por el dispositivo de control 18 en la ejecución del primer programa 26, durante la cual la corriente admisible se inicializa a un primer valor A₀ y un índice i se inicializa a 0. El primer valor A₀ es, por ejemplo, igual a valor I_{max}, es decir el máximo valor de la intensidad de funcionamiento para el que se dispone de un valor de probabilidad de superación de la temperatura de reparto teniendo en cuenta los parámetros meteorológicos.

A continuación, el dispositivo de control 18 ejecuta un bucle de etapas 110, 112, 114 al menos una vez por al menos cada valor del índice i en la ejecución del primer programa 26.

Durante la etapa 110 se calcula la probabilidad de superar la temperatura de reparto T_{rep} para el valor de corriente admisible A_i. Este cálculo se realiza tal como muestra la figura 7 (diagrama superior). En dicha figura se observa que se retoma una parte de la curva de probabilidad *a posteriori* $p_{\theta}(T > Trep|I)$ de la figura 6, entre 0 y A_i amperios, para disponerla sobre la curva de probabilidad *a priori* $p(I)$. Entonces estas dos curvas se multiplican entre sí punto a punto entre 0 y A_i para obtener una curva cuyo espacio por debajo del eje de las abscisas (en gris en la figura 7) da una estimación del valor de la probabilidad $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$, ya que

$$p_{\theta}(T > Trep, I < A_i) = \int_0^{A_i} p_{\theta}(T > Trep|I)p(I)dI$$

Durante la siguiente etapa 112, la probabilidad $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ se compara con el valor umbral Ps.

Esta etapa 112 va seguida de una etapa de prueba 114 relacionada con un criterio de parada: por ejemplo, un número máximo i_{max} de repeticiones del bucle de etapas 110, 112, 114 comparado con el índice i. Así, según el criterio de parada, si i < i_{max} se pasa a una etapa 116 de actualización, si no se pasa a una etapa 118 de registro. Alternativamente, el criterio de parada puede consistir en el hecho de que la diferencia entre $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ y Ps llegue a ser inferior a un umbral predeterminado Δp cuando $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ es inferior a Ps. Así, según este criterio de parada, si $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ es superior a Ps o $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ es inferior a Ps pero $[Ps - p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)] > \Delta p$, se pasa a la etapa 116 de actualización, si no se pasa a la etapa 118 de registro.

Durante la etapa 116, el índice i se incrementa una unidad y el valor de A_i se actualiza. Dado que se pretende estimar un valor de la corriente admisible A tal que la probabilidad $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ esté lo más cerca posible del valor umbral Ps sin superarlo, la actualización del valor de la corriente admisible A_i consiste en particular en aumentar este valor si la probabilidad estimada $p_{\theta}(T > Trep, I < A_i)$ es inferior a Ps y reducirlo si ésta es superior a Ps. Más concretamente, la actualización del valor de la corriente admisible A_i puede incluir aplicar una convergencia por dicotomía.

Después de la ejecución de la etapa 116, el procedimiento reanuda la etapa 110 para un nuevo bucle de etapas 110, 112, 114. En particular, el cálculo de la etapa 110 se reanuda con un nuevo valor de A_i . La parte de abajo de la figura 7 ilustra este nuevo cálculo en el caso de una actualización de A_i por reducción de su valor. Para aclarar el hecho de que la figura 7 ilustra dos ejecuciones sucesivas de la etapa 110, los índices anotados son i e $i+1$ en el diagrama de arriba y en el diagrama de abajo de la figura 7, respectivamente. La etapa de registro 118 ejecutada al final del bucle consiste:

5

- bien en registrar el último valor de A_i como corriente admisible seleccionada A en los medios de almacenamiento 30 del dispositivo de control 18, en el caso del modo de realización de la figura 2;
- bien en transmitir el último valor de A_i como corriente admisible seleccionada A a la caja 36 y registrarlo en ésta, en el caso del modo de realización de la figura 3.

10

El procesamiento anteriormente descrito para el régimen permanente y basado en la ecuación (1) se adapta al régimen transitorio. En efecto, en régimen transitorio, la probabilidad de superar la temperatura de reparto T_{rep} cuando la intensidad de funcionamiento I se mantiene por debajo de la corriente admisible A' se puede expresar ventajosamente de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 p'_\theta(T > T_{rep}, I < A') &= P1 \times P2 \times p_\theta(T > T_{rep}, I < A') \\
 &= P1 \times P2 \times \int_0^{A'} p_\theta(T > T_{rep}, I) dI \quad (2)
 \end{aligned}$$

15

siendo $P1$ la probabilidad de aparición de un defecto y $P2$ la probabilidad de una duración de sobrecarga máxima.

$P1$ y $P2$ son valores predeterminados de las peores probabilidades estimadas experimentalmente. El resto del cálculo y del procesamiento se reduce al caso anterior del régimen permanente, excepto el valor umbral P_s , que se sustituye por P'_s , y la función de transferencia, que adopta una forma transitoria. Por ejemplo, si se trata de la ecuación Cigré, se ha de conservar su expresión transitoria, requiriendo dicha expresión el conocimiento de un estado inicial. Este estado inicial viene dado por el valor de intensidad antes de la aparición del defecto que ha provocado el régimen transitorio, expresada en porcentaje de la intensidad máxima con la que $p_\theta(T > T_{rep}|I)$ permanece nulo. Por tanto, la etapa de registro 118 trata del valor A' hallado.

20

25

A continuación de esta etapa de registro 118 que pone fin a la fase previa 100 de determinación de la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio), el procedimiento ilustrado en la figura 4 consiste en vigilar la intensidad de la corriente que fluye por la línea de alta tensión 10 durante una fase de vigilancia 200 propiamente dicha. La fase de vigilancia 200 es realizada por el dispositivo de control 18 en la ejecución del segundo programa 28.

30

Una primera etapa 202 de esta fase de vigilancia consiste en medir, con ayuda del sensor 16, una intensidad de corriente transmitida efectivamente por la línea de alta tensión. Esta medida se puede realizar periódicamente.

A continuación, durante una etapa de prueba 204, esta intensidad medida se compara con la corriente admisible A registrada (o A' en régimen transitorio). A modo de ejemplo no limitativo, si esta intensidad medida supera la corriente admisible A (o A' en régimen transitorio) durante un tiempo superior a un umbral predeterminado, la etapa de prueba 204 puede ir seguida de una etapa final 206 de disparo de una alarma visual o acústica o de corte de corriente en la línea de alta tensión 10.

35

Es evidente que un dispositivo de control tal como el anteriormente descrito de acuerdo con diferentes formas de realización posibles permite tener en cuenta un factor de riesgo en la estimación de la corriente admisible de la línea de alta tensión en cuestión integrando en ella un modelo probabilístico. Por otra parte, dado que el método probabilístico es más fino y más cercano a la realidad estadística que un método determinista, la corriente admisible tiene grandes posibilidades de ser superior, lo que permite aumentar la capacidad de tránsito con una misma red de transporte de electricidad.

40

También se observará que la invención no se limita a las formas de realización anteriormente descritas. En efecto, para los especialistas será evidente que se pueden realizar diversas modificaciones a las formas de realización arriba descritas teniendo en cuenta la enseñanza aquí divulgada. En las siguientes reivindicaciones, los términos utilizados no deben ser interpretados como limitativos a las formas de realización expuestas en la presente descripción, sino que se deben interpretar como inclusivas de todos los equivalentes que las reivindicaciones pretenden abarcar con su formulación y cuya previsión está al alcance

45

50

de los especialistas aplicando sus conocimientos generales a la puesta en práctica de la enseñanza aquí divulgada.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión, que incluye:
 - la determinación previa (100) de una corriente admisible (A) de la línea de alta tensión (10) a partir de una temperatura límite de funcionamiento de la línea de alta tensión, llamada temperatura de reparto, parámetros de conducción de la línea de alta tensión y parámetros meteorológicos;
 - la medición (202) de una intensidad de corriente transmitida efectivamente por la línea de alta tensión (10) con ayuda de al menos un sensor (16) dispuesto en la línea de alta tensión; y
 - el control (204), mediante un dispositivo de control (18) conectado al sensor (16), de una superación de la corriente admisible (A) por la intensidad de corriente medida;

caracterizado porque la determinación previa (100) de la corriente admisible (A) incluye:

 - seleccionar (108, 110, 112, 114, 116) un valor de esta corriente admisible (A) mediante optimización de una probabilidad de superar la temperatura de reparto, estando definida esta probabilidad en base a un modelo de probabilidad conjunta de temperatura e intensidad de funcionamiento dependiente de los parámetros meteorológicos, y
 - registrar (118) el valor de la corriente admisible seleccionado en medios de almacenamiento (30) del dispositivo de control (18).

2. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según la reivindicación 1, en el que la selección (108, 110, 112, 114, 116) de un valor de la corriente admisible (A) incluye:
 - inicializar (108) la corriente admisible a un primer valor;
 - realizar el bucle de las siguientes etapas, ejecutado al menos una vez:
 - estimar (110) la probabilidad de superar la temperatura de reparto para el valor de corriente admisible dado;
 - comparar (112) esta probabilidad con un valor límite; y
 - actualizar (116) el valor de la corriente admisible en función de esta comparación.

3. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según la reivindicación 2, caracterizado porque la actualización (116) del valor de la corriente admisible consiste en aumentar este valor cuando la probabilidad estimada es inferior al valor límite y reducirlo si la probabilidad estimada es superior al valor límite.

4. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según la reivindicación 3, caracterizado porque el bucle de etapas incluye un criterio de interrupción, en particular un número máximo de repeticiones del bucle de etapas o una diferencia entre la probabilidad estimada y el valor límite inferior a un umbral predeterminado cuando esta probabilidad estimada es inferior al valor límite.

5. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, caracterizado porque la actualización (116) del valor de la corriente admisible incluye aplicar una convergencia por dicotomía.

6. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque el modelo de probabilidad conjunta de temperatura e intensidad de funcionamiento se define como el producto, integrado sobre múltiples intensidades comprendidas entre 0 y la corriente permanente admisible (A), de una probabilidad dependiente de los parámetros meteorológicos, de que la temperatura de funcionamiento sea superior a la temperatura de reparto para una intensidad dada por una probabilidad de que esta intensidad sea alcanzada teniendo en cuenta la corriente admisible (A).

7. Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según la reivindicación 6, caracterizado porque la probabilidad, dependiente de los parámetros meteorológicos, de que la temperatura de funcionamiento sea superior a la temperatura de reparto para una intensidad dada se calcula en base a un modelo establecido por muestreo estocástico a partir de muestras de variables aleatorias meteorológicas y de una función de transferencia predeterminada, que relaciona los parámetros meteorológicos y los parámetros de conducción de la línea de alta tensión a una temperatura de funcionamiento de la línea de alta tensión.

- 5 **8.** Procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque, en régimen transitorio de desequilibrio térmico entre las potencias de calentamiento y enfriamiento de un conductor aéreo (12) de la línea de alta tensión, la probabilidad de superar la temperatura de reparto se define con más precisión en base a un modelo de probabilidad conjunta de temperatura y de intensidad de funcionamiento corregido al menos mediante los dos factores multiplicadores siguientes:
- un factor que cuantifica la probabilidad de que aparezca un defecto en la línea de alta tensión, y
 - un factor que cuantifica la probabilidad de la duración de sobrecarga máxima de la línea de alta tensión.
- 10 **9.** Programa de ordenador descargable desde una red de comunicaciones y/o registrado en un soporte legible por ordenador y/o ejecutable por un procesador, caracterizado porque incluye instrucciones para la ejecución de las etapas de un procedimiento de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, cuando dicho programa es ejecutado en un ordenador.
- 15 **10.** Dispositivo (18) de control de una línea (10) de transmisión de corriente eléctrica de alta tensión que incluye:
- un calculador (34, 26) diseñado para la determinación previa de una corriente admisible (A) de la línea de alta tensión (10) a partir de una temperatura límite de funcionamiento de la línea de alta tensión, de la citada temperatura de reparto, de parámetros de conducción de la línea de alta
 - 20 - medios de almacenamiento (30) del valor de la corriente admisible (A) determinado;
 - una interfaz (22) de transmisión de datos diseñada para recibir datos de medida de una intensidad transmitida efectivamente por la línea de alta tensión (10) procedentes de al menos un sensor (16) dispuesto en la línea de alta tensión; y
 - 25 - un detector (34, 28; 38) de superación de la corriente permanente admisible (A) por la intensidad medida;
- caracterizado porque:
- los medios de almacenamiento (30) incluyen parámetros (P) de un modelo de probabilidad conjunta de temperatura y de intensidad de funcionamiento dependiente de los parámetros meteorológicos; y
 - 30 - el calculador (34, 26) está diseñado más particularmente para determinar la corriente admisible (A) de la línea de alta tensión (10) mediante la selección de un valor de dicha corriente admisible por optimización de una probabilidad de superar la temperatura de reparto, estando definida esta probabilidad en base al modelo de probabilidad almacenado.
- 35

Figura 1

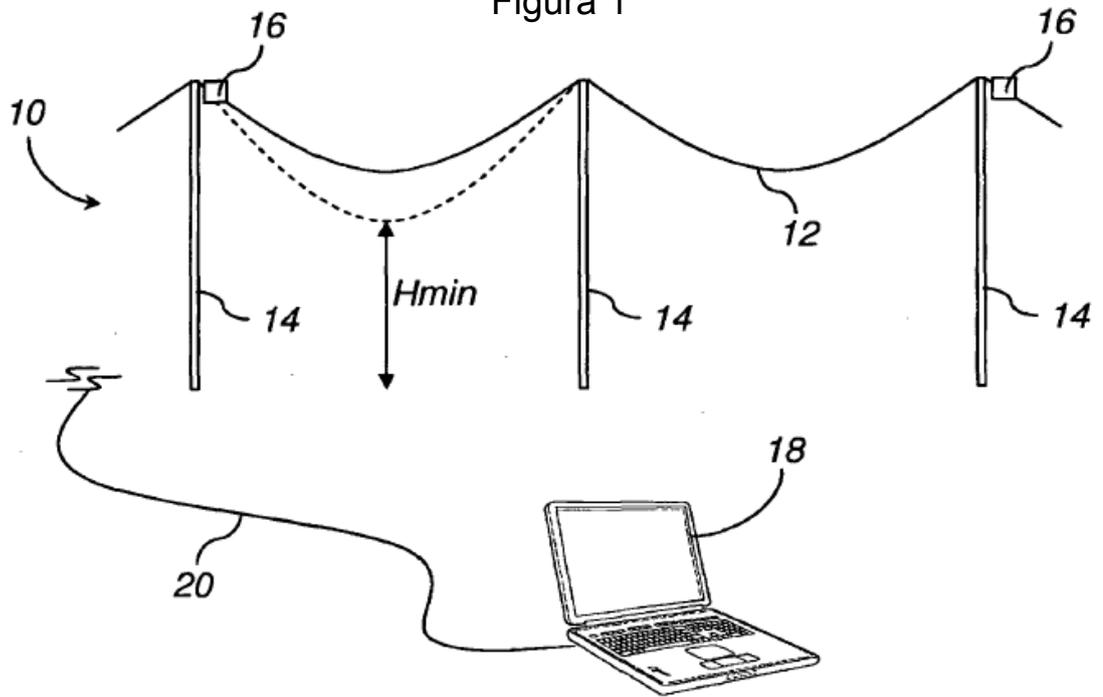


Figura 2

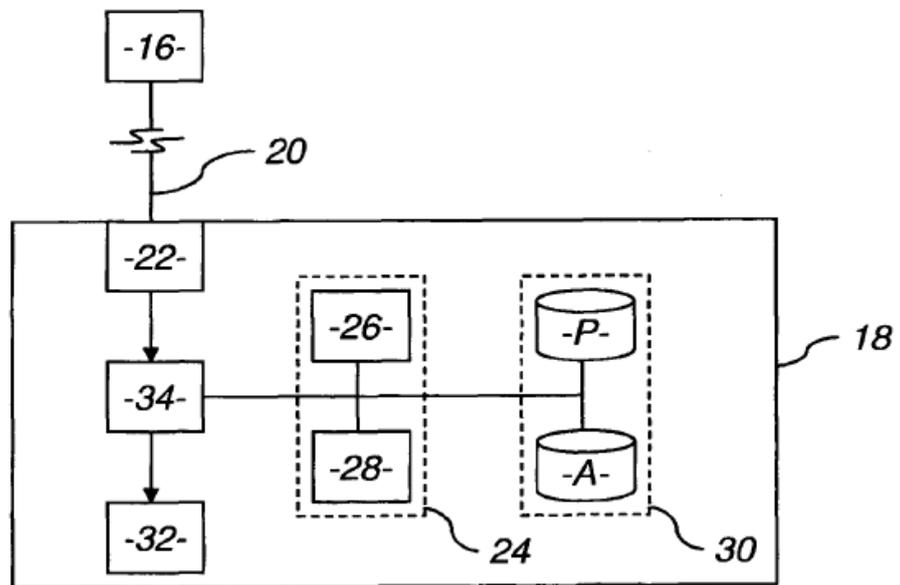


Figura 3

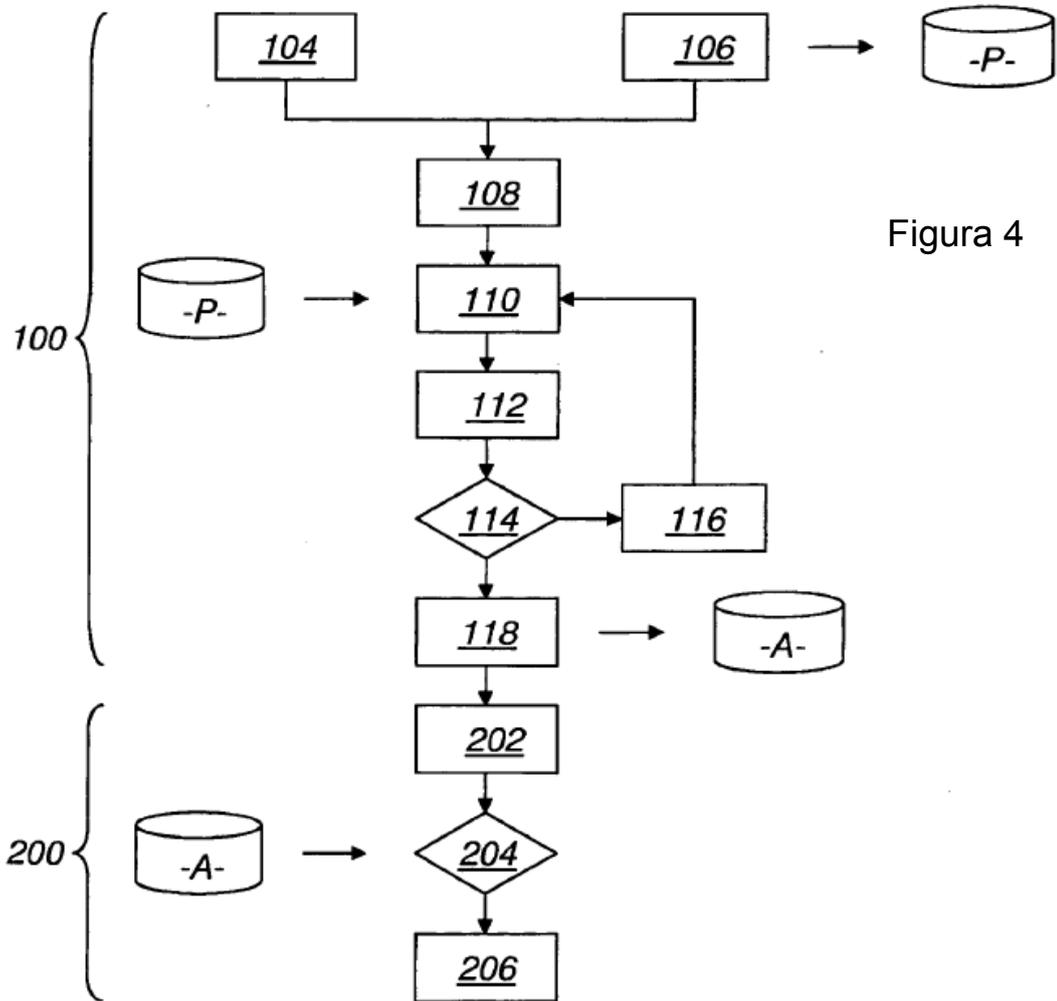
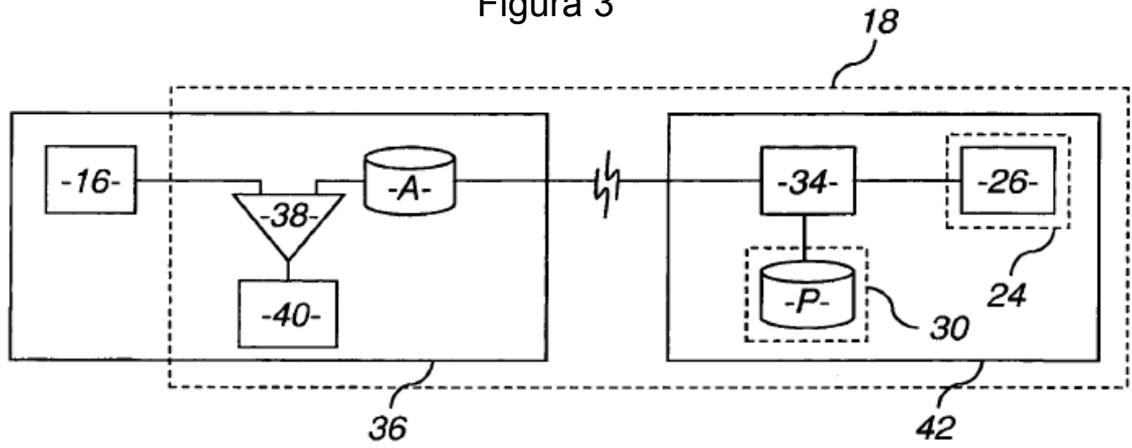


Figura 4

Figura 5

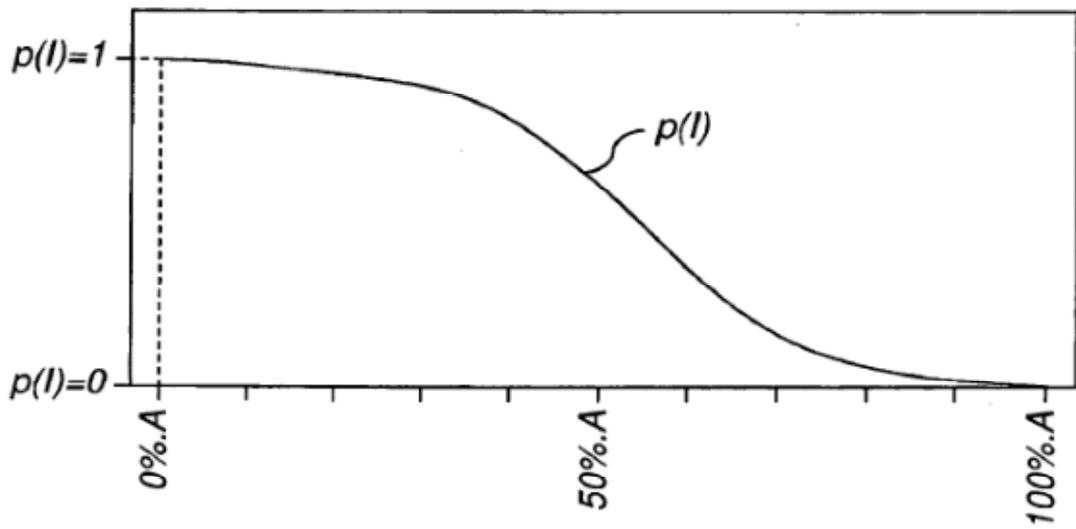


Figura 6

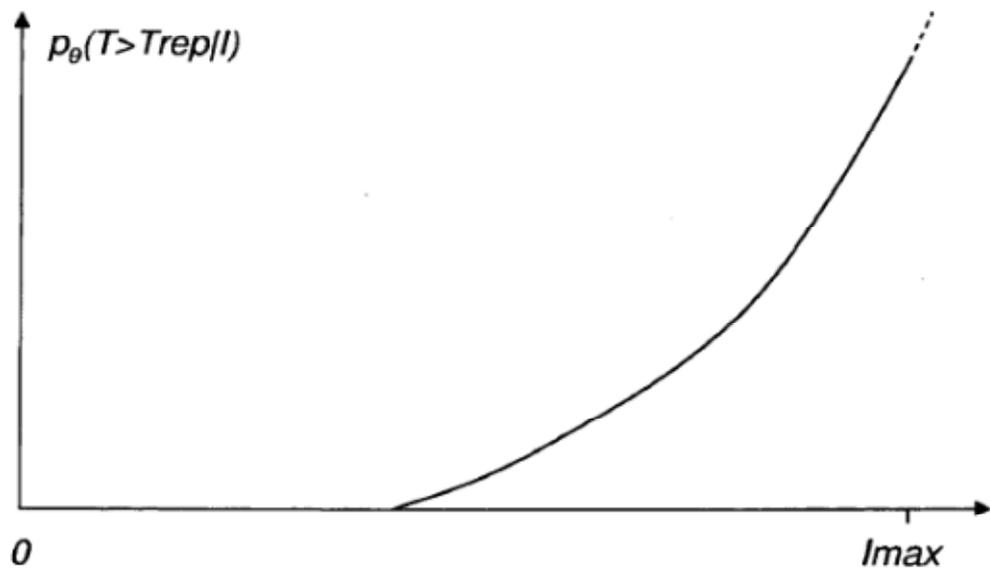


Figura 7

