

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 951 264**

51 Int. Cl.:

**G01M 13/02** (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.05.2017 PCT/DK2017/050136**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.11.2017 WO17190746**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.05.2017 E 17723256 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.07.2023 EP 3452799**

54 Título: **Método de identificación de un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador**

30 Prioridad:

**04.05.2016 DK 201670295**

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

**19.10.2023**

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**RAMAKRISHNAN, PATTABIRAMAN TRICHY y  
NARAYANPUR, MALLIKARJUN**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 951 264 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 de identificación de un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador

### Antecedentes de la invención

5 Esta invención se refiere al campo de la identificación de fallos en sistemas de engranajes y, particularmente, al campo de la identificación de fallos en un sistema de engranajes en un aerogenerador.

Los aerogeneradores son una fuente de energía renovable, y muchos países han aumentado el uso de estas turbinas en un esfuerzo por reducir su dependencia de los combustibles fósiles nocivos. De hecho, se están creando grandes formaciones de aerogeneradores, conocidas como centrales de energía eólica, en todo el mundo como parte de una estrategia para reducir la contaminación.

10 De este modo, asegurar el funcionamiento continuo y sin problemas de los aerogeneradores está llegando a ser cada vez más importante, como lo es la necesidad de minimizar el tiempo de inactividad de las turbinas defectuosas. No obstante, con el número rápidamente creciente de aerogeneradores en operación, esto está llegando a ser cada vez más difícil.

15 Un tipo común de fallo en un aerogenerador son los fallos dentro de la caja de engranajes del aerogenerador. Estos fallos son notoriamente difíciles de diagnosticar debido a la complejidad de las cajas de engranajes y la baja relación señal a ruido. Se produce un gran ruido por el funcionamiento de los engranajes en comparación con la señal relativamente débil producida por un pequeño defecto de engranaje. Por lo tanto, este tipo de fallo típicamente da como resultado tiempos de inactividad prolongados y es un problema importante para que los aerogeneradores lleguen a ser una fuente de energía alternativa viable a los combustibles fósiles.

20 Se han hecho varios intentos para superar este problema. Por ejemplo, en el documento de patente US 8171797B2, se describe un método para evaluar el deterioro en una caja de engranajes. Este método usa datos obtenidos de una caja de engranajes en operación y usa estos datos para proporcionar una indicación de deterioro. Se obtienen datos de una caja de engranajes en operación con respecto a las frecuencias de armónicos y sus bandas laterales relacionadas generadas como consecuencia de la operación de la caja de engranajes. En una primera realización, una Relación de Energía de Banda Lateral (SER) se calcula dividiendo la amplitud de la suma de las señales de banda lateral asociadas con un armónico por la amplitud del armónico. En una segunda realización, una SER se calcula en base a las amplitudes de banda lateral asociadas con los armónicos adyacentes. La relación se puede monitorizar a lo largo del tiempo o comparar con uno o más valores para proporcionar una indicación del deterioro.

25 No obstante, tales métodos no han tenido en cuenta una representación verdadera de la distribución de energía que resulta de un fallo en el engranaje. Como resultado, estos métodos no proporcionan una representación precisa de la progresión de engranaje y pueden diagnosticar incorrectamente una caja de engranajes en buen estado como que tiene un fallo, o pueden proporcionar información errónea o incorrecta.

### Compendio de la invención

35 Hemos apreciado la necesidad de mejorar los sistemas y métodos existentes disponibles actualmente y, en consecuencia, hemos proporcionado realizaciones de una invención las cuales pueden tener beneficios que incluyen costes de garantía reducidos, mayor vida útil y fiabilidad de la máquina, coste reducido de piezas de repuesto y mayor tiempo de entrega para el mantenimiento y la planificación de repuestos.

La invención se define en las reivindicaciones independientes, a las que ahora se dirige una referencia. Las características preferidas se exponen en las reivindicaciones dependientes.

40 La invención proporciona un método de identificación de un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador. El método comprende la determinación de dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central según las vibraciones del sistema de engranajes. El método comprende además determinar una pluralidad de amplitudes de banda lateral de las amplitudes de frecuencia de armónico central. El método incluye además sumar las amplitudes de frecuencia de armónico central para calcular una amplitud de frecuencia de armónico central total y sumar cada una de las amplitudes de banda lateral de las amplitudes de frecuencia de armónico central para calcular una amplitud de banda lateral total. Además, se determina un valor indicativo del daño sufrido por el sistema de engranajes en base a la amplitud de banda lateral total y la amplitud de frecuencia de armónico central total.

45 Tal método es ventajoso en la medida que actualmente no existe una guía clara en la industria en cuanto a qué armónico necesita ser analizado para identificar y rastrear cualquier fallo dado dentro de un sistema de engranajes. Esto es porque el armónico más apropiado para analizar en una situación dada puede variar de un fallo a otro, lo que significa que no se puede usar un único armónico en todos los fallos. Esto se añade a la complicación de identificar y rastrear fallos. La presente invención resuelve este problema teniendo en cuenta más de un armónico en el análisis, así como las bandas laterales asociadas con cada armónico que se considera. La relación resultante se puede usar entonces de manera general en todos los fallos; no hay necesidad de analizar individualmente diferentes

armónicos y sus respectivas bandas laterales en la medida que se han tenido en cuenta en las sumas totales descritas en la presente memoria.

Opcionalmente, las amplitudes de frecuencia de armónico central son las amplitudes de frecuencia del engranaje dentado de armónico central.

5 Opcionalmente, el sistema de engranajes es un sistema de engranajes de múltiples etapas, en donde cada amplitud de frecuencia de armónico central está correlacionada con un engrane entre los engranajes. Además, el método comprende opcionalmente determinar un fallo dentro de un engranaje particular dentro del sistema de engranajes en base al valor indicativo de daños para una frecuencia de armónico central particular. Esto es ventajoso en la medida que permite que el controlador, o alternativamente o además, un operador, del aerogenerador o parque eólico determine dónde se encuentra el fallo en el sistema de engranajes y, por lo tanto, permite que el fallo sea abordado de manera eficiente.

Opcionalmente, la primera amplitud de frecuencia de armónico central de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central está en una frecuencia de armónico fundamental para el sistema de engranajes.

15 Opcionalmente, una o más de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central es un armónico de una amplitud de frecuencia fundamental.

Opcionalmente, una tercera amplitud de frecuencia de armónico central está en un segundo armónico de la primera amplitud de frecuencia de armónico, y una segunda amplitud de frecuencia de armónico está en un primer armónico de la primera amplitud de frecuencia de armónico diferente de la segunda amplitud de frecuencia de armónico.

20 Opcionalmente, determinar el valor comprende calcular una relación de la amplitud de frecuencia de armónico central total y la amplitud de banda lateral total asociada o, alternativamente, calcular una relación de la amplitud de banda lateral total asociada y la amplitud de frecuencia de armónico central total. La relación se compara con un umbral para identificar si está presente un fallo en el sistema de engranajes. Además, la relación se calcula opcionalmente repetidamente mientras que la relación está dentro del umbral para obtener una pluralidad de valores de relación y, si un valor de relación se calcula que está fuera del umbral, opcionalmente emitir datos que indican que se ha identificado un fallo en el sistema de engranajes. Esto permite que el buen estado del sistema de engranajes sea monitorizado por un sistema que incorpora la invención, de manera que cuando se necesite una acción en relación con un fallo, se emita una recomendación.

Opcionalmente, el método comprende además calcular repetidamente la relación durante un período de tiempo predeterminado para obtener una pluralidad de valores de relación.

30 Opcionalmente, los valores de relación se usan para rastrear la progresión de un fallo. El fallo se rastrea opcionalmente comparando cada valor de relación calculado sucesivamente con un valor de umbral. Alternativamente, o además, se rastrea el fallo comparando cada valor de relación de la pluralidad de valores de relación con uno o más de otros valores de relación de la pluralidad de valores de relación. Esto es ventajoso porque permite el rastreo de una reducción en la altura entre la amplitud central total y la amplitud de banda lateral total y tal rastreo es indicativo de la progresión del fallo del engranaje.

Opcionalmente, se usan al menos seis amplitudes de banda lateral a cada lado de cada amplitud de frecuencia de armónico central para calcular la amplitud de banda lateral promedio respectiva.

Opcionalmente, el método que comprende además controlar el aerogenerador en base al valor indicativo de daño.

40 Las realizaciones de la invención también proporcionan un controlador para controlar un aerogenerador o una central de energía eólica, el controlador que está configurado para llevar a cabo cualquiera de los métodos descritos en la presente memoria. La invención también proporciona un aerogenerador o una central de energía eólica que comprende tal controlador.

45 Las realizaciones de la invención también proporcionan un programa informático que, cuando se ejecuta en un controlador u otro dispositivo informático, le hace llevar a cabo cualquiera de los métodos descritos en la presente memoria.

### Breve descripción de los dibujos

La invención se describirá con más detalle a modo de ejemplo con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

la Fig. 1 es un diagrama de los componentes funcionales principales de un sistema que incorpora la invención;

50 la Fig. 2 es un diagrama de flujo de los pasos funcionales principales de un método que incorpora la invención;

la Fig. 3 muestra un espectro de transformada rápida de Fourier de un sistema de engranajes en buen estado según una primera implementación específica de la invención;

la Fig. 4 muestra un espectro de transformada rápida de Fourier de un sistema de engranajes defectuoso según una primera implementación específica de la invención;

la Fig. 5 muestra un gráfico de tendencia de CSER para un número de amplitudes de frecuencia de armónico central de un sistema de engranajes según una primera implementación específica de la invención;

5 la Fig. 6 muestra un espectro de transformada rápida de Fourier de un sistema de engranajes en buen estado según una segunda realización específica de la invención;

la Fig. 7 muestra un espectro de transformada rápida de Fourier de un sistema de engranajes defectuoso según una segunda implementación específica de la invención;

10 la Fig. 8 muestra un gráfico de tendencia de CSER para un número de amplitudes de frecuencia de armónico central de un sistema de engranajes según una segunda implementación específica de la invención.

### Descripción de una realización preferente de la invención

La invención se puede incorporar en una variedad de métodos y sistemas para identificar un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador. La realización principal descrita es un controlador para implementar un método de identificación de un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador según la presente invención. En primer lugar, se describirá con referencia a la figura 1 un sistema que incorpora la invención. Luego, se describirá con referencia a la figura 2 un método de incorporación implementado por el sistema de incorporación, antes de pasar a dos ejemplos específicos que proporcionan detalles adicionales de cómo se puede implementar la invención.

La figura 1 muestra un sistema 100 según una realización de la invención. El sistema 100 comprende un aerogenerador 101, que en sí mismo comprende un sistema de engranajes 102 y un sensor 103. La configuración general y la disposición de los engranajes dentro de un aerogenerador son bien conocidas en la técnica y, como tal, no se describirán en detalle. No obstante, para ayudar a la comprensión, se debería señalar que los sistemas de engranajes usados en aerogeneradores típicamente son de múltiples etapas, por ejemplo, una etapa de baja velocidad, una etapa de velocidad intermedia y una etapa de alta velocidad, permitiendo que la velocidad de rotación de los engranajes se aumente y disminuya según sea apropiado. En la presente realización se usa una caja de engranajes de tres etapas. No obstante, se apreciará que la invención es aplicable a cualquier disposición de engranajes que se pueda usar de manera concebible dentro de un aerogenerador. Por ejemplo, se puede usar cualquier caja de engranajes de dos etapas, de tres etapas u otra caja de engranajes de múltiples etapas adecuada para su uso en un aerogenerador.

El sistema comprende además un controlador 104 y un visualizador 105. El controlador 104 y el visualizador 105 están integrados para formar una única unidad y dispuestos de manera separada del aerogenerador. La única unidad puede ser un ordenador que esté en comunicación con el aerogenerador 101. Alternativamente, la única unidad puede ser una tableta u otro dispositivo apropiado. Además, aunque el controlador y el visualizador se describen como que son una única unidad, son posibles otras disposiciones. Por ejemplo, el sistema 100 puede estar totalmente integrado en el aerogenerador 101, de manera que el controlador 104 y el visualizador 105 estén unidos directamente al aerogenerador 101. Alternativamente, el controlador puede estar integrado en el aerogenerador pero el visualizador se dispone en otro lugar, o viceversa, o cualquier disposición concebible adicional.

En respuesta a la rotación del aerogenerador 101, los engranajes del sistema de engranajes 102 girarán. La rotación de los engranajes hace que el sistema de engranajes 102 vibre, produciendo un patrón vibratorio para ese sistema de engranajes 102. Este patrón de vibración es dependiente del buen estado del sistema de engranajes 102. Si no están presentes fallos en el sistema de engranajes (es decir, es un sistema en buen estado), los dientes de los engranajes adyacentes se entrelazarán o engranarán suavemente y producirán un cierto patrón vibratorio. Si está presente un fallo, el engranaje que contiene el fallo no se engranará suavemente con sus engranajes adyacentes y esto cambiará el patrón vibratorio.

Los fallos en el sistema de engranajes típicamente se relacionan con dientes de engranaje dañados. Por ejemplo, un diente de engranaje agrietado o roto afectará a cómo se engrana ese engranaje con los engranajes con los que se interconecta, lo que afecta el patrón vibratorio del sistema. No obstante, son posibles otros tipos de fallos de engranajes, como será evidente para los expertos en la técnica. Se apreciará que el presente método es aplicable a cualquier fallo de engranaje concebible que afecte al engrane de engranajes.

El sensor 103 se usa para medir las vibraciones producidas por el sistema de engranajes y se puede usar para recopilar datos sobre el estado del sistema de engranajes. Los datos del sensor se pueden proporcionar como parte de los datos de los sistemas de monitorización de estado (CMS). El sensor 103 puede ser un acelerómetro, que detecta la aceleración causada por las vibraciones y está montado en la caja de engranajes. Se apreciará que el sensor se puede montar con respecto al sistema de engranajes de cualquier forma que permita al sensor medir las vibraciones del sistema de engranajes. Por ejemplo, en la presente realización, el sensor se puede montar en una superficie exterior de la caja de engranajes o el sensor se puede montar en una superficie interior de la caja de engranajes. Alternativamente, el sensor se puede montar en cualquier superficie del aerogenerador que permita que

los datos vibratorios sean medidos. El sensor 103 puede ser un acelerómetro o cualquier otro sensor que sea apropiado para medir las vibraciones del sistema de engranajes 102.

Los datos vibratorios obtenidos por el sensor 103 luego se recopilan o reciben por el controlador 104. Los datos se pueden recopilar por el controlador 104 usando cualquier dispositivo de adquisición de datos (DAU) apropiado.

5 Luego, el controlador 104 almacena los datos vibratorios recopilados en la memoria. El controlador puede comprender un dispositivo de almacenamiento, tal como una unidad de disco duro o una unidad de estado sólido, en el que puede almacenar y recuperar datos vibratorios. Alternativamente, o además, el controlador se puede conectar a un servidor, al que el controlador puede acceder tanto para almacenar datos vibratorios recién recopilados como también recuperar datos vibratorios que ya se han almacenado.

10 Aunque el controlador se ha descrito en la presente realización como que comprende la DAU, se apreciará que la DAU puede ser un componente separado que recopila los datos del sensor y retransmite los datos al controlador. Alternativamente, o además, si el controlador se conecta a un servidor, la DAU puede enviar los datos vibratorios directamente al servidor.

15 El controlador 104 recupera datos vibratorios de la memoria y analiza los datos según los métodos que se describen en la presente memoria. A partir de los resultados del análisis, el controlador 104 es capaz de identificar si un fallo está presente en el sistema de engranajes 102 en el aerogenerador 101. El controlador 104 puede realizar el análisis usando un algoritmo en una plataforma de MATLAB (TM). Alternativamente, se puede usar cualquier plataforma de software apropiada para implementar la invención. Los resultados se pueden escribir por el controlador 104 en cualquier formato apropiado, incluyendo el formato xl, y, en consecuencia, se puede mostrar visualmente, tal como siendo representado como uno o más gráficos. Esto facilita la transmisión de la información con respecto al fallo a un operador del sistema 100.

20 Como se explica a continuación, el controlador 104 puede rastrear la progresión de un fallo en el sistema de engranajes monitorizando los datos vibratorios que recibe del sensor 103. Además, el controlador 104 puede enviar información con relación al fallo y su progresión, opcionalmente junto con recomendaciones en cuanto a cualquier acción que se debería tomar en relación con el fallo, a un visualizador 105, que se puede ver por un usuario final. Esto permite que el usuario final determine fácilmente el buen estado del sistema de engranajes en cualquier punto en el tiempo y si el fallo es de tal manera que se requiera una acción adicional.

25 La figura 2 muestra un ejemplo de un método que incorpora la presente invención de identificación de un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador. En la presente realización, el método se implementa por el controlador 104 del sistema 100 mostrado en la figura 1. No obstante, se pueden usar sistemas distintos de los que se muestran en la figura 1 para implementar la invención.

30 El proceso de identificación de un fallo comienza en el paso 201. En el paso 202, el controlador 104 recibe datos vibratorios del sensor 103 en forma de una forma de onda de tiempo sin procesar. El controlador 104 calcula entonces una transformada rápida de Fourier (FFT) en el paso 203 convirtiendo la forma de onda de tiempo sin procesar en el dominio de frecuencia. Los principios generales detrás de los pasos 202 y 203 son ambos bien conocidos en la técnica y, como tal, no se describirán más.

35 El controlador 104 entonces analiza los datos de FFT y obtiene una primera y segunda amplitudes de frecuencia de armónico central según las vibraciones medidas del sistema de engranajes en el paso 204. La primera amplitud de frecuencia de armónico central es una amplitud de frecuencia de engranaje de dientes fundamental, y la segunda amplitud de frecuencia de armónico central es un armónico de la primera amplitud de frecuencia de engranaje de dientes central. Cada engranaje del sistema de engranajes 102 tiene una frecuencia de engranaje de dientes fundamental (TMF1), que representa la frecuencia a la que se juntan los dientes de los engranajes entrelazados, es decir, el número de dientes multiplicado por la velocidad del eje. Como tal, el controlador puede obtener una amplitud específica en relación con un engranaje particular, permitiendo que el sistema monitoree fallos con relación a una etapa particular del sistema de engranajes 102, es decir, la frecuencia a la que se mide una amplitud es indicativa de un engranaje particular que es responsable de producir esa amplitud.

40 Cualquier amplitud obtenida por el controlador 104 representa una aceleración de las vibraciones medidas por el sensor. A la frecuencia de engranaje de dientes de un engranaje particular en el sistema de engranajes, generalmente habrá un pico en la aceleración de vibración medida. Como la frecuencia de engranaje de dientes es una cantidad conocida, el controlador puede mirar directamente a esta frecuencia y obtener el pico en la aceleración. El valor de la aceleración obtenida por el controlador 104 es la amplitud de frecuencia de engranaje de dientes para el engranaje. Debido a que la frecuencia de engranaje de dientes es una cantidad conocida, los picos de frecuencia (incluyendo los armónicos) se pueden asociar con el engranaje particular responsable de generar dichos picos.

45 Además, cada frecuencia de engranaje de dientes fundamental tiene armónicos más altos asociados con ella (TMF2, TMF3, etc.). Estos armónicos más altos proporciona información complementaria adicional con respecto a un fallo y su progresión. Además, para tipos de fallos particulares, cualquiera de estos armónicos más altos puede ser más adecuado para identificar y rastrear la progresión de un fallo que la amplitud de TMF1 (es decir, para ciertos tipos de fallos, un armónico particular puede ser más apropiado de monitorizar que otro armónico). Se debería

entender que estos armónicos más altos de la frecuencia de engranaje de dientes fundamental se relacionan todos con el engranaje particular con el que está asociada la frecuencia fundamental; estas frecuencias de armónico central son un conjunto de frecuencias de armónico que se relacionan con un engranaje particular.

5 Además, se debería apreciar que el controlador 104 puede obtener datos vibratorios de más de un engranaje del sistema de engranajes. De este modo, el controlador puede obtener más de un conjunto de frecuencias de armónico, con cada conjunto que está asociado con un engranaje particular. Por lo tanto, el controlador 104 no se limita a monitorizar un único engranaje. De hecho, el controlador 104 puede monitorizar el buen estado de múltiples engranajes realizando el análisis como se describe a continuación en múltiples conjuntos de frecuencias de armónico. Como resultado, si está presente más de un fallo a lo largo de más de un engranaje, el controlador 104 puede identificar y rastrear la progresión de uno de estos fallos, o dos o más de estos fallos simultáneamente.

10 Aunque la presente realización se ha descrito en relación con las amplitudes de frecuencia de engranaje de dientes, se apreciará que se pueden usar otras amplitudes de frecuencia de armónico apropiadas. Por ejemplo, se puede usar la frecuencia de rotación u otra cantidad apropiada obtenida por los datos de CMS. Además, se pueden obtener armónicos adicionales por el controlador en el paso 204. Por ejemplo, se pueden obtener la TMF1, TMF2 y TMF3, o se pueden obtener la TMF2 y TMF3 y no la TMF1, o cualquier otra variación adecuada para identificar un fallo.

15 Una vez que se han obtenido las amplitudes de frecuencia de armónico central en el paso 204, el controlador 104 determina una pluralidad de amplitudes de banda lateral de la amplitud de TMF1 y una pluralidad de amplitudes de banda lateral de la segunda amplitud de frecuencia de armónico central en el paso 205. Estas bandas laterales son el resultado de una modulación de las frecuencias de armónico central debido a imperfecciones en los engranajes. En otras palabras, las bandas laterales se desarrollan alrededor de una frecuencia central como resultado de la modulación de esa frecuencia central. Esta modulación es en sí misma el resultado de las imperfecciones del engranaje y el número de bandas laterales y sus amplitudes dependen de la imperfección particular. Si el sistema de engranajes 102 está en buen estado y los engranajes se engranan eficientemente, las amplitudes de banda lateral serán pequeñas en comparación con sus amplitudes centrales, en la medida que habrá poca modulación de las amplitudes centrales. Si está presente un fallo y los engranajes no se engranan correctamente, habrá una mayor modulación de las frecuencias centrales, y aumentarán las amplitudes de las bandas laterales con relación a las amplitudes de frecuencia central.

20 Típicamente hay una pluralidad de amplitudes de banda lateral dispuestas en frecuencias separadas uniformemente en cada lado de la frecuencia central, con cada amplitud de banda lateral que contiene alguna información con respecto a la modulación de la frecuencia central. En la presente realización, las seis primeras amplitudes de banda lateral a cada lado de cada una de las frecuencias centrales se calculan en el paso 205. Se ha encontrado experimentalmente que este número proporciona los resultados óptimos para identificar y rastrear la progresión de un fallo. No obstante, se apreciará que se podrían usar más o menos bandas laterales. También se apreciará que no es necesario usar un número igual de bandas laterales a cada lado de la frecuencia central. Por ejemplo, se podrían obtener 12 bandas laterales en un lado de la frecuencia central y ninguna en el otro lado.

25 Todas las amplitudes de banda lateral obtenidas en el paso 205 se suman luego entre sí en el paso 206 para obtener una amplitud de banda lateral total, es decir, las amplitudes de banda lateral de ambas de la amplitud de TMF1 y la amplitud de TMF2 se incluyen en la suma para obtener una amplitud de banda lateral total única.

30 En el paso 207, las amplitudes centrales de TMF1 y TMF2 se suman entre sí para obtener una amplitud de frecuencia de armónico central total.

35 Como se trató anteriormente, si se obtienen armónicos adicionales por el controlador en el paso 204, entonces estas amplitudes y sus amplitudes de banda lateral se incluyen en el cálculo en el paso 207 y 206, respectivamente.

40 Una vez que se han calculado tanto la amplitud de frecuencia de engranaje de dientes total como la amplitud de banda lateral total de la amplitud de frecuencia de engranaje de dientes fundamental por el controlador 104, el controlador determina un valor indicativo del daño sufrido por el sistema de engranajes en base a la amplitud de frecuencia de armónico central total y la amplitud de banda lateral total en el paso 208. En la presente realización, este valor es una relación de la amplitud de banda lateral total y la amplitud de frecuencia de armónico central total, a la que se hace referencia de aquí en adelante como la Relación de Energía de Banda Lateral Combinada (CSER).

45 En los pasos 209 - 212, el controlador 104 analiza la CSER, identifica si está presente un fallo en el sistema de engranajes 102 y determina si emitir una recomendación en base a los datos analizados.

50 Como se trató anteriormente, si está presente un fallo, la amplitud de las bandas laterales es mayor con relación a la amplitud central que si no está presente ningún fallo. De este modo, cuanto menor sea el valor de la CSER, en mejor estado estará el sistema de engranajes 102 y, a la inversa, cuanto mayor sea la CSER, más grave será el fallo. Por lo tanto, en el paso 209, el controlador 104 puede comparar la CSER con un valor de umbral. En el paso 210, el controlador puede evaluar si la CSER está por encima o por debajo del valor de umbral. Si la CSER está por encima del umbral, el fallo es grave y se requiere una acción (por ejemplo, la instalación de un nuevo engranaje), y el controlador puede emitir una recomendación en el paso 212. Esta recomendación se envía al visualizador 105 para

que se vea por un usuario final. De manera correspondiente, si la CSER está por debajo del umbral, el fallo no es grave y el controlador reinicia el proceso en el paso 211.

5 El controlador entonces puede repetir el proceso hasta que se alcance el umbral, calculando una pluralidad de valores de CSER. El proceso se puede repetir a intervalos y, en particular, se puede repetir periódicamente. Estos valores se pueden comparar en paso 209, y cualquier cambio en los valores se puede monitorizar. De esta forma, se puede monitorizar continuamente la progresión de un fallo por el controlador. Esto se hace hasta que el fallo llega a un punto donde se requiere una acción. En ese punto, se puede emitir una recomendación. La recomendación puede indicar dónde en el sistema de engranajes se encuentra el fallo, qué acción se requiere o proporcionar cualquier información que pueda ser útil para abordar el fallo. Como se describió anteriormente, los valores se pueden escribir en un formato xl y trazar en consecuencia. De este modo, el controlador puede producir gráficos que muestren claramente la progresión de un fallo.

10 La recomendación se puede emitir al visualizador 105, para que un operador la vea, junto con cualquier gráfico o información adicional que pueda ser útil al operador al abordar el fallo.

15 De este modo, se proporciona un método de identificación de un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador que puede identificar fallos con precisión y rastrear su progresión.

20 Son posibles variaciones de las características de la realización. Por ejemplo, el valor indicativo de los daños sufridos por el sistema de engranajes no tiene por qué ser la CSER. El valor puede ser igual a la inversa de la CSER. Alternativamente, el valor puede no ser una relación, puede ser una diferencia entre las cantidades o cualquier otra operación matemática que sea adecuada como valor indicativo del daño sufrido por el sistema de engranajes.

25 Además, no es necesario que el controlador compare los valores calculados con un umbral o emita una recomendación. Por ejemplo, los valores de CSER calculados por el controlador simplemente se pueden enviar a un visualizador a medida que se calculan. Luego, el operador puede analizar los valores y determinar si se necesita alguna acción en relación con un fallo. Alternativamente, o además, el controlador puede comparar los valores de CSER y rastrear el cambio en los valores de CSER a lo largo del tiempo. Estos cambios luego se pueden enviar a un visualizador. Alternativamente, o además, estos cambios se pueden comparar con un valor de umbral y cuando se supera el umbral (es decir, indicando que un fallo ha progresado hasta un punto en el que se requiere una acción) se emite una recomendación. El valor indicativo del daño sufrido por el sistema de engranajes se puede usar por el controlador de cualquier otra forma apropiada para identificar un fallo en un sistema de engranajes en un aerogenerador.

Además de la descripción anterior de la presente invención, ahora se proporcionarán dos ejemplos específicos de cómo se puede implementar la invención.

35 La relación de energía de banda lateral combinada para la evaluación de la condición de buen estado del engranaje es una técnica de monitorización de condición, que se puede implementar ejecutando una secuencia de comandos de Matlab (TM) para el procesamiento de señales de los datos \*.UFF recibidos (es decir, los datos de CMS). Los cálculos de la CSER y los resultados proporcionarán una guía para la evaluación de condición de engranaje. Los cálculos y los resultados se pueden escribir automáticamente en una hoja de cálculo de salida, por ejemplo. Los resultados pueden tender a evaluar la condición de los engranajes.

Ejemplo específico 1: Diente de piñón de alta velocidad (HS) roto en una caja de engranajes de 3MW

40 Ahora se describirá un ejemplo de la invención en relación a pruebas realizadas con una caja de engranajes de tres etapas de 3MW, teniendo dos etapas planetarias y una paralela con relación 1:112.63 (Aumento). La velocidad nominal de la etapa de alta velocidad (HSS) es de 1450 RPM y el par nominal en la HSS es de 34 kNm. Durante la prueba ocurrió un fallo en el flanco del diente del piñón de alta velocidad.

Descripción	Nº de dientes	RPM	RPS (Hz)	Etapa
Portadora (Entrada)	-	13.24	0.22	Etapa planetaria de baja velocidad (LSP)
Engranaje de anillo (estacionario)	93	0.00	0.00	
Planeta	35	-35.17	-0.59 (dirección opuesta)	
Piñón solar (Salida)	23	66.79	1.11	
Engranaje de anillo (estacionario)	118	0.00	0.00	Etapa planetaria de velocidad intermedia

## ES 2 951 264 T3

Planeta	47	-167,62	-2.79	(ISP)
Piñón solar (Salida)	23	409.30	6.82	
Rueda de engranajes	102	409.30	6.82	Etapa de alta velocidad (HS)
Piñón de salida	28	1491.01	24.85	
Relación de engranajes de LSP	-	5.0435		
Relación de engranajes de ISP	-	6.1304		
Relación de engranajes de HS	-	3.6428		
Descripción	Nº de dientes	RPM	RPS (Hz)	Etapa
TMF y sus armónicos	LSP en Hz	ISP en Hz	HS en Hz	
TMF 1X	20.5186	131.3036	695.8028	
TMF 2X	41.0372	262.6073	1391.6057	
TMF 3X	61.5558	393.9109	2087.4085	

Tabla 1: Resumen de las velocidades del eje de la caja de engranajes y la TMF de la caja de engranajes de 3MW

La frecuencia de engranaje de dientes (TMF) y las velocidades del eje de todas de las tres etapas se presentan en la Tabla 1 y se hace referencia a ellas en esta sección. La importancia de la CSER de un engranaje en buen estado y uno defectuoso debido a un diente de engranaje roto se explica cuantitativamente usando gráficos de tendencias relevantes en esta sección.

5

La figura 3 muestra un espectro de FFT 301 con un rango de frecuencia de 500 a 2200 Hz y una resolución de 0.5 Hz, para un engranaje en buen estado. Los niveles de energía de la banda lateral están presentes alrededor de cada una de las amplitudes de TMF 1X, 2X y 3X (es decir, las frecuencias TMF1, TMF2 y TMF3). No obstante, como este es el espectro para un engranaje en buen estado, estas bandas laterales son pequeñas. La CSER para el engranaje en buen estado es 0.718.

10

Una forma de onda de tiempo de un engranaje en buen estado no tendría picos de impacto periódicos. Un valor de Factor de Cresta (CF), que es la relación entre la aceleración pico sobre la aceleración de RMS, también se calculó durante las pruebas para proporcionar una indicación de una caja de engranajes en buen estado, como forma de rastrear el daño y confirmar que el daño sufrido por el sistema de engranajes se puede determinar de hecho en base a la primera amplitud de frecuencia de armónico central y la amplitud de banda lateral promedio. Por ejemplo, el Factor de Cresta para un engranaje en buen estado durante la prueba en este ejemplo fue 4.31.

15

La figura 4 muestra un espectro de FFT 401 de un engranaje defectuoso. El espectro de FFT 401 tiene niveles de energía de banda lateral alrededor de TMF 1X y 2X de la etapa de HS que son significativamente más altos que los mostrados para la figura 3.

20

La CSER para el engranaje defectuoso es 4.59, que es un aumento significativo en comparación con una CSER de engranaje en buen estado. La presencia y la separación de las bandas laterales alrededor de TMF 1X y 2X en los espectros indican que la modulación de banda lateral está ocurriendo una vez por vuelta del eje de alta velocidad. También, el hecho de que las frecuencias de engranaje central 1X y 2X pertenezcan al engranaje de HS indica que el daño que causa la modulación para a través de ese engranaje. A partir de esta información se puede diagnosticar que hay daño en el piñón de HS en esta caja de engranajes.

25

Una forma de onda de tiempo de un engranaje defectuoso puede tener un valor de CF que indica que está presente un fallo en el sistema de engranajes. Por ejemplo, durante la prueba de este ejemplo, el valor de CF para un engranaje defectuoso fue 5,933. Este es un aumento significativo en el CF en comparación con el CF de engranaje en buen estado. También hay un aumento en la CSER, que es evidencia de los picos de impacto presentes en la forma de onda de tiempo. La forma de onda de tiempo para un engranaje defectuoso también puede mostrar picos de impacto una vez por revolución del eje de alta velocidad a, en este ejemplo, 24.83 Hz. Los impactos periódicos pueden ser claramente visibles a lo largo de la ventana de forma de onda de tiempo.

30

Un gráfico de tendencia, tal como un gráfico de frecuencia (Hz) y amplitud de aceleración de vibración ( $m/s^2$ ) actualizado a lo largo del tiempo, puede revelar claramente el crecimiento del número de bandas laterales alrededor de la TMF 1X y 2X durante un período de tiempo desde un engranaje en buen estado hasta uno defectuoso. También se observa que la amplitud de las bandas laterales y sus armónicos en tal gráfico se aumenta para los engranajes dañados. Tales gráficos pueden indicar cuantitativamente el aumento en la CSER proporcional a la progresión del fallo de engranaje (desde el inicio del defecto de engranaje hasta el fallo).

La figura 5 muestra un gráfico de tendencia de CSER. El eje X y el eje Y representan el número de muestras y los valores de CSER respectivamente.

Con referencia a la figura 5, cada número de muestras representa una iteración en el método que incorpora la presente invención descrita anteriormente. El controlador 104 obtiene una amplitud de frecuencia de engranaje de dientes (TMF1) fundamental y una amplitud en un armónico de la frecuencia (TMF2) fundamental en el paso 204 por primera vez (es decir, la primera iteración). El controlador 104 obtiene entonces seis amplitudes de banda lateral en cada lado de las amplitudes centrales, calcula la suma de todas las amplitudes de banda lateral y una suma de las amplitudes centrales en los pasos 205, 206 y 207. El controlador 104 calcula entonces el valor de CSER para el sistema de engranajes en este punto de tiempo en el paso 208. Esto se representa en la figura como el punto de datos en el extremo izquierdo.

En este punto de tiempo, no hay ningún fallo en el sistema de engranajes. Como resultado, la modulación de las amplitudes centrales es pequeña. De este modo, la amplitud central total es grande con relación a la amplitud de banda lateral total y el valor de CSER es relativamente pequeño. Este valor está por debajo del umbral y, como tal, el controlador repite el proceso.

Como se puede ver a partir de la figura 5, el controlador 104 repite el proceso 18 veces, calculando 18 valores de la amplitud de frecuencia central total, las amplitudes de banda lateral total y los valores de CSER a lo largo del tiempo. Como se puede ver, durante el período que se ejecuta el método, se desarrolla un fallo en el sistema de engranajes. Hay un aumento marcado en el valor de CSER.

Esta información se puede enviar al visualizador 105, junto con cualquier recomendación para que la vea un operador.

#### Ejemplo específico 2: Grieta en el diente del piñón en una caja de engranajes de 2MW

La caja de engranajes en este caso de estudio de ejemplo es una configuración de unidad helicoidal de tres etapas, una etapa planetaria y dos paralelas, con una relación de transmisión de 1:112.24 (Aumento). La velocidad de HSS nominal es de 1553 RPM y el par nominal en la HSS es de 21 kNm. Al final de la prueba ocurrió una grieta en el diente del piñón intermedio debido a un fallo por fatiga.

Descripción	Nº de dientes	RPM	Hz	Etapas
Portadora (Entrada)		14.94	0.25	P
Engranaje de anillo (estacionario)	95	0.00	0.00	
Planeta	37	38.34	0.64	
Piñón solar (Salida)	19	89.58	1.493	
Rueda de engranaje	84	89.58	1.493	IS
Piñón de salida	22	342.06	5.70	
Rueda de engranaje	109	342.06	5.70	HS
Piñón (Salida)	24	1553.40	25.89	
Relación de engranajes de P		6.00		
Relación de engranajes de IS		3.8100		
Relación de engranajes de HS		4.5400		
TMF y sus	P en Hz	IS en Hz	HS en Hz	

armónicos				
TMF 1X	23.65	125.4121	621.3600	
TMF 2X	47.30	250.82	1242.72	
TMF 3X	70.95	376.24	1864.08	

Tabla 2: Resumen de las velocidades del eje de la caja de engranajes y la TMF de la caja de engranajes de 1.8 MW

El resumen de las velocidades del eje de la caja de engranajes y la TMF de una caja de engranajes de 2 MW se tabulan en la Tabla 2. Además, la TMF y sus armónicos de la etapa de velocidad planetaria, intermedia y alta y sus correspondientes velocidades de eje se presentan en la Tabla 2 y se hace referencia a ellas en esta sección.

5 La figura 6 muestra que un espectro de FFT 601 de un engranaje en buen estado tiene la TMF 1X y 2X y sus armónicos junto con las bandas laterales separadas en la revolución de IMS. En la medida que el espectro de FFT 601 es de un engranaje en buen estado, se observa que los niveles de energía de banda lateral alrededor de la TMF 1X y 2X son pequeños. La CSER es 1.4 para un componente de engranaje en buen estado.

10 Como se describió anteriormente, una forma de onda de tiempo de un engranaje en buen estado puede no tener picos de impacto periódicos para las revoluciones del eje de velocidad intermedia (IMS). El valor de CF para el engranaje en buen estado en este ejemplo fue 4,38.

La figura 7 muestra un espectro de FFT 701 para un engranaje defectuoso. El espectro de FFT 701 tiene una TMF 1X de IMS y armónicos, con bandas laterales separadas a la velocidad de funcionamiento de IMS que indican daños en el piñón de IMS.

15 La CSER para el engranaje defectuoso es 7.34, que es un aumento significativo en comparación con la CSER del engranaje en buen estado. La presencia y la separación de las bandas laterales alrededor de la TMF 1X, 2X y 3X en los espectros indican que la modulación de banda lateral está ocurriendo una vez por vuelta de la IMS. Además, el hecho de que las frecuencias de engranaje central 1X, 2X pertenezcan al engranaje de IS indica que el daño que causa la modulación pasa a través de ese engranaje. A partir de esta información podemos diagnosticar que hay un  
20 daño en el piñón intermedio de esta caja de engranajes.

Una forma de onda de tiempo del engranaje defectuoso en este ejemplo tenía un valor de CF de 7.22. Además, la forma de onda de tiempo tenía picos de impacto periódicos que eran claramente visibles en toda la ventana de forma de onda de tiempo. Puede haber una diferencia significativa entre una forma de onda de tiempo de engranaje en buen estado y de engranaje defectuoso, en la medida que las modulaciones de amplitud son evidentes. Esta es  
25 una confirmación del defecto de engranaje junto con los espectros de FFT.

La figura 8 muestra un gráfico de tendencia de CSER. El eje X y el eje Y representan el número de muestras y los valores de CSER respectivamente. Los datos para este gráfico se recopilan de la misma manera que se describió con respecto a la figura 5. Para este segundo ejemplo específico, se puede ver que el controlador 104 repite el proceso 40 veces, calculando 40 valores de la amplitud de frecuencia central total, las amplitudes de banda lateral total y los valores de CSER a lo largo del tiempo. Como se puede ver, durante el período que se ejecuta el método, se desarrolla un fallo en el sistema de engranajes. Hay un aumento marcado en el valor de la CSER.  
30

Si bien la invención se ha descrito principalmente en relación con un controlador de aerogenerador, las realizaciones se pueden implementar en cualquier dispositivo o plataforma informática apropiada.

35 Las realizaciones de la invención pueden incluir un controlador de aerogenerador, o parque eólico, configurado para ajustar uno o más parámetros operativos de un aerogenerador en base a la salida de cualquiera de los métodos descritos en la presente memoria. En particular, el controlador puede apagar o reducir la potencia generada por un aerogenerador cuando la salida del método indica que ha ocurrido un daño. Esto se puede implementar usando uno o más umbrales aplicados a una o más de las relaciones de MI para los armónicos respectivos, por ejemplo, por lo cual cuando se pasa o supera el umbral por una relación de MI particular, se toma una acción por el controlador para  
40 limitar o evitar daños adicionales a los componentes de los engranajes.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método implementado por ordenador de determinación de un valor indicativo del daño sufrido por un sistema de engranajes en un aerogenerador, el método que comprende:
  - 5 determinar (204) dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central según vibraciones del sistema de engranajes;
  - determinar (205) una pluralidad de amplitudes de banda lateral de cada una de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central;
  - sumar (207) las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central para calcular una amplitud de frecuencia de armónico central total;
  - 10 sumar (206) cada una de la pluralidad de amplitudes de banda lateral de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central para calcular una amplitud de banda lateral total;
  - determinar (208) un valor indicativo del daño sufrido por el sistema de engranajes en base a la amplitud de banda lateral total y la amplitud de frecuencia de armónico central total.
2. El método implementado por ordenador según la reivindicación 1, en donde las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central son amplitudes de frecuencia de engranaje de dientes de armónico central.
3. El método implementado por ordenador según la reivindicación 2, en donde el sistema de engranajes es un sistema de engranajes de múltiples etapas y en donde cada una de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central se correlaciona con un engrane entre engranajes, el método que comprende además:
  - 20 determinar un fallo dentro de un engranaje particular dentro del sistema de engranajes en base al valor indicativo de daño para las amplitudes de frecuencia de armónico central.
4. El método implementado por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en donde una primera amplitud de frecuencia de armónico central de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central está en una frecuencia de armónico fundamental para el sistema de engranajes.
5. El método implementado por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en donde una o más de las dos o más amplitudes de frecuencia de armónico central están en un armónico de una amplitud de frecuencia de armónico fundamental.
6. El método implementado por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en donde una tercera amplitud de frecuencia de armónico central está en un segundo armónico de la primera amplitud de frecuencia de armónico, y una segunda amplitud de frecuencia de armónico está en un primer armónico de la primera amplitud de frecuencia de armónico diferente de la segunda amplitud de frecuencia de armónico.
7. El método implementado por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en donde determinar el valor comprende calcular una relación de la amplitud de frecuencia de armónico central total y la amplitud de banda lateral total o viceversa.
8. El método implementado por ordenador según la reivindicación 7, en donde la relación se compara con un umbral para identificar si está presente un fallo en el sistema de engranajes.
9. El método implementado por ordenador según la reivindicación 8, en donde el método comprende además calcular repetidamente la relación mientras que la relación está dentro del umbral para obtener una pluralidad de valores de relación.
10. El método implementado por ordenador según la reivindicación 8 o 9 en donde, si se calcula un valor de relación que está fuera del umbral, emitir datos que indican que se ha identificado un fallo en el sistema de engranajes.
11. El método implementado por ordenador según la reivindicación 7, en donde el método comprende además calcular repetidamente la relación durante un período de tiempo predeterminado para obtener una pluralidad de valores de relación.
12. El método implementado por ordenador según cualquiera de las reivindicaciones 9 - 11, en donde los valores de relación se usan para rastrear la progresión de un fallo.
13. El método implementado por ordenador según la reivindicación 12, en donde se rastrea el fallo comparando cada valor de relación calculado sucesivamente con un valor de umbral.
14. El método implementado por ordenador según la reivindicación 12 o 13, en donde se rastrea el fallo comparando cada valor de relación de la pluralidad de valores de relación con uno o más de otros valores de relación de la pluralidad de valores de relación.

15. El método implementado por ordenador según cualquier reivindicación anterior, en donde al menos seis amplitudes de banda lateral a cada lado de cada amplitud de frecuencia de armónico central se usan para calcular las amplitudes de banda lateral promedio.
- 5 16. El método implementado por ordenador según cualquier reivindicación anterior que comprende además controlar el aerogenerador en base al valor indicativo de daño.
17. Un controlador para controlar un aerogenerador o una central de energía eólica, el controlador que está configurado para llevar a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16.
18. Un aerogenerador que comprende un controlador según la reivindicación 17.
19. Una central de energía eólica que comprende un controlador según la reivindicación 17.
- 10 20. Un programa informático que, cuando se ejecuta en un controlador, le hace llevar a cabo el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 16.

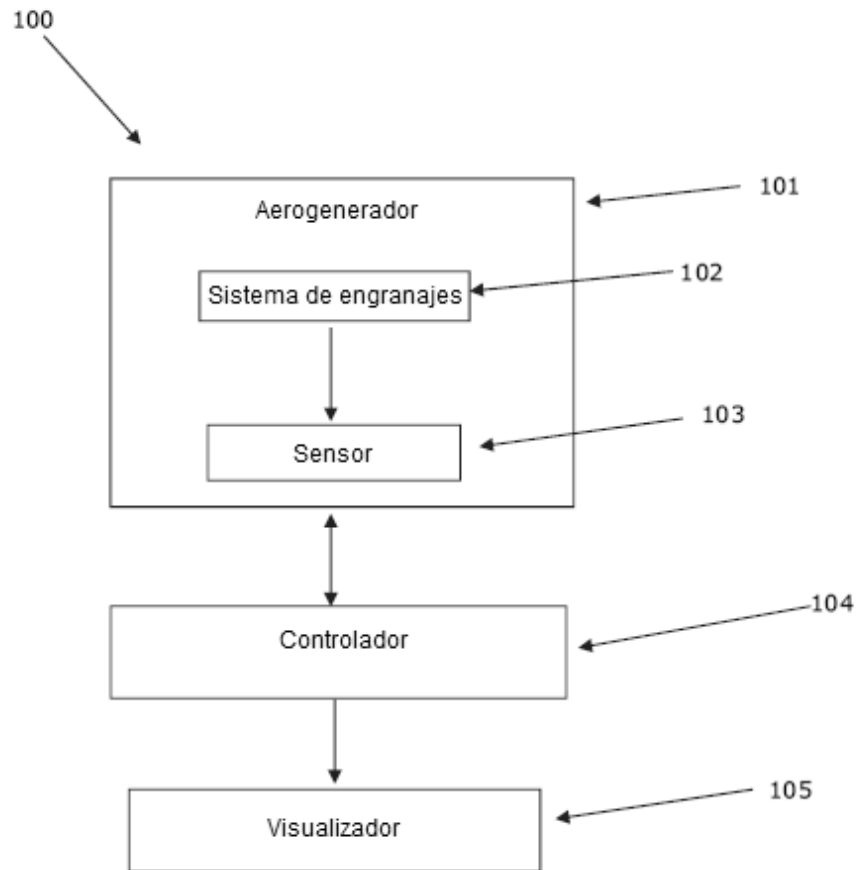


Figura 1

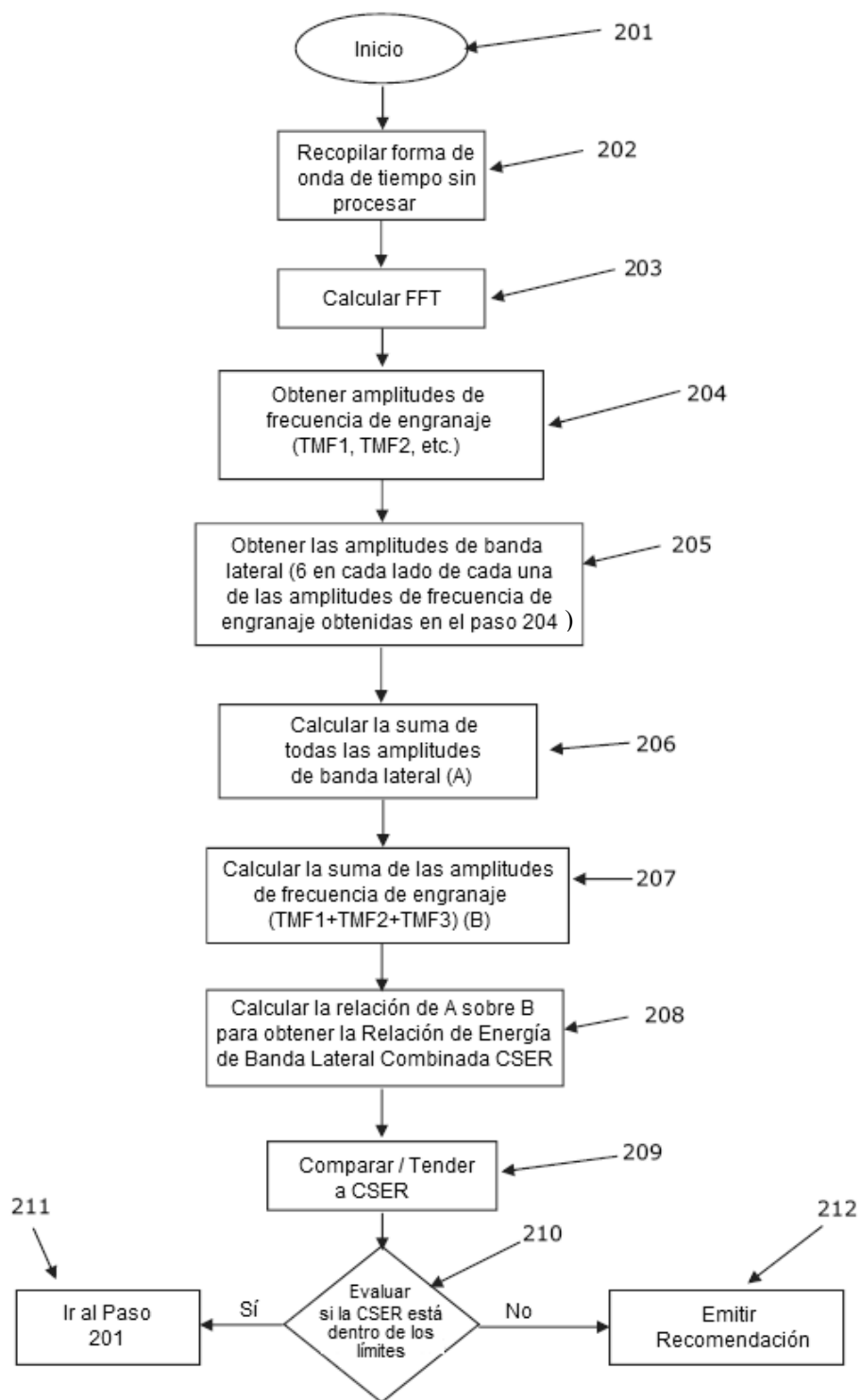


Figura 2



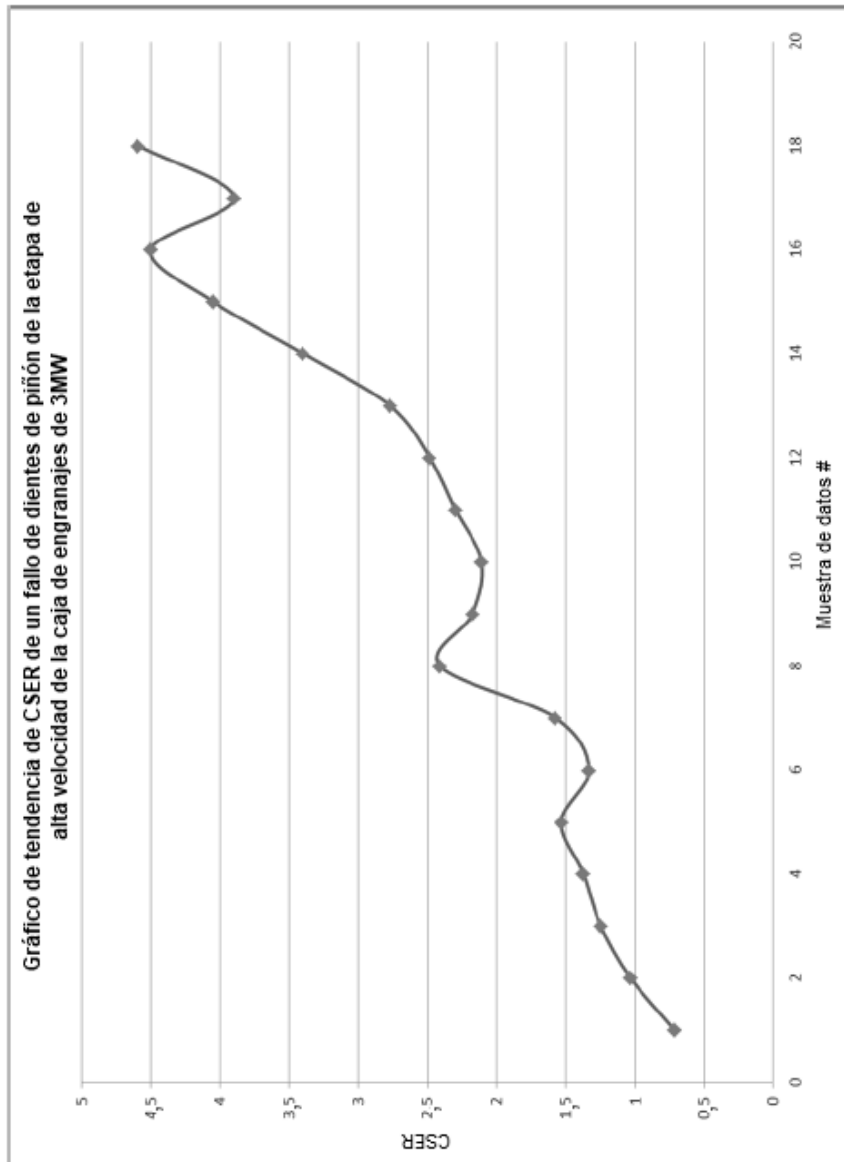


Figura 5

601

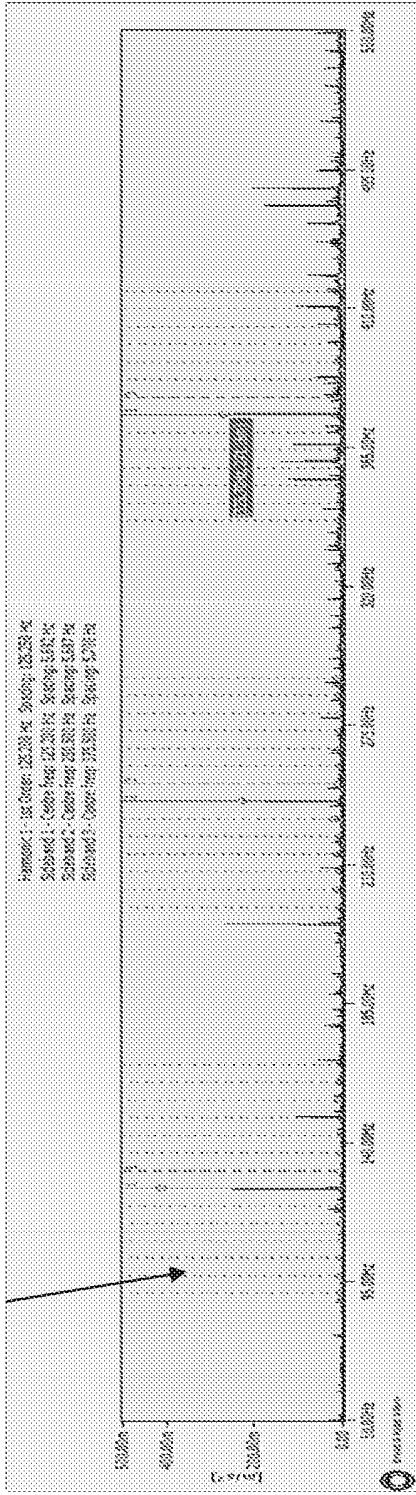


Figura 6

701

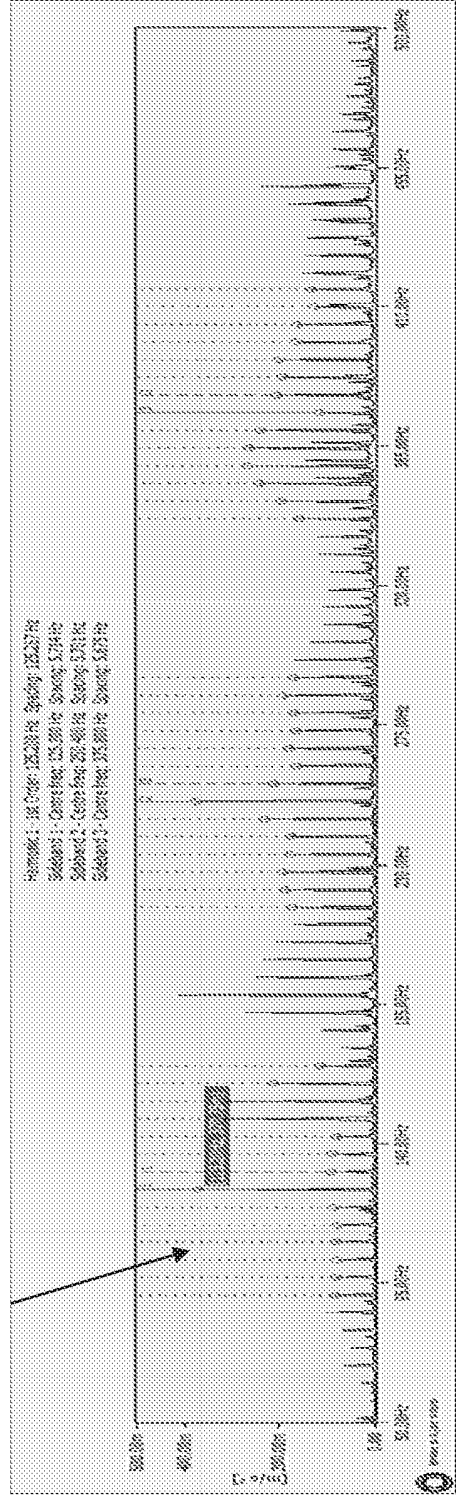


Figura 7

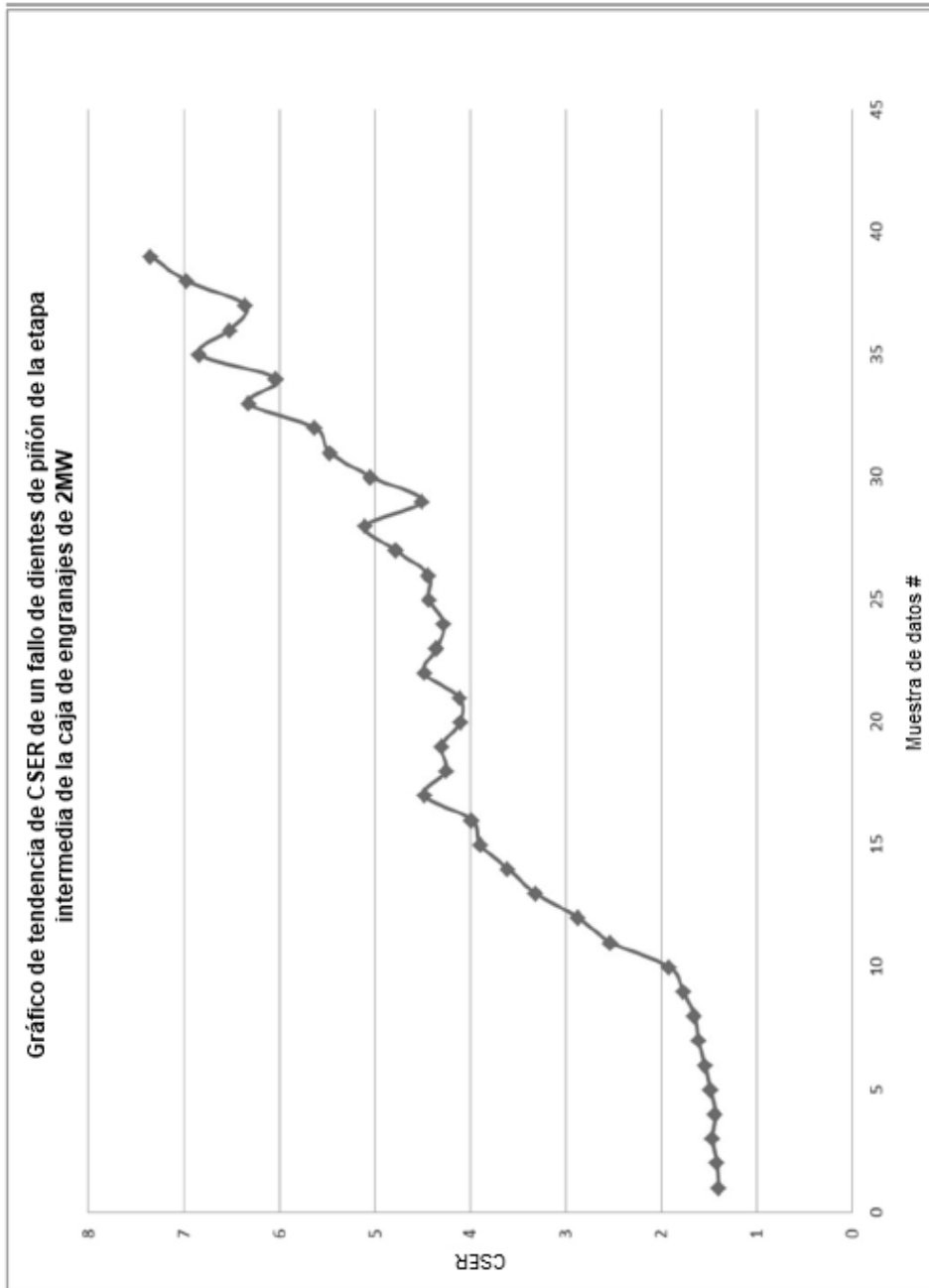


Figura 8