

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 626 029**

51 Int. Cl.:

**F03D 7/04** (2006.01)

**F03D 7/02** (2006.01)

**F03D 17/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.12.2012 PCT/DK2012/050461**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.07.2013 WO13097852**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.12.2012 E 12810045 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.04.2017 EP 2798203**

54 Título: **Optimización de la producción de energía en una turbina eólica por debajo de la potencia nominal**

30 Prioridad:

**29.12.2011 DK 201170762**

**30.12.2011 US 201161581652 P**

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

**21.07.2017**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**ANDERSEN, ASGER SVENNING;**

**THOMSEN, JESPER SANDBERG;**

**KRISTOFFERSEN, JACOB KROGH;**

**OLESEN, IB SVEND y**

**ROMBLAD, JONAS**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 626 029 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

Optimización de la producción de energía en una turbina eólica por debajo de la potencia nominal

Esta invención se refiere a turbinas eólicas, y más particularmente, a la mejora de la producción de energía cuando la turbina está funcionando por debajo de la potencia nominal.

5 Cuando una turbina eólica de velocidad variable está funcionando bajo condiciones en las que la velocidad de rotor está por debajo de la potencia nominal, se establece un ángulo de cabeceo colectivo a partir de una curva definida por la relación entre el ángulo de cabeceo  $\theta$  y la razón de velocidad de punta de pala/velocidad del viento  $\lambda$  que optimiza el coeficiente de potencia  $C_p$  y con ello se obtiene una producción de energía óptima por debajo de la potencia nominal. Esta curva se denomina a continuación en el presente documento curva  $\lambda:\theta$  y la relación se define como  $\lambda = \Omega R/V$  en donde  $\Omega$  es la velocidad de rotación del rotor de turbina eólica,  $R$  es el radio del rotor y  $V$  es la velocidad del viento. Un ejemplo de una curva  $\lambda:\theta$  habitual se muestra en la figura 1. Se conoce bien el control de cabeceo en turbinas eólicas a escala comercial y una referencia de cabeceo colectivo es una señal de control aplicada a todas las palas de rotor, habitualmente tres en turbinas eólicas de eje horizontal comerciales modernas.

10 Tal como puede observarse a partir de la figura 1, la velocidad del viento es una variable a la que debe reaccionar la turbina y, cuando está por debajo de la potencia nominal, se optimiza la producción de energía estableciendo una referencia de velocidad de rotación según la velocidad del viento media medida. La referencia de velocidad está seguida por el ajuste de la energía de salida. El resultado es una determinada razón de velocidad de punta/velocidad del viento y para lograr ese ratio el ángulo de cabeceo colectivo está ajustado según la curva de la figura 1.

15 Cuando el ángulo de ataque  $\alpha$  de una pala de turbina eólica varía, existirá un valor umbral  $\alpha_s$  por encima del cual la pala puede entrar en pérdida. La entrada en pérdida da como resultado un aumento de las emisiones de ruido y un aumento en la carga. El comienzo real de la entrada en pérdida también dependerá de las condiciones del aire. Por ejemplo, presión y turbulencia. Debido a las rápidas fluctuaciones en la velocidad y dirección del viento, particularmente bajo condiciones turbulentas, el ángulo de ataque variará independientemente del ángulo de cabeceo establecido según la curva  $\lambda:\theta$  de la figura 1. Estas variaciones deben tenerse en cuenta cuando se deriva la curva para evitar o reducir la entrada en pérdida de pala excesiva. Por tanto, la curva derivada debería definir un margen de entrada en pérdida nominal en turbulencia cero para evitar que se produzca una entrada en pérdida excesiva, por ejemplo, bajo condiciones de alta turbulencia. El margen de entrada en pérdida  $\beta$  puede definirse como  $\alpha_s - \alpha_0$  en el que  $\alpha_0$  es el ángulo de ataque bajo condiciones de turbulencia cero. El margen de entrada en pérdida se ilustra en la figura 2 que muestra una curva de sustentación para una pala de turbina eólica trazada como ángulo de ataque  $\alpha$  en el eje x frente a un coeficiente de sustentación CL en el eje y. Este gráfico sugiere que la curva de la figura 1 debería estar definida de manera conservativa para reducir las entradas en pérdida al mínimo nivel.

20 Aunque la reducción de entrada en pérdida es importante y necesaria, adoptar una curva  $\lambda:\theta$  conservativa no puede optimizar la energía producida por debajo de la potencia nominal. Por tanto, un objetivo de la presente invención es reducir el margen de entrada en pérdida para permitir que la producción de energía por debajo de la potencia nominal se incremente en la medida de lo posible.

El documento WO 2011/150931 A2 describe un método para hacer funcionar una turbina eólica con una salida de energía mejorada.

El documento WO 2011/015383 A2 describe un control de pala de rotor basándose en la detección de turbulencias.

40 El documento WO 2010/057737 A2 describe un método para controlar el funcionamiento de una turbina eólica.

Bianchi F D *et al.*: "Optimal gain-scheduled control of fixed-speed active stall wind turbines", IET Renewable Power Generation, vol. 2, n.º 4, 8 diciembre de 2008, páginas 228-238, XP006031625, ISSN: 1752-1424, DOI: 10.1049/IETRPG: 20070106 describe un control óptimo de ganancia programada de turbinas eólicas de entrada en pérdida activas de velocidad fija.

45 Según la invención se proporciona un método de funcionamiento de una turbina eólica por debajo de la potencia nominal, que comprende detectar condiciones de entrada en pérdida usando uno o más sensores de condición de entrada en pérdida en las palas de rotor de la turbina eólica, determinar un margen de entrada en pérdida basándose en las condiciones de entrada en pérdida detectadas, seleccionar una curva de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo de pala según el margen de entrada en pérdida determinado, y variar el ángulo de cabeceo de pala de al menos una de las palas de turbina eólica según la curva seleccionada.

50 La invención también proporciona un sistema de control para hacer funcionar una turbina eólica por debajo de la potencia nominal, que comprende uno o más sensores de condición de entrada en pérdida para detectar condiciones de entrada en pérdida en las palas de rotor de la turbina eólica, una disposición de determinación de margen de entrada en pérdida para determinar un margen de entrada en pérdida basándose en condiciones de

entrada en pérdida detectadas, un controlador para seleccionar una curva de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo de pala de rotor según el margen de entrada en pérdida determinado, y un controlador de ángulo de cabeceo para variar el ángulo de cabeceo de pala de al menos una de las palas de rotor según la curva seleccionada.

5 Realizaciones de la invención tienen la ventaja de que el margen de entrada en pérdida puede determinarse de manera adaptativa dependiendo de la razón a la que se detectan condiciones de entrada en pérdida mediante el al menos un sensor de entrada en pérdida. A su vez, esto significa que la energía producida por la turbina puede optimizarse seleccionando una razón brusca de velocidad de punta/velocidad del viento frente a la curva de referencia de ángulo de cabeceo en la que hacer funcionar la turbina eólica cuando las condiciones del viento lo permitan.

10 La determinación del margen de entrada en pérdida comprende determinar un(a) recuento/medición de acontecimientos de entrada en pérdida usando un contador de acontecimientos de entrada en pérdida. La determinación está basada en salidas del uno o más sensores de condición de entrada en pérdida determinándose el margen de entrada en pérdida a partir del/de la recuento/medición de acontecimientos de entrada en pérdida. El recuento/la medición de acontecimientos de entrada en pérdida depende del tiempo entre las condiciones de entrada en pérdida detectadas emitidas mediante el al menos un sensor de entrada en pérdida.

15 En una realización, el contador de acontecimientos de entrada en pérdida aumenta el recuento/la medición de acontecimientos de entrada en pérdida con la detección de una condición de entrada en pérdida mediante el al menos un sensor de condición de entrada en pérdida y disminuye el recuento/la medición de acontecimientos de entrada en pérdida a lo largo del tiempo. Esta realización tiene la ventaja de que el recuento/la medición de acontecimientos de entrada en pérdida, que determina el margen de entrada en pérdida, es sensible a los tiempos relativos de acontecimientos de entrada en pérdida detectados mediante el al menos un sensor de condición de entrada en pérdida.

20 En una realización se procesa una salida del al menos un sensor de condición de entrada en pérdida para determinar un aumento en una señal de acontecimiento de entrada en pérdida, y se ajusta a escala por una cantidad determinada según las condiciones del viento.

En una realización la salida procesada y ajustada a escala se suma a la salida procesada y ajustada a escala de un periodo de tiempo de muestreo anterior ponderado por una cantidad determinada según las condiciones del viento.

25 En una realización, las salidas sumadas se mapean para formar un margen de entrada en pérdida y el margen de entrada en pérdida se usa para seleccionar la curva de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo colectivo de la pala.

En una realización, se determina una primera constante basándose en la velocidad del viento y la turbulencia del viento, la primera constante se usa para ajustar a escala el aumento en la señal de acontecimiento de entrada en pérdida.

30 En una realización, el margen de entrada en pérdida varía entre un valor nominal y un valor óptimo dependiendo de la salida de contador de acontecimientos de entrada en pérdida. Esto permite que la turbina se haga funcionar, por debajo de las condiciones de potencia nominal, de manera adaptativa entre una salida nominal y una salida óptima dependiendo de los acontecimientos y mediciones de entrada en pérdida detectados del efecto de aquellos acontecimientos de entrada en pérdida en parámetros tales como el ruido acústico emitido.

35 En una realización, el al menos un sensor de condición de entrada en pérdida comprende una pluralidad de sensores de condición de entrada en pérdida en cada una de las palas de rotor de la turbina eólica. Estos sensores pueden ser sensores de variación de presión de fibra óptica y en una realización, comprenden una membrana dispuesta sobre una abertura en una superficie de pala y un transmisor de luz de fibra óptica y un receptor de luz de fibra óptica dispuestos dentro de la abertura para detectar la vibración de la membrana detectando fluctuaciones en la intensidad de la luz recibida mediante el receptor de luz de fibra óptica. Estas fluctuaciones en intensidad se provocan por vibración de la membrana que, a su vez, se provoca por turbulencia e indica una condición de entrada en pérdida. Tales sensores tienen la ventaja de ser robustos, relativamente baratos de instalar, y fiables.

40 En una realización el controlador de ángulo de cabeceo es un controlador de ángulo de cabeceo común para la variación del ángulo de cabeceo de pala de las palas de turbina eólica según la curva seleccionada en una cantidad común.

Ahora se describirán realizaciones de la invención, solamente a modo de ejemplo, y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1, (mencionada anteriormente) muestra una curva  $\lambda:\theta$  habitual para una turbina eólica por debajo de la potencia nominal;

45 la figura 2, (mencionada anteriormente) muestra una curva de sustentación para una pala de turbina eólica habitual;

la figura 3a y la figura 3b muestran un calibre de variación de presión de fibra óptica para detectar una entrada en pérdida de la pala;

la figura 4 muestra, esquemáticamente, una realización de la invención que estima un margen de entrada en pérdida;

5 la figura 5 es un diagrama de bloques que muestra el estimador de margen de entrada en pérdida de la figura 4;

la figura 6 ilustra cómo el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida puede usarse para ajustar una referencia de cabeceo;

la figura 7 muestra cómo las constantes del contador de acontecimientos de entrada en pérdida pueden ajustarse de manera adaptativa dependiendo de la turbulencia del viento y de la velocidad media del viento;

10 la figura 8 es un gráfico de acontecimientos de entrada en pérdida frente a margen de entrada en pérdida; y

la figura 9 muestra cómo un recuento de acontecimientos de entrada en pérdida puede mapearse en un margen de entrada en pérdida y convertirse en una referencia de cabeceo de pala colectiva.

15 En las realizaciones de la invención que van a describirse, el margen de entrada en pérdida se controla de manera adaptativa en respuesta a las condiciones del viento detectadas. Sin embargo, para que esto sea posible es necesario poder determinar de manera precisa la probabilidad de que se produzca una entrada en pérdida. La figura 3 ilustra un sensor de entrada en pérdida que puede usarse para este fin. Debe entenderse que este sensor es a modo de ejemplo y que pueden usarse otros sensores de entrada en pérdida, o bien directos o bien indirectos. El sensor de entrada en pérdida de la figura 3 está descrito en primer lugar en el documento WO-A-2011/015383 cuyos contenidos están incorporados en el presente documento como referencia. La figura 3 muestra una realización de la divulgación del documento WO-A-2011/015383. La figura 3a muestra una pala de turbina eólica 100 en sección transversal con aire fluyendo sobre la superficie aerodinámica desde el borde de ataque 110 hasta el borde de salida 120. Inicialmente, el flujo será laminar, pero en algún punto a lo largo de la superficie superior el flujo laminar se separará y el flujo pasará a ser turbulento, conduciendo potencialmente a una entrada en pérdida. El punto en el que el flujo se transforme de laminar a turbulento dependerá de muchos factores incluyendo el ángulo de ataque, el ángulo de cabeceo, la velocidad del viento, las condiciones del aire y las condiciones de las superficies de palas.

20 Una pluralidad de sensores de turbulencia 130 están dispuestos a lo largo de la superficie superior de la pala sobre la mitad trasera de la pala que se acerca al borde de salida. Tal como se describe completamente en el documento WO-A-2011/015383, los sensores están colocados en puntos a lo largo de la pala en los que es probable que la capa límite se separe y se inicie una entrada en pérdida. La figura 3b muestra uno de los sensores de turbulencia en más detalle. El sensor comprende un par de dispositivos de fibra óptica 200, 210. El primer dispositivo comprende un cable de fibra óptica 220 y un transmisor de luz 230 y el segundo dispositivo comprende un cable de fibra óptica 240 y un receptor de luz 250. Los dos dispositivos están dispuestos dentro de una pequeña abertura en la superficie de pala. Debido al tamaño de los cables de fibra óptica, esta abertura puede ser tan pequeña como de 5mm de diámetro o menor. Los cables de fibra óptica se extienden hacia el interior de las palas con el transmisor de luz 230 y receptor de luz 240 colocados en el borde de la abertura. Se coloca una membrana flexible o elástica 260 a través de la abertura soportada por encima de la abertura tal como se muestra en la figura 3b. La membrana es sensible a las variaciones de presión provocadas por flujo de aire turbulento a través de la superficie superior de la pala y vibrará dependiendo tanto de la velocidad del viento como del grado de turbulencia. El transmisor de luz 230 y el receptor de luz 240 están colocados de tal forma que la luz del transmisor 230 se refleja en la superficie interna de la membrana 260 llegando al receptor 240. La luz recibida por el receptor dependerá de las vibraciones de la membrana y la interferencia constructiva y destructiva entre la luz transmitida y recibida conducirá a fluctuaciones en intensidad luminosa en el receptor que puede controlarse para determinar el nivel de vibración de la membrana y, a partir de esto, puede calibrarse para medir la turbulencia de la superficie de pala y funciona como detector de entrada en pérdida. Como se usan múltiples sensores en puntos clave de la pala, las señales colectivas de todos estos sensores pueden usarse para detectar el comienzo de una entrada en pérdida y el desarrollo de una entrada en pérdida sobre la superficie de pala.

25 En la figura 3, una pluralidad de sensores de entrada en pérdida están dispuestos a lo largo la sección transversal de la pala, sobre la superficie de la pala superior. Tal como se explica a continuación, estos sensores se usan como base de un algoritmo de control adaptativo del margen de entrada en pérdida que, a su vez, permite derivar una curva más brusca  $\lambda:\theta$  y permite así unas condiciones de mayor producción de energía por debajo de la potencia nominal.

30 Se aprecia que bajo condiciones del viento benignas en las que la turbulencia del viento es baja y la dirección del viento es relativamente constante, es aceptable un menor margen de entrada en pérdida sin comprometer el ruido acústico emitido. Es decir, bajo esas condiciones, existe una menor probabilidad de que comiencen las entradas en pérdida que conducen a la emisión de ruido. Por tanto, bajo estas condiciones, la turbina puede hacerse funcionar con una curva más brusca  $\lambda:\theta$ . Cuando las condiciones son menos benignas con un flujo de aire más turbulento y más variación en dirección del viento, la curva  $\lambda:\theta$  es menos brusca.

- La figura 4 muestra, esquemáticamente, cómo se usa un estimador de margen de entrada en pérdida para proporcionar una entrada a un calculador de curva  $\lambda:\theta$  300. En la figura 4, cada una de las palas de rotor de turbina 310 A, B y C tiene una red de sensores de entrada en pérdida tal como se describió con respecto a la figura 3 anteriormente. Las salidas de estos sensores de entrada en pérdida se proporcionan a un estimador de margen de entrada en pérdida 320 que analiza las salidas de sensor de entrada en pérdida y determina el margen de entrada en pérdida apropiado para las condiciones detectadas y después emite una señal de margen de entrada en pérdida  $\beta$  al calculador de  $\lambda:\theta$  300.
- El calculador de  $\lambda:\theta$  300 recibe la razón de velocidad de punta/velocidad del viento  $\lambda$  como su otra entrada y calcula la señal de referencia de cabeceo colectivo  $\theta$  apropiada como su salida.
- En la disposición en la figura 4, el estimador de margen de entrada en pérdida 320 estima el margen de entrada en pérdida  $\beta$  basándose en las señales de los múltiples detectores de entrada en pérdida en cada una de las palas.
- Cuando se estima un alto margen de entrada en pérdida, se ajusta la curva  $\lambda:\theta$  en 300 de manera brusca hacia una curva óptima que pueda maximizar la emisión de energía. Sin embargo, cuando se estima un bajo margen de entrada en pérdida, el ajuste es más conservativo hacia una curva nominal. Por tanto, en la práctica, las palas están más cabeceadas hacia el viento cuando se estima un alto margen de entrada en pérdida, indicando una menor probabilidad de entrada en pérdida y condiciones benignas, que bajo condiciones normales cuando se estima un menor margen de entrada en pérdida. Por tanto, bajo las altas condiciones de margen de entrada en pérdida, puede obtenerse más energía del viento que bajo condiciones de funcionamiento normal.
- La figura 5 muestra el estimador de entrada en pérdida en mayor detalle. Debe entenderse que esto es solo un ejemplo de cómo se ha construido el estimador de entrada en pérdida y otras variaciones son posibles y serán evidentes para los expertos en la técnica.
- En la figura 5, la entrada  $s$  es la salida del sensor de entrada en pérdida descrito en la figura 3. Pueden ser entradas múltiples, una de cada sensor o una entrada simple que indica una entrada en pérdida detectada por cualquiera de los sensores. En esta realización la entrada  $s$  del bloque de procesamiento de señal 405 es binaria y será cero a menos que cualquiera de los sensores detecte una entrada en pérdida en cuyo caso la entrada será 1. Podrían usarse otras configuraciones analógicas o digitales. Aunque la figura 4 muestra una red de sensores en cada pala, podría usarse un único sensor en cada pala. Para cada uno de estos existe una instancia del contador de acontecimientos de entrada en pérdida de modo que el margen de entrada en pérdida  $\beta$  se estima para cada pala. En un ejemplo, el mínimo de las tres estimaciones de margen de entrada en pérdida se usa para adaptar la curva, y por tanto el ángulo de cabeceo colectivo en la manera descrita a continuación. En otro ejemplo, pueden determinarse tres instancias de la curva  $\lambda:\theta$ , una para cada pala, basándose cada curva en un único sensor o en una red de dos o más sensores. Cada instancia de la curva puede usarse para establecer un ángulo de cabeceo individual para una pala en vez de un ángulo de cabeceo colectivo y, por tanto, la señal de control aplicada al controlador de cabeceo es una señal de control de cabeceo de pala individual para cada pala.
- Cuando se detecta un acontecimiento de entrada en pérdida, mediante el sensor de entrada en pérdida 400, un contador de acontecimientos de entrada en pérdida 410, que tiene un valor  $\varepsilon$  que tiene una disminución exponencial aumenta por una constante  $k_1$  y luego se reduce hacia cero a una razón dependiente de una segunda constante  $k_2$ . Por tanto, si se detectan varios acontecimientos de entrada en pérdida sobre un periodo de tiempo relativamente corto, por ejemplo de varios sensores en diferentes palas, el valor de  $\varepsilon$  aumentará drásticamente. Si el periodo entre acontecimientos de entrada en pérdida es relativamente largo,  $\varepsilon$  permanecerá relativamente bajo.
- El contador de acontecimientos de entrada en pérdida en la figura 5 es una implementación de tiempo discreto en la que  $T_s$  es el tiempo de muestreo,  $Z^{-1}$  es un bloque de retardo de muestreo y  $U>U_z^{-1}$  es un operador lógico que detecta un aumento en la señal de sensor. Por tanto, una salida del sensor de entrada en pérdida 400 proporciona la entrada  $s$  al operador lógico 420 que determina basándose en la entrada del sensor, si el número de acontecimientos de entrada en pérdida es mayor que en el periodo de tiempo anterior, por ejemplo, aumentando un contador. El operador lógico produce una salida que se multiplica por una constante en el amplificador 430, cuya salida proporciona una entrada a un sumador 440. La salida del sumador se introduce en un tiempo de retardo 450 igual a un retardo de muestreo y la salida retardada proporciona la señal de contador de acontecimientos de entrada en pérdida  $\varepsilon$  a partir de la que se calcula la amplitud de entrada en pérdida en el bloque 460. La salida del retardo 450 también forma la entrada a un amplificador 470 que multiplica el valor retardado por una cantidad  $(1 - e^{-T_s/k_2})$  para proporcionar una segunda entrada al sumador 440. Este amplificador proporciona la disminución exponencial.
- El efecto del contador de acontecimientos de entrada en pérdida puede observarse en la figura 6. En esta figura, el gráfico a) muestra la salida  $S$  del contador de entrada en pérdida frente al número de veces de muestreo  $n$ ; el gráfico b) muestra la salida de operador lógico  $U>U_z^{-1}$  420 en este periodo; y el gráfico c) muestra la señal de recuento de acontecimientos de entrada en pérdida  $\varepsilon$ . El gráfico a) muestra que la entrada  $s$  al contador se ha elevado en tres periodos de tiempo independientes lo que produce una alta salida  $v$  del operador lógico 420. En la figura c) la magnitud del aumento en la señal de recuento de acontecimientos de entrada en pérdida  $\varepsilon$  para cada acontecimiento detectado de entrada en pérdida es igual a la primera constante  $k_1$ . Entonces, el valor de  $\varepsilon$  disminuye

exponencialmente hasta la siguiente alta salida del operador lógico 420. En este ejemplo los acontecimientos segundo y tercero están muy próximos y por tanto el valor de  $\varepsilon$  después del segundo acontecimiento solo ha disminuido a aproximadamente la mitad de su valor en el momento del tercer acontecimiento de modo que el valor de  $\varepsilon$  se eleva por encima de un valor umbral  $\varepsilon_0$  del que permanece por encima durante un tiempo hasta que disminuye por debajo de  $\varepsilon_0$  en ausencia de un acontecimiento adicional.

Los valores de  $k_1$ ,  $k_2$  dependen de las condiciones del viento y pueden adaptarse continuamente para aumentar o disminuir el peso asignado a la detección de acontecimientos de entrada en pérdida al contador de acontecimientos de entrada en pérdida. Esto puede realizarse en correspondencia con el ruido acústico emitido medido y/o cargas medidas debidos a acontecimientos de entrada en pérdida. La figura 7 muestra cómo  $K_1$  puede adaptarse basándose en el ruido acústico emitido. La figura 7 es un gráfico de velocidad del viento media frente a turbulencia. La velocidad del viento media en el eje x tiene tres valores críticos: conexión, en el que la velocidad es lo suficientemente alta para que el rotor comience a girar y generar energía; nominal, en el que la turbina emite su valor de potencia nominal; y desconexión, en el que la velocidad del viento es demasiado alta para un funcionamiento seguro o el funcionamiento de turbina se detiene, por ejemplo, cambiando el ángulo de incidencia de las palas o realizando la guiñada del rotor fuera del viento.

En la figura 7, están definidas seis regiones diferentes y las consideraciones de ajuste son las siguientes:

**Región 1**

La velocidad del viento está por encima del punto de conexión pero muy por debajo de la velocidad del viento nominal. La turbulencia es baja.

El riesgo de acontecimientos de entrada en pérdida es bajo y la influencia de acontecimientos de entrada en pérdida o ruido emitido es baja,  $k_1$  se establece por tanto relativamente baja.

**Región 2**

La velocidad del viento está muy por encima del punto de conexión pero por debajo del punto nominal. La turbulencia es baja.

El riesgo de acontecimientos de entrada en pérdida es bajo pero la influencia de acontecimientos de entrada en pérdida en el ruido acústico emitido es alta.  $k_1$  se establece por tanto en una región intermedia.

**Región 3**

La velocidad del viento media está por encima del punto nominal, pero por debajo del punto de desconexión, y la turbulencia es baja.

El riesgo de acontecimiento de entrada en pérdida es bajo y la influencia de entrada en pérdida en ruido acústico es baja.  $k_1$  se establece por tanto baja.

**Región 4**

La velocidad del viento media está por encima del punto de conexión pero muy por debajo del punto nominal. La turbulencia es alta.

El riesgo de acontecimientos de entrada en pérdida es alto pero esos acontecimientos tienen una influencia baja en ruido acústico.  $k_1$  se establece en una región intermedia.

**Región 5**

La velocidad del viento media está muy por encima del punto de conexión, pero por debajo del punto nominal. La turbulencia es alta.

Tanto el riesgo de acontecimientos de entrada en pérdida como la influencia de esos acontecimientos en niveles de ruido acústico es alto.  $k_1$  se establece por tanto relativamente alta.

**Región 6**

La velocidad del viento media está por encima del punto nominal, pero por debajo del punto de desconexión y la turbulencia es alta.

El riesgo de acontecimientos de entrada en pérdida es alto pero esos acontecimientos tienen una influencia baja en ruido acústico.  $k_1$  se establece en una región intermedia.

Tal como puede observarse a partir de la figura 6, el contador de acontecimientos de entrada en pérdida tiene tres intervalos de valores: por debajo de  $\varepsilon_0$ ; entre  $\varepsilon_0$  y  $\varepsilon_1$ ; y por encima de  $\varepsilon_1$ . El valor de  $\varepsilon$  se mapea a los márgenes de entrada en pérdida mapeando la función 460 en la figura 5. Un ejemplo de un mapeado adecuado se ilustra en la figura 8 a partir de la cual puede observarse que:

cuando  $\varepsilon < \varepsilon_0$ , el contador de entrada en pérdida es relativamente bajo y la curva óptima  $\lambda:\theta$  puede usarse para optimizar la producción de energía;

cuando  $\varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$ , el contador de entrada en pérdida está en una región intermedia en la que una curva  $\lambda:\theta$  entre la curva óptima y una nominal debería usarse para encontrar una compensación entre la producción de energía óptima y la indicación del ruido acústico emitido;

cuando  $\varepsilon > \varepsilon_1$ , el contador de entrada en pérdida es relativamente alto y la curva nominal  $\lambda:\theta$  debería usarse para limitar el ruido acústico emitido.

La figura 9 muestra un ejemplo de cómo el valor de  $\varepsilon$  en la figura 9a puede mapearse al margen de entrada en pérdida  $\beta$  en la figura 9b y la referencia de cabeceo de pala común  $\theta$  en la figura 9c. El gráfico de recuento de razón

de entrada en pérdida en la figura 9a es el de la figura 6c repetido para facilitar la comparación. Por tanto, puede observarse que el margen de entrada en pérdida y la referencia de cabeceo se mantienen óptimas excepto en un momento puntual cuando el segundo acontecimiento provocó que el valor  $\varepsilon$  superara  $\varepsilon_0$ . Sin embargo, a medida que esto desaparece los valores óptimos se reanudan hasta el tercer acontecimiento en el que el valor  $\varepsilon$  supera  $\varepsilon_0$  pero permanece por encima de  $\varepsilon_0$  mientras disminuye. Esto provoca una caída en  $\beta$  hacia  $\beta$  nominal y una recuperación gradual hacia  $\beta$  óptima. En este punto, la referencia de cabeceo aumenta desde el valor óptimo hacia el valor nominal y después vuelve hacia valor óptimo siguiendo el mapeo definido de margen de entrada en pérdida a la referencia de cabeceo para una  $\lambda$  dada, referida en la figura 4 como el ajuste  $\lambda:\theta$ . El ajuste en referencia de cabeceo puede hacerse de manera continua, sin etapas discretas, introduciendo un limitador de razón en la señal de margen de entrada en pérdida. El mapeo puede implementarse como tabla de consulta almacenada en una memoria dentro del controlador de turbina.

La realización descrita puede implementarse dentro de un controlador de turbina eólica o incluso a un nivel superior en un controlador de parque eólico que controla más de una turbina eólica. Los controladores de turbina eólica existentes incluyen un componente que calcula el ángulo de cabeceo colectivo óptimo dependiendo de la relación entre ángulo de cabeceo y la velocidad de rotor. La realización descrita puede implementarse convenientemente como modificación del sistema de control del ángulo de cabeceo existente.

Por tanto, mediante la medición precisa de acontecimientos de entrada en pérdida que usan sensores de entrada en pérdida en ubicaciones adecuadas en la superficie superior de las palas, el margen de entrada en pérdida aplicado a la curva de referencia de cabeceo frente a la razón de velocidad de punta/velocidad del viento puede controlarse de modo que la emisión de energía desde la turbina puede optimizarse cuando el riesgo de entrada en pérdida es bajo y el margen de entrada en pérdida puede controlarse de manera adaptativa según el riesgo de entrada en pérdida y el efecto de entrada en pérdida en un parámetro tal como emitir un ruido acústico, o controlar cargas de pala, que se desean controlar.

Además de permitir la optimización de generación de energía por debajo de la velocidad del viento nominal, las realizaciones de la invención también pueden reducir los costes de mantenimiento ya que se impide que las palas funcionen de manera continua en la región de entrada en pérdida. Además, el uso de sensores de fibra óptica, tal como se describió con respecto a la figura 3, aunque no es esencial, tiene la ventaja de que son baratos y fiables, lo que es altamente deseable en una turbina eólica que puede estar ubicada en una ubicación inaccesible.

Muchas modificaciones de las realizaciones descritas son posibles y serán evidentes para los expertos en la técnica sin apartarse del alcance de la invención que está definido por las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de funcionamiento de una turbina eólica por debajo de la potencia nominal, que comprende:  
 detectar condiciones de entrada en pérdida usando uno o más sensores de condición de entrada en pérdida (400) en las palas de rotor de la turbina eólica (100, 310),  
 5 determinar un margen de entrada en pérdida basándose en las condiciones de entrada en pérdida detectadas, en el que la determinación del margen de entrada en pérdida comprende determinar un recuento de acontecimientos de entrada en pérdida usando un contador de acontecimientos de entrada en pérdida (410) basándose en salidas del uno o más sensores de condición de entrada en pérdida (400), determinándose el margen de entrada en pérdida a partir del recuento de acontecimientos de entrada en pérdida, en el que el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida depende del tiempo entre las condiciones de entrada en pérdida detectadas emitidas mediante el al menos un sensor de entrada en pérdida (400),  
 10 seleccionar una curva de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo de pala según el margen de entrada en pérdida determinado, y  
 15 variar el ángulo de cabeceo de pala de al menos una de las palas de turbina eólica según la curva seleccionada.
2. Método según la reivindicación 1, en el que el contador de acontecimientos de entrada en pérdida (410) aumenta el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida con la detección de una condición de entrada en pérdida mediante el al menos un sensor de condición de entrada en pérdida (400), y disminuye el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida a lo largo del tiempo.  
 20
3. Método según la reivindicación 2, en el que se procesa una salida del al menos un sensor de condición de entrada en pérdida (400) para determinar un aumento en una señal de acontecimiento de entrada en pérdida, y se ajusta a escala por una cantidad determinada según las condiciones del viento.
4. Método según la reivindicación 3, en el que la salida procesada y ajustada a escala se suma a la salida procesada y ajustada a escala de un periodo de tiempo de muestreo anterior ponderado por una cantidad determinada según las condiciones del viento.  
 25
5. Método según la reivindicación 4, en el que las salidas sumadas se mapean a un margen de entrada en pérdida y la curva de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo de pala se determina a partir del margen de entrada en pérdida mapeado.
6. Método según la reivindicación 5, en el que el margen de entrada en pérdida se varía entre un valor nominal y un valor óptimo dependiendo de la salida de recuento de acontecimientos de entrada en pérdida.  
 30
7. Método según la reivindicación 3, 4, 5 ó 6, en el que se determina una primera constante basándose en la velocidad del viento y la turbulencia del viento, y la primera constante se usa para ajustar a escala el aumento en la señal de acontecimiento de entrada en pérdida.
8. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que el al menos un sensor de condición de entrada en pérdida comprende una pluralidad de sensores de condición de entrada en pérdida en cada una de las palas de rotor de la turbina eólica.  
 35
9. Método según la reivindicación 8, en el que los sensores de condición de entrada en pérdida (400) son sensores de variación de presión de fibra óptica.
10. Método según la reivindicación 9, en el que los sensores de variación de presión de fibra óptica comprenden una membrana (260) dispuesta sobre una abertura en una superficie de pala y un transmisor de luz de fibra óptica (230) y un receptor de luz de fibra óptica (240) dispuestos dentro de la abertura para detectar la vibración de la membrana (260) detectando fluctuaciones en la intensidad de la luz recibida mediante el receptor de luz de fibra óptica (240).  
 40
11. Método según cualquier reivindicación anterior, en el que la variación del ángulo de cabeceo de pala de al menos una de las palas de turbina eólica según la curva seleccionada varía el ángulo de cabeceo de todas las palas en una cantidad común.  
 45
12. Sistema de control para hacer funcionar una turbina eólica por debajo de la potencia nominal, que comprende:  
 50 uno o más sensores de condición de entrada en pérdida (400) para detectar condiciones de entrada en pérdida en las palas de rotor de la turbina eólica,



- 5 una disposición de determinación de margen de entrada en pérdida para determinar un margen de entrada en pérdida basándose en condiciones de entrada en pérdida detectadas, en el que la disposición para determinar el margen de entrada en pérdida comprende un contador de acontecimientos de entrada en pérdida (410) para determinar un recuento de acontecimientos de entrada en pérdida basándose en salidas del uno o más sensores de condición de entrada en pérdida (400), determinándose el margen de entrada en pérdida a partir del recuento de acontecimientos de entrada en pérdida y dependiendo el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida del tiempo entre las condiciones de entrada en pérdida detectadas emitidas mediante el al menos un sensor de entrada en pérdida (400),
- 10 un controlador para seleccionar una curva de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo de pala de rotor según el margen de entrada en pérdida determinado, y
- un controlador de ángulo de cabeceo para variar el ángulo de cabeceo de pala de al menos una de las palas de rotor según la curva seleccionada.
- 15 13. Sistema de control según la reivindicación 12, en el que el contador de acontecimientos de entrada en pérdida (410) aumenta el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida con la detección de una condición de entrada en pérdida mediante el al menos un sensor de condición de entrada en pérdida (400), y disminuye el recuento de acontecimientos de entrada en pérdida a lo largo del tiempo.
- 20 14. Sistema de control según la reivindicación 13, en el que el contador de acontecimientos de entrada en pérdida (410) determina un aumento en una señal de acontecimiento de entrada en pérdida a partir del al menos un sensor de condición de entrada en pérdida (400), y la señal de acontecimiento de entrada en pérdida se ajusta a escala según las condiciones del viento.
15. Sistema de control según la reivindicación 14, que comprende un sumador (440) para sumar la salida procesada y ajustada a escala a la salida procesada y ajustada a escala de un periodo de tiempo de muestreo anterior ponderado por una cantidad determinada según las condiciones del viento.
- 25 16. Sistema de control según la reivindicación 15, que comprende un dispositivo que almacena un mapa de márgenes de entrada en pérdida y curvas correspondientes de la razón de la velocidad de punta con respecto a la velocidad del viento frente al ángulo de cabeceo de pala.
- 30 17. Sistema de control según la reivindicación 16, en el que el margen de entrada en pérdida se varía entre un valor nominal y un valor óptimo dependiendo de la salida de contador de acontecimientos de entrada en pérdida (410).
18. Sistema de control según la reivindicación 14, 15, 16 ó 17, en el que se determina una primera constante basándose en la velocidad del viento media y la turbulencia del viento, y la primera constante se usa para ajustar a escala el aumento en el acontecimiento de señal de entrada en pérdida.
- 35 19. Sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 18, en el que el al menos un sensor de entrada en pérdida comprende una pluralidad de sensores de condición de entrada en pérdida en cada una de las palas de rotor de la turbina eólica.
20. Sistema de control según la reivindicación 19, en el que los sensores de condición de entrada en pérdida (400) son sensores de variación de presión de fibra óptica.
- 40 21. Sistema de control según la reivindicación 20, en el que los sensores de variación de presión de fibra óptica comprenden una membrana (260) dispuesta sobre una abertura en una superficie de pala de rotor y un transmisor de luz de fibra óptica (230) y un receptor de luz de fibra óptica (240) dispuestos dentro de la abertura para detectar la vibración de la membrana (260) detectando fluctuaciones en la intensidad de la luz recibida mediante el receptor de luz de fibra óptica (240).
- 45 22. Sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 21, en el que el controlador de ángulo de cabeceo es un controlador de ángulo de cabeceo común para la variación del ángulo de cabeceo de pala de las palas de turbina eólica según la curva seleccionada en una cantidad común.
23. Turbina eólica que tiene un sistema de control según cualquiera de las reivindicaciones 12 a 22.

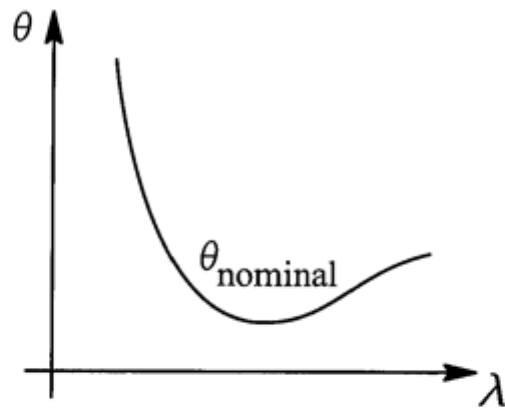


Figura 1

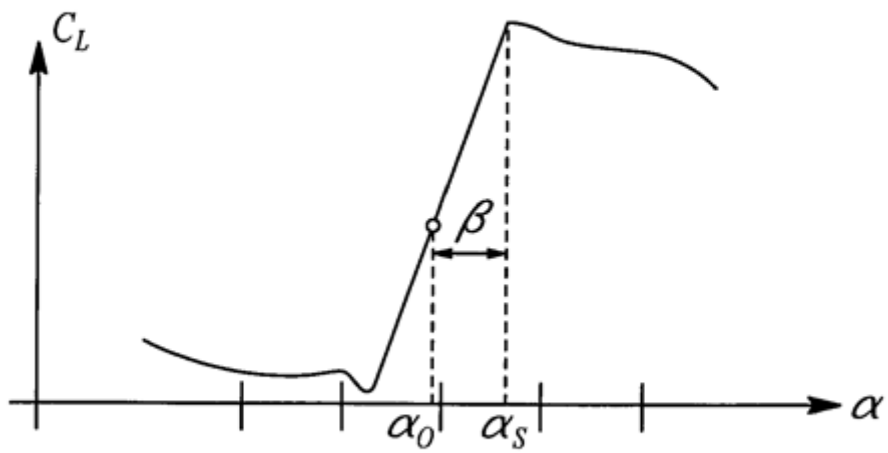


Figura 2

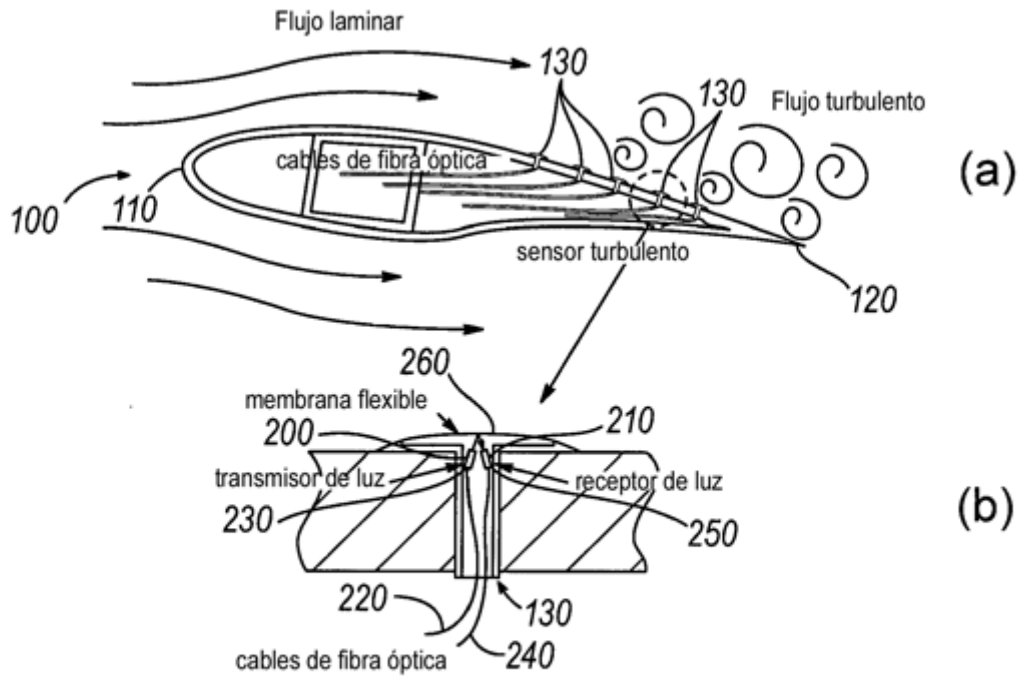


Figura 3

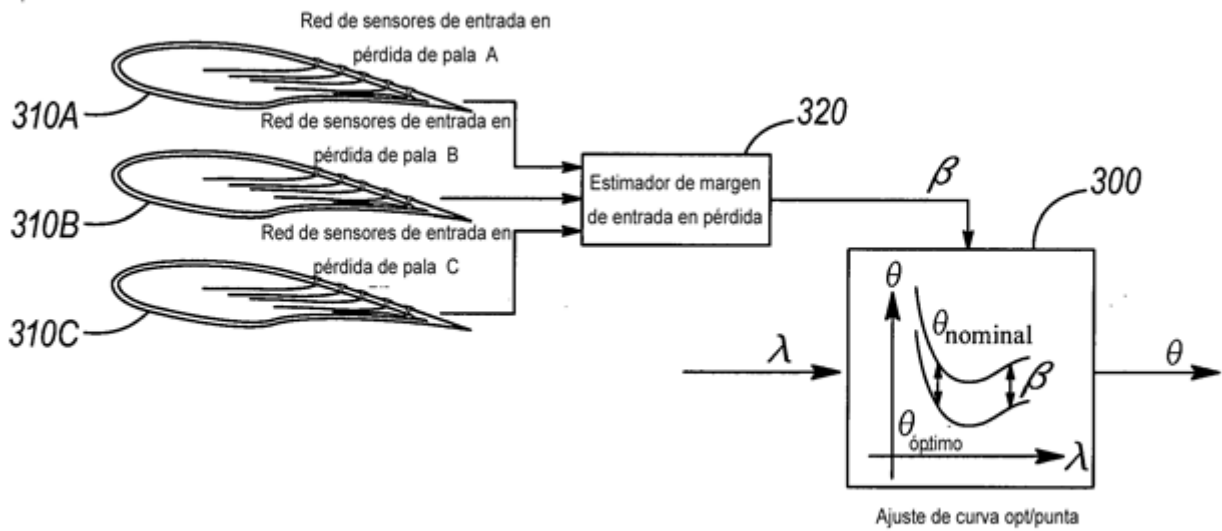


Figura 4

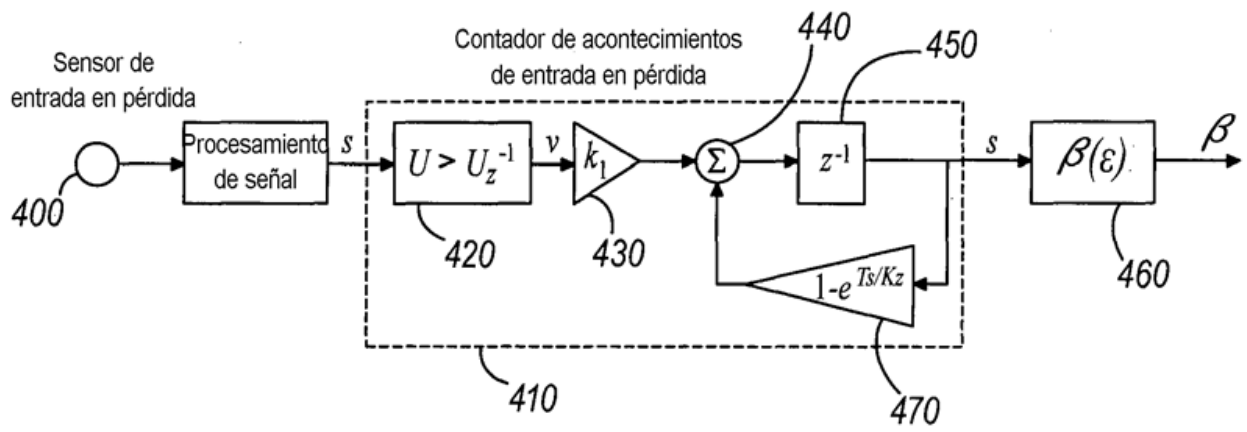


Figura 5

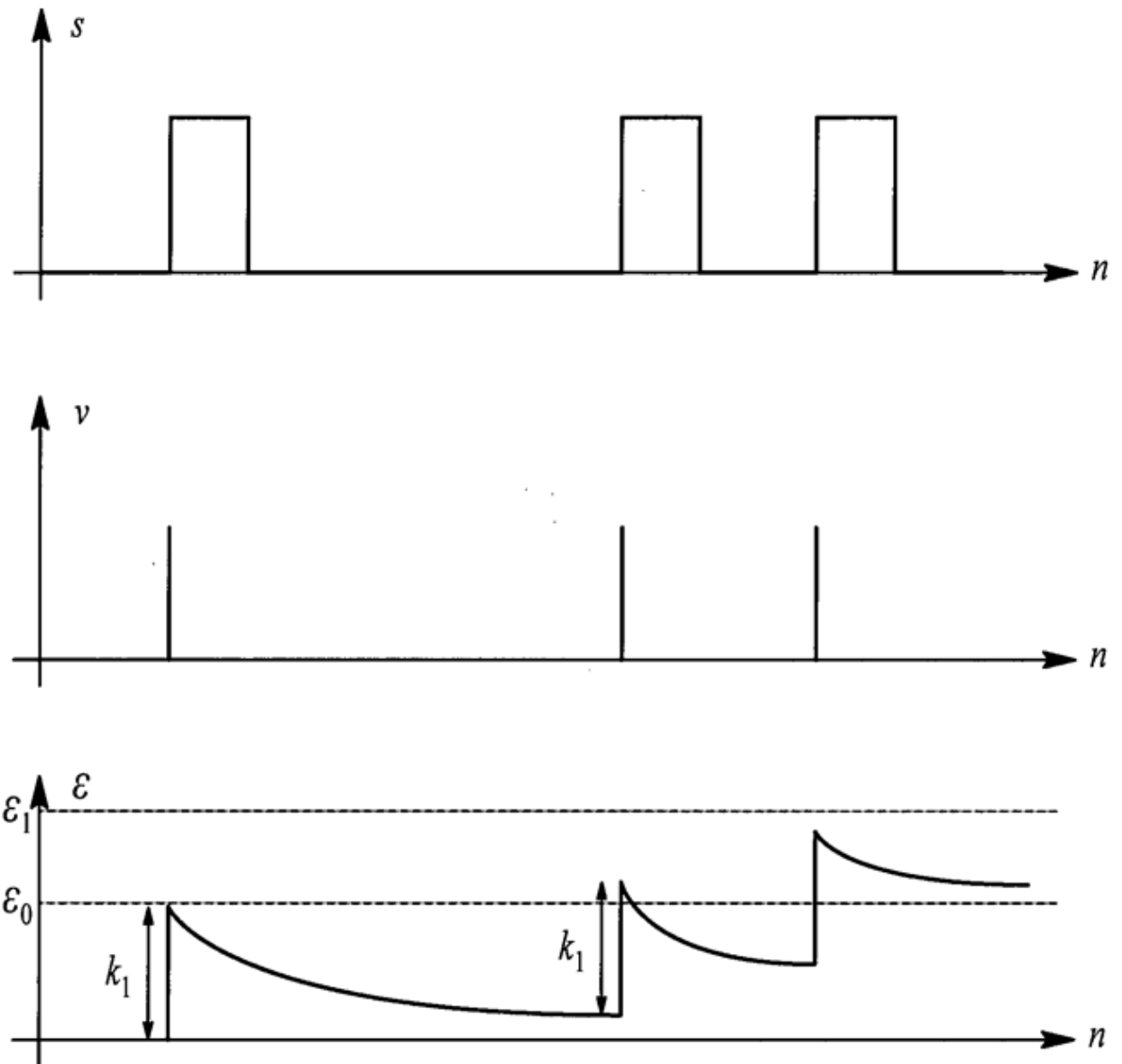


Figura 6

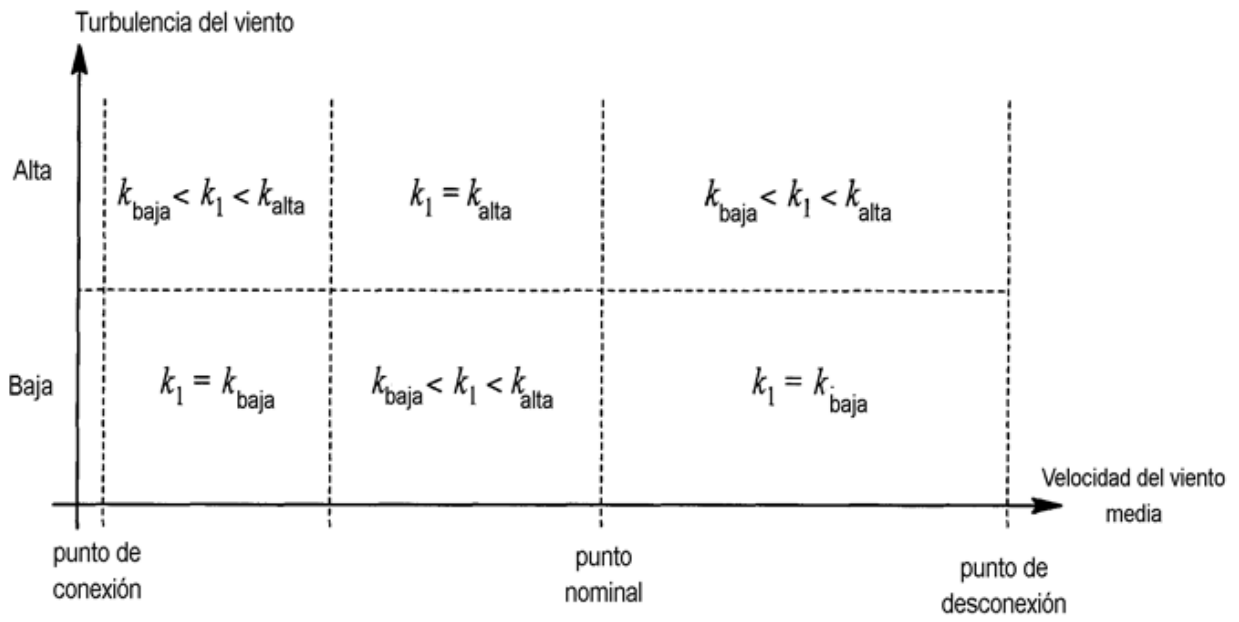


Figura 7

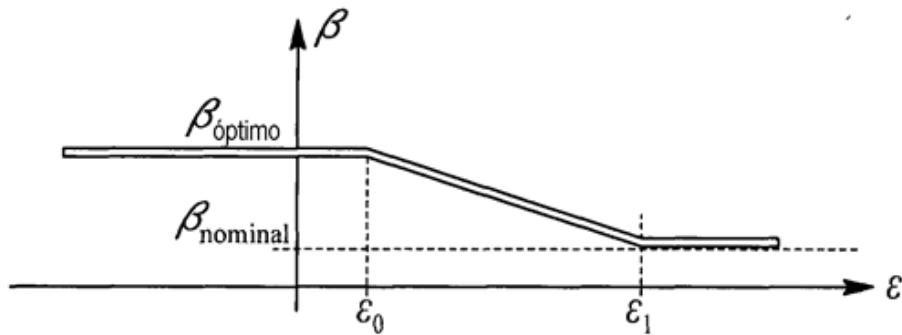


Figura 8

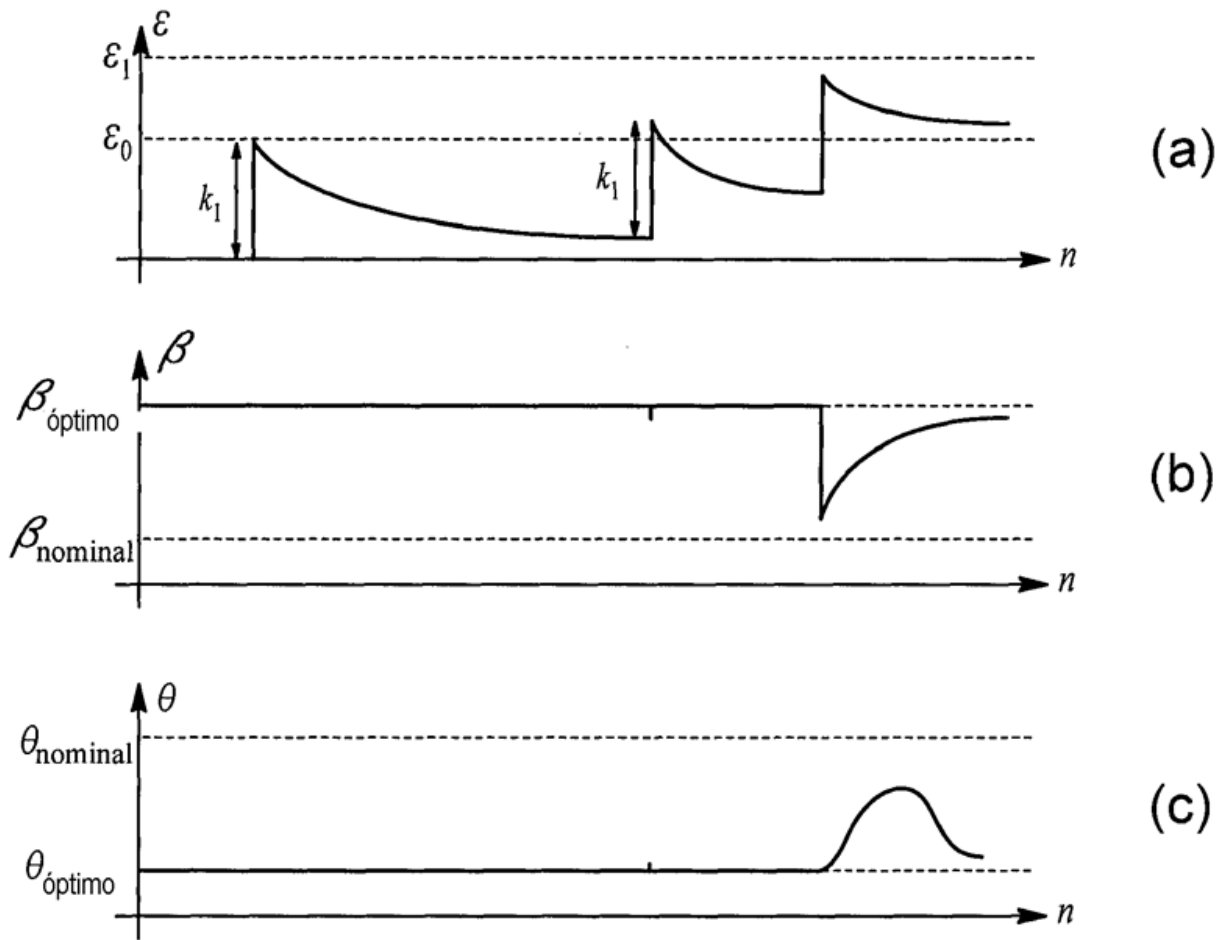


Figura 9