

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 749 228**

21 Número de solicitud: 201800209

51 Int. Cl.:

**F03D 80/40** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**19.09.2018**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**19.03.2020**

71 Solicitantes:

**SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY  
INNOVATION & TECHNOLOGY, S. L. (100.0%)  
Parque Tecnológico de Bizkaia, Edificio 100  
48170 Zamudio (Bizkaia) ES**

72 Inventor/es:

**SANTILLÁN LEÓN, Arturo y  
MUÑOZ BABIANO, Almudena**

54 Título: **Método y sistema de detección de hielo para un aerogenerador**

57 Resumen:

Método y sistema de detección de hielo en un aerogenerador con una pluralidad de palas (10) y un generador (11). En el método se miden la temperatura, la humedad y la velocidad ( $V_G$ ) angular del generador (11). El método incluye procesar dicha velocidad ( $V_G$ ) para obtener el espectro frecuencial; identificar una banda de frecuencias asociada a la frecuencia característica de la pala (10) en dicho espectro; aplicar un filtro de Kalman sobre dicha banda para identificar la frecuencia de vibración instantánea; comparar dicha frecuencia instantánea con una frecuencia de referencia correspondiente a la frecuencia natural sin hielo; determinar la potencia producida por el aerogenerador (1), estimar la potencia producible, comparar ambas potencias, y determinar la presencia de hielo si la frecuencia instantánea y de referencia son diferentes, si la potencia medida es menor que la estimada y si la temperatura y la humedad son propicias para la formación de hielo.

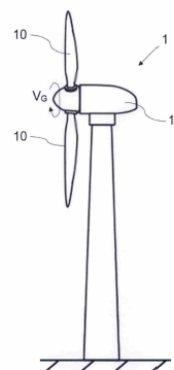


Fig. 1

## DESCRIPCIÓN

Método y sistema de detección de hielo para un aerogenerador.

### 5 Sector de la técnica

La presente invención se relaciona con métodos y sistemas para la detección de hielo en aerogeneradores, y con sistemas de detección asociados.

### 10 Estado anterior de la técnica

La presencia de parques eólicos en zonas frías hace necesario implementar sistemas y métodos que sean capaces de detectar anomalías en la curva de potencia asociada a la formación de hielo o escarcha en los aerogeneradores.

15 La acumulación de hielo en los aerogeneradores supone un problema grave en las zonas de climas fríos, que reduce la producción de energía y asimismo acorta el tiempo estimado de vida útil de los componentes principales en los aerogeneradores. Estos pueden verse afectados por diversos tipos de hielo, como la escarcha, lluvia sub-enfriada, nieve húmeda, etc.

20 Además, éste no es un problema que sólo suceda en climas fríos, ya que puede darse en gran número de condiciones diferentes. El hielo puede encontrarse en áreas costeras, principalmente en latitudes altas, y también en terreno montañoso. El problema principal en áreas de montaña o cercanas a las cimas de colinas es la formación de hielo cuando la base de las nubes se sitúa a una altura o altitud inferior al del centro o nacelle del aerogenerador. Dicho acontecimiento se llama formación de hielo dentro de una nube ("in-cloud icing"). La precipitación de nieve es otra causa conocida en la formación de hielo. Ambos casos normalmente muestran condiciones de nubosidad como factor común.

30 Los estándares conocidos, tal como la norma ISO 12494, definen varios tipos de hielo y las condiciones meteorológicas necesarias para su formación. Entre las variables empíricas encontramos la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la duración de la condición de presencia de la nube en el aerogenerador. Estos sistemas típicamente utilizan higrómetros basados en el principio de que el contenido de vapor de agua dentro de la nube está muy cercano o es superior a la presión de saturación del vapor. Ello significa que la humedad  
35 relativa es por lo general superior al 95 %. Sin embargo, dichos sistemas no son del todo fiables. En zonas costeras y en parques eólicos en el mar, los valores de humedad relativa pueden ser altos en todo momento, incluso sin la presencia de ninguna nube. Uno de tales sistemas se describe en US2005276696A1, donde se divulga un método para la detección de  
40 hielo en una pala de rotor que incluye el seguimiento de las condiciones meteorológicas y las características físicas de la turbina que pueda causar un desequilibrio de masa entre palas del rotor.

Otro de los problemas de los sistemas de este tipo se encuentra en el propio higrómetro. Si la  
45 calibración se efectúa para un valor de la presión de saturación de vapor cuando dicha agua se encuentra en forma líquida, puede resultar que se obtenga una medida incorrecta de la humedad relativa cuando la temperatura sea menor que 0° C.

50 EP2505831A2 del propio solicitante divulga un sistema y método para la detección de hielo en aerogeneradores que no sufre estos inconvenientes. Para ello, la solución divulgada en este documento propone medir la radiación solar directa recibida por el aerogenerador correspondiente mediante un sensor de radiación solar, y el valor medido se compara con una curva de radiación teórica en la que los valores medios en un día nublado están claramente por debajo de las curvas teóricas.

## Exposición de la invención

El objeto de la invención es el de proporcionar un nuevo método y sistema de detección de hielo para un aerogenerador, según se define en las reivindicaciones.

5 Un primer aspecto de la invención se refiere a un método de detección de hielo en un aerogenerador, comprendiendo el aerogenerador una pluralidad de palas y un generador. En el método se miden la temperatura y humedad ambientales y en el mismo, además, se ejecutan de manera dinámica y recurrente las siguientes etapas (para, al menos, una pala):

- 10
- se mide la velocidad angular del generador del aerogenerador,
  - se procesa dicha velocidad angular para obtener el espectro frecuencial de la misma,
  - 15 - se identifica una banda de frecuencias asociada a la frecuencia característica de la pala en dicho espectro frecuencial,
  - se aplica un filtro de Kalman (o algoritmo de Kalman) sobre dicha banda de frecuencias para identificar la frecuencia de vibración instantánea de dicha pala,
  - 20 - se compara dicha frecuencia instantánea identificada con una frecuencia de referencia previamente almacenada y que se corresponde con la frecuencia de la pala ante ausencia de hielo en las mismas, y
  - 25 - se determina la presencia de hielo en dicha pala si la frecuencia instantánea identificada difiere de la frecuencia de referencia y si la temperatura y la humedad medidas son propicias para la formación de hielo.

30 Estas etapas se ejecutan de manera cíclica y en todo momento.

Preferentemente, para determinar o no la presencia de hielo se considera que la diferencia entre la frecuencia instantánea identificada y la frecuencia de referencia sea mayor que un umbral predeterminado. El valor del umbral lo determina el controlador de planta o el fabricante, y lo puede hacer, por ejemplo, en base a experiencias previas.

35 La cantidad de hielo acumulada en una pala aumenta su rigidez, provocando variaciones en su frecuencia de vibración. Así, al identificarse la frecuencia instantánea de la pala (su frecuencia natural en esos momentos), ésta se puede comparar con la frecuencia natural de la pala en ausencia de hielo (la frecuencia de referencia), pudiéndose detectar cualquier variación entre la frecuencia instantánea identificada y la frecuencia de referencia. Esta variación es indicativa de la posibilidad de existencia de hielo en la pala, que se puede confirmar en función de la temperatura y humedad presente en esos momentos. Las condiciones ambientales (temperatura y humedad) necesarias para la generación de hielo ya son conocidas, por lo que, si se detectan estas condiciones juntamente con una variación de la frecuencia instantánea identificada con respecto a la frecuencia de referencia, se puede determinar la presencia de hielo en la pala sin riesgo a equivocarse (o con un porcentaje elevado de aciertos, en comparación con los sistemas actuales).

40 La identificación se realiza sin necesidad de añadir elementos adicionales, debido a que es un método que se implementa en el algoritmo de control del aerogenerador a nivel de software, puesto que los sensores o detectores necesarios para llevar a cabo el método están presentes en todos los aerogeneradores convencionales. Esto permite poder emplear este método de manera sencilla y no intrusiva en los nuevos aerogeneradores, pero también en los que ya

están instalados actualizando únicamente el software, sin incremento de coste adicional, incluso con la posibilidad de cargarlo remotamente.

5 La implementación del método aumentaría considerablemente la fiabilidad en la detección de hielo en las palas debido a que las frecuencias naturales de las palas no varían a menos que cambien sus propiedades físicas (entre ellas la rigidez, que estaría relacionada directamente con la presencia de hielo).

10 El método permite detectar el hielo en tiempo real, sin necesidad de que se tenga que acumular una cantidad importante de hielo en el aerogenerador, pudiendo activar estrategias de operación con hielo de manera inmediata y/o para aplicar las acciones correctivas requeridas, lo que permite aumentar la disponibilidad del aerogenerador y disminuir el riesgo de un mal funcionamiento, o incluso un deterioro, del aerogenerador.

15 Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema de detección de hielo en un aerogenerador. El sistema está adaptado para soportar el método del primer aspecto de la invención según cualquiera de sus realizaciones, obteniéndose así en el sistema las mismas ventajas que las comentadas para el método.

20 Estas y otras ventajas y características de la invención se harán evidentes a la vista de las figuras y de la descripción detallada de la invención.

#### **Descripción de los dibujos**

25 La figura 1 muestra un aerogenerador.

#### **Exposición detallada de la invención**

30 Un primer aspecto de la invención se refiere a un método para la detección de hielo en un aerogenerador 1 como el mostrado a modo de ejemplo en la figura 1, que comprende una pluralidad de palas 10 y un generador 11 con un rotor. El método está adaptado para implementarse sobre una pala 10, y preferentemente está adaptado para implementarse sobre cada una de las palas 10 del aerogenerador 1 de manera independiente, pudiendo detectarse así la presencia o ausencia de hielo en todas las palas 10 y de manera independiente.

35 En funcionamiento normal, las palas 10 giran a una velocidad determinada, provocando el giro del generador 11, de tal manera que dicho generador 11 comprende una velocidad angular  $V_G$ . Es sabido que un aerogenerador 1 vibra durante su funcionamiento normal, y que esta vibración afecta a todos sus elementos, incluyendo los sensores que pueda tener, y, por lo tanto, a las medidas realizadas por dichos sensores, de tal manera que dichas medidas comprenden componentes relativos a dichas frecuencias. Como se conoce el comportamiento natural del aerogenerador 1, es posible identificar además el origen de las diferentes frecuencias resultantes de la vibración del aerogenerador 1, es decir, a qué parte del aerogenerador 1 pertenecen dichas vibraciones.

40 En el método se miden la temperatura y humedad ambientales, de tal manera que se pueden identificar si se cumplen o no las condiciones atmosféricas para la generación de hielo.

45 El método que se implementa en una pala 10 comprende las siguientes etapas, que se ejecutan en el orden indicado:

- se mide la velocidad angular  $V_G$  del generador 11 del aerogenerador 1 (del rotor del generador 11),

- se procesa dicha velocidad angular  $V_G$  para obtener el espectro frecuencial de la misma,
- se identifica una banda de frecuencias asociada a la frecuencia característica de la pala 10 en dicho espectro frecuencial,
- se aplica un filtro de Kalman sobre dicha banda de frecuencias para identificar la frecuencia de vibración instantánea de dicha pala 10,
- se compara dicha frecuencia instantánea identificada con una frecuencia de referencia previamente almacenada y que se corresponde con la frecuencia natural de la pala 10 ante ausencia de hielo en las mismas,
- se determina la potencia eléctrica producida por el aerogenerador 1, realizando las medidas necesarias,
- se compara dicha potencia eléctrica determinada con la potencia eléctrica a producir estimada para ese momento por el aerogenerador 1 (la potencia estimada se puede calcular, por ejemplo, en función del viento presente en cada momento), y
- se determina la presencia de hielo en dicha pala 10 si la variación entre la frecuencia de referencia y la frecuencia instantánea identificada es mayor que un umbral predeterminado, si la potencia eléctrica producida es menor que la potencia eléctrica estimada y si la temperatura y la humedad medidas son propicias para la formación de hielo.

En el método, estas etapas se repiten además cíclicamente y de manera dinámica, lo que permite estar detectando la presencia o ausencia de hielo continuamente y en todo momento (en tiempo real).

Así, preferentemente se tienen que cumplir las siguientes tres condiciones para determinar la presencia de hielo en una pala 10:

1. determinación de una variación entre la frecuencia de referencia y la frecuencia instantánea identificada mayor que el umbral predeterminado,
2. detectar una temperatura y una humedad propicias para la formación de hielo, y
3. determinar una potencia producida menor a la potencia a producir estimada. Esta condición puede darse por cumplida simplemente si el valor de la potencia producida es menor que la estimada, o si dicha potencia producida es un porcentaje determinado menor que la estimada. Fijando un porcentaje se asegura en mayor medida que la disminución de potencia se debe a la presencia de hielo (si se cumplen además las dos condiciones anteriores), y no a una simple bajada temporal o instantánea debida a otras causas. El porcentaje determinado depende de los requerimientos del controlador de plata y/o del fabricante del aerogenerador 1, por ejemplo.

Como se ha comentado, en el método se detecta la velocidad angular  $V_G$  del generador 11 en tiempo real, y se procesa dicha velocidad angular  $V_G$ . Para ello, se aplica una técnica de procesamiento digital de señales que puede comprender desde un filtro pasa banda, un "Algoritmo Goertzel" o una mezcla del "Algoritmo Goertzel", por ejemplo.

Como se conoce la banda de frecuencias naturales correspondiente a cada uno de los elementos del aerogenerador 1, es posible identificar la banda de frecuencias asociada a la pala 10 en cuestión de una manera sencilla. Aplicando sobre esta banda de frecuencias

identificada un filtro o algoritmo Kalman se pueden identificar los estados ocultos (no medibles) de un sistema lineal con el fin de aumentar la precisión de la medida. El filtro Kalman es conocido y no se detalla su funcionamiento.

- 5 Se ha comprobado que la variación de la frecuencia de una pala 10 debido a la presencia de hielo es pequeña, por lo que aplicar un filtro Kalman se antoja muy relevante para poder detectar la presencia de hielo con mayor fiabilidad.

10 Preferentemente, además, como frecuencia de referencia se selecciona la frecuencia natural en el plano de giro de la pala 10, conocida comúnmente como frecuencia "in plañe", preferentemente la relativa a la 3ª componente o a la 6ª componente de la fundamental de la velocidad angular  $V_G$ , puesto que se ha comprobado que estas componentes sufren variaciones ante la presencia de hielo en la pala 10 correspondiente.

15 Además, en el método se puede determinar la cantidad de hielo acumulado en la pala 10 correspondiente, en función de la desviación de la frecuencia instantánea determinada con respecto a la frecuencia de referencia. Para ello, previamente se establecen tantos niveles de hielo como se requieran, asociándoles un rango de frecuencias determinado a cada uno de dichos niveles. Las frecuencias seleccionadas son próximas entre ellas, de tal manera que la presencia de hielo afecte a todas de manera análoga. Ante la presencia de hielo, la frecuencia correspondiente sufrirá una variación de ente 0,01 Hz y 0,1 Hz, por lo que cada rango comprenderá al menos una variación de 0,1 Hz entre su frecuencia máxima y su frecuencia mínima. A medida que se acumula hielo en la pala 10, la rigidez de la pala 10 aumenta lo que hace disminuir la frecuencia natural de la pala 10 en esas condiciones. Cuanto más hielo se forme en la pala 10 más aumenta la rigidez de la misma y más disminuye, por tanto, su frecuencia natural (más disminuye la frecuencia instantánea identificada, y, por tanto, aumenta la desviación con respecto a la frecuencia de referencia), de tal manera que cuantas más frecuencias adicionales a la frecuencia natural original se seleccionen (más rangos) más información se puede obtener sobre el hielo acumulado en la pala 10, es decir, se puede identificar con más precisión la cantidad de hielo presente en la pala 10, y no únicamente si hay o no hielo. Así, previamente se seleccionan tantas frecuencias como niveles de hielo se quieren detectar en la pala 10 más una, estando cada nivel de hielo asociado a un rango de frecuencias establecido entre cada dos frecuencias seleccionadas y siendo dicha frecuencia adicional la frecuencia seleccionada que se corresponde con una frecuencia natural (frecuencia de referencia) de la pala 10 correspondiente del aerogenerador 1. En este caso, si se determina la presencia de hielo en la pala 10 por determinarse una variación de la frecuencia natural (frecuencia instantánea identificada diferente a la frecuencia de referencia), se identifica a qué rango de frecuencias pertenece dicha frecuencia instantánea identificada y se determina el nivel de hielo presente en la pala 10 en función de dicha identificación.

40 Un segundo aspecto de la invención se refiere a un sistema de detección de hielo en un aerogenerador que comprende una pluralidad de palas 10 y un generador 11, que está adaptado para soportar el método del primer aspecto de la invención en cualquiera de sus realizaciones.

45 El sistema comprende un detector (no representado en las figuras) para detectar la velocidad angular  $V_G$  del generador 11, y un controlador (no representado en las figuras) que está comunicado con dicho detector para recibir dicha detección, y que está configurado para implementar el método del primer aspecto de la invención teniendo en cuenta dicha detección.

50 El controlador está así configurado para implementar los filtros empleados, y para realizar las etapas que se han comentado para el primer aspecto de la invención a partir de la detección de la velocidad angular  $V_G$  que recibe.

5 El sistema comprende además una memoria con el valor de la frecuencia de referencia previamente almacenado, así como el valor del resto de las frecuencias seleccionadas si fuese el caso, y con los niveles de hielo asociados a cada uno de los rangos de frecuencias generados a partir de dichas frecuencias almacenadas, pudiendo estar dicha memoria integrada en el controlador o ser un elemento independiente.

## REIVINDICACIONES

1. Método de detección de hielo para un aerogenerador, comprendiendo el aerogenerador (1) una pluralidad de palas (10) y un generador (11), **caracterizado porque** el método se ejecuta para una pala (10), y comprende medir la temperatura y la humedad ambientales, comprendiendo además las siguientes etapas, que se ejecutan en ese orden de manera dinámica y cíclica:
- se mide la velocidad angular ( $V_G$ ) del generador (11) del aerogenerador (1),
  - se procesa dicha velocidad angular ( $V_G$ ) para obtener el espectro frecuencial de la misma,
  - se identifica una banda de frecuencias asociada a la frecuencia característica de la pala (10) en dicho espectro frecuencial,
  - se aplica un filtro Kalman sobre dicha banda de frecuencias para identificar la frecuencia de vibración instantánea de dicha pala (10),
  - se compara dicha frecuencia instantánea identificada con una frecuencia de referencia previamente almacenada y que se corresponde con la frecuencia natural de la pala (10) ante ausencia de hielo en las mismas,
  - se determina la potencia eléctrica producida por el aerogenerador (1),
  - se compara dicha potencia eléctrica determinada con una potencia eléctrica estimada, y
  - se determina la presencia de hielo en dicha pala (10) si la frecuencia instantánea identificada difiere de la frecuencia de referencia, si se detecta que la potencia eléctrica determinada es menor que la potencia eléctrica estimada, y si la temperatura y la humedad medidas son propicias para la formación de hielo.
2. Método según la reivindicación 1, en donde se determina la presencia de hielo en dicha pala (10) si la diferencia entre la frecuencia instantánea identificada y la frecuencia de referencia es mayor que un umbral determinado.
3. Método según la reivindicación 2, en donde previamente se seleccionan tantas frecuencias como niveles de hielo se quieren detectaren la pala (10) más una, estando cada nivel de hielo asociado a un rango de frecuencias delimitado entre cada dos de dichas frecuencias seleccionadas y siendo dicha frecuencia adicional la frecuencia seleccionada que se corresponde con una frecuencia natural o frecuencia de referencia de la pala (10) correspondiente del aerogenerador (1), y en donde sí se determina la presencia de hielo en la pala (10), se compara la frecuencia instantánea identificada con dichas frecuencias seleccionadas y se determina el rango de frecuencias al que pertenece determinándose como nivel de hielo presente en la pala (10) el nivel de hielo asociado a dicho rango de frecuencias determinado.
4. Método según la reivindicación 3, en donde la frecuencia natural de la pala (10) correspondiente seleccionada está lo suficientemente alejada de las frecuencias generadas por la rotación del generador (11) para evitar que dicha frecuencia natural se vea afectada por las resonancias de dicho generador (11).



5. Método según la reivindicación 4, en donde la frecuencia natural de la pala (10) seleccionada se corresponde con la 3ª componente o a la 6ª componente de la frecuencia natural in plañe de la pala (10) correspondiente.
- 5 6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, en donde todas las frecuencias seleccionadas son próximas entre ellas, siendo la separación frecuencial entre dos frecuencias adyacentes seleccionadas de 0,1 Hz y siendo la separación frecuencial mínima entre dos frecuencias adyacentes seleccionadas de 0,01 Hz.
- 10 7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que se ejecuta para cada una de las palas (10) del aerogenerador (1).
8. Sistema de detección de hielo para un aerogenerador, comprendiendo el aerogenerador (1) una pluralidad de palas (10) y un generador (11), **caracterizado porque** está adaptado para soportar el método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.
- 15 9. Sistema según la reivindicación 8, que comprende un detector para detectar la velocidad angular ( $V_G$ ) del generador (11) del aerogenerador (1) y un controlador comunicado con dicho detector, estando el controlador configurado para implementar el método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 en función de dicha detección.
- 20 10. Sistema según la reivindicación 8 o 9, que comprende al menos una memoria con el valor de las frecuencias necesarias para implementar el método, previamente almacenadas.

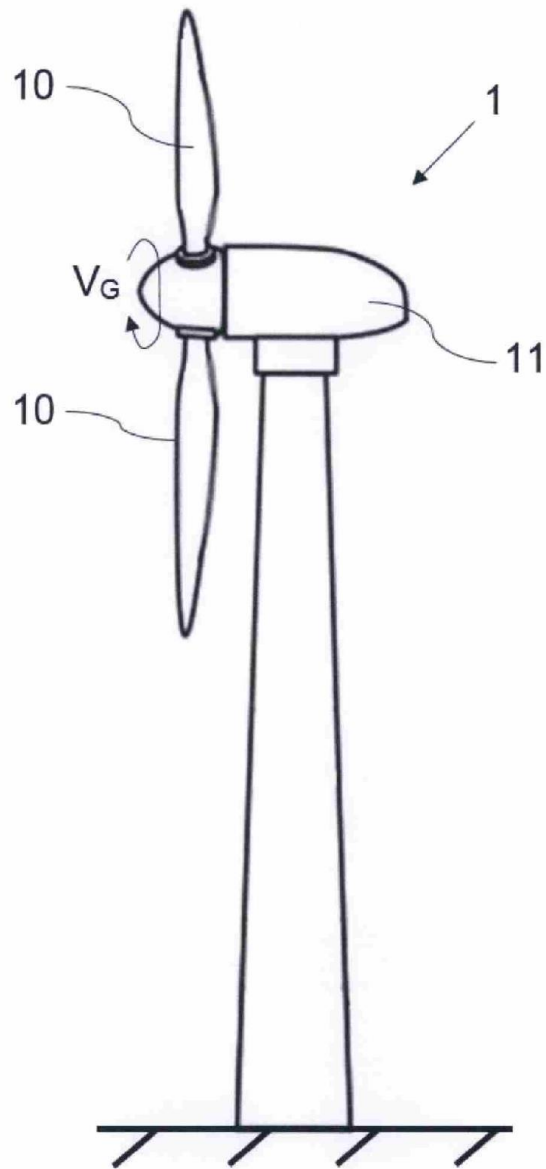


Fig. 1



- ②① N.º solicitud: 201800209  
 ②② Fecha de presentación de la solicitud: 19.09.2018  
 ③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **F03D80/40** (2016.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	WO 2017114638 A1 (FOS4X GMBH) 06/07/2017, Párrafos [17 - 43]; Figuras.	1-10
A	US 2010158688 A1 (BENITO PEDRO L et al.) 24/06/2010, Párrafos [21 - 44]; Figuras.	1-10
A	US 2015345467 A1 (KRAMER BERTIN) 03/12/2015, Párrafos [43 - 81]; Figuras.	1-10
A	US 2013031966 A1 (EGEDAL PER et al.) 07/02/2013, párrafos [43 - 58]; Figuras.	1-10

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia  
 Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría  
 A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita  
 P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud  
 E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
08.02.2019

Examinador  
M. A. López Carretero

Página  
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

F03D

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC