



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 351 966**

51 Int. Cl.:
F03D 1/02 (2006.01)
F03D 11/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **03726010 .6**
96 Fecha de presentación : **03.03.2003**
97 Número de publicación de la solicitud: **1483501**
97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.12.2004**

54 Título: **Método de extraer energía de una serie de rotores de turbinas eólicas.**

30 Prioridad: **07.03.2002 US 92775**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
14.02.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
14.02.2011

73 Titular/es: **OCEAN WIND ENERGY SYSTEMS, Inc.**
730 West Street
Amherst, Massachusetts 01002, US

72 Inventor/es: **Heronemus, William, E.**

74 Agente: **Ungría López, Javier**

ES 2 351 966 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

CAMPO DE LA INVENCION

La invención se refiere al campo de los generadores
5 de turbinas eólicas. Específicamente, la invención se re-
fiere a un método de extraer energía de una serie de ro-
tores de turbinas eólicas en una sola torre que están in-
dividualmente optimizados para mejorar la economía de to-
do el sistema. Soportar una pluralidad de turbinas movi-
10 das por rotor en una torre a múltiples alturas se conoce
por los documentos DE-A-19513321 o DE-A-4236092.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Se ha difundido el uso de turbinas eólicas para ge-
neración de electricidad en los últimos años. La capaci-
15 dad acumulada de las turbinas eólicas instaladas en todo
el mundo ha aumentado a una tasa de aproximadamente 32%
por año en los últimos diez años. A finales de 2001, la
capacidad total instalada de turbinas eólicas en todo el
mundo ascendía a más de 20.000 MW. Las perspectivas de
20 crecimiento futuro de la industria son brillantes, aunque
la economía de energía eólica debe seguir mejorando para
que el mercado crezca. Hay signos de que el potencial de
ganancias económicas de la tecnología actual de las tur-
binas eólicas se ha frenado.

25 A medida que el mercado para turbinas eólicas ha
crecido en los últimos años, también ha crecido el tamaño
de las turbinas. La figura 1 representa el diámetro de
rotor típico y la potencia de régimen para turbinas eóli-
cas de la técnica actual instaladas en Europa en los
30 últimos 15 años. La mayoría de los fabricantes de turbi-
nas eólicas han introducido recientemente diseños de tur-
binas del rango de 1,5 a 2,5 MW con rotores de 66 a 80 m
de diámetro. Incluso turbinas más grandes están en la me-
sa de diseño de la mayoría de los fabricantes de turbinas
35 eólicas. La tendencia hacia turbinas más grandes ha sido

impulsada parcialmente por las mejoras tecnológicas y económicas, pero la tendencia ha sido impulsada en gran parte por la demanda del mercado. Las turbinas eólicas más grandes han demostrado ser más productivas que los diseños más pequeños, en gran parte debido a la mayor altura de las torres de las máquinas más grandes. Además, hay una economía de escala que favorece a las turbinas grandes porque hay ciertos costos fijos asociados con la construcción de carreteras, planificación de proyectos, equipo SCADA, y operaciones y mantenimiento que no aumentan con las turbinas más grandes. Sin embargo, las turbinas grandes también son considerablemente más caras que las máquinas más pequeñas y la economía de escala no explica completamente la tendencia a turbinas eólicas del tamaño de multi-megavatios. Los desarrolladores de proyectos han demandado turbinas eólicas más grandes al menos parcialmente debido a cuestiones de percepción. En Europa, donde la densidad de población es relativamente alta en comparación con los Estados Unidos, es más fácil obtener permisos para menos turbinas grandes en comparación con un mayor número de turbinas pequeñas. Además, cuando las turbinas eólicas se instalan en alta mar, hay un mercado creciente para las turbinas muy grandes a usar en dicho mercado.

A medida que aumenta el tamaño de turbinas eólicas, hay varias cuestiones técnicas que afectan adversamente a la economía de la energía eólica y que pueden dar lugar potencialmente a limitaciones en tamaño de las turbinas. Los principios de diseño básicos indican que el peso de la turbina aumenta aproximadamente con el cubo del diámetro de rotor. El costo del sistema es generalmente proporcional al peso de la turbina y por ello el costo de la turbina incrementa aproximadamente con el diámetro de rotor al cubo. El peso y costo de las turbinas aumentan más rápidamente que la captación de energía, que incrementa

con el diámetro de rotor al cuadrado. Para turbinas de tamaño relativamente pequeño, hay otras economías de escala que tienen más peso que el aumento de peso y costo de las turbinas; sin embargo, con respecto a las turbinas de un tamaño de más de un megavatio aproximadamente las economías de escala tienen más peso.

Otro problema de las turbinas eólicas grandes es la deflexión de las palas. El rotor de turbina eólica está orientado típicamente contra el viento de la torre de modo que las palas se curven a favor del viento hacia la torre. El diseñador de turbinas debe tener cuidado de que la pala no choque con la torre, originando por ello un fallo catastrófico. La rigidez de pala, definida por el módulo de elasticidad del material multiplicado por el momento de inercia en sección transversal, o EI , aumenta cuando la pala es más larga. Sin embargo, las cargas que producen deflexión también aumenta con palas más largas. Si todas las dimensiones de las palas se escalan proporcionalmente a la longitud de la pala, entonces EI aumenta con la longitud de la pala a la cuarta potencia, mientras que el momento de flexión incrementa con la longitud de la pala a la tercera potencia. Esto daría lugar a menor deflexión de las palas más largas. Sin embargo, consideraciones prácticas tales como utillaje, peso de pala, y costo del material limitan el diseño de modo que la cuerda y grosor de la pala sean menores con relación a la longitud de la pala con rotores grandes. Esto produce una relación de aspecto más alta y menor solidez de los rotores grandes. La menor solidez requiere una velocidad en punta más alta para un buen rendimiento aerodinámico y la mayor velocidad en punta puede dar lugar a mayor refuerzo centrífugo de la pala que reduce deflexión de las palas. Sin embargo, los problemas de ruido tienden a limitar la relación de velocidad en punta de modo que el refuerzo centrífugo sea menor en rotores muy grandes. Por lo tan-

to, la deflexión es el factor principal del diseño de rotores muy grandes. La deflexión de las palas puede ser mitigada usando gran inclinación hacia arriba de la barquilla de la turbina eólica. Sin embargo, los diseñadores de turbinas eólicas ya están usando altas inclinaciones hacia arriba (7 grados) y conicidad negativa para evitar los choques en torre. Algunos palas son se construyen incluso curvados incorporando conicidad negativa efectiva. Todo esto apunta a que la deflexión de las palas es un criterio limitador de los rotores muy grandes de turbinas eólicas.

Otra cuestión de los rotores muy grandes es que hay una gran cantidad de material compuesto en cada pala, lo que puede dar lugar a problemas de material. Estadísticamente, hay una probabilidad más alta de un defecto existente en una pala grande que en una pala pequeña. Si una pala incorpora un defecto, puede propagarse a una fisura que eventualmente dará lugar al fallo de la pala. A medida que aumenta el grosor del laminado de pala, cada vez es más difícil detectar defectos en el material. Por lo tanto, las palas muy grandes de turbinas eólicas pueden tener una probabilidad estadística más alta de fallo que un mayor número de palas más pequeñas.

Otro problema de las turbinas eólicas muy grandes es la logística de transporte e instalación. Las palas de gran longitud que se utilizan en turbinas eólicas de muchos megavatios pueden exceder de la capacidad de las carreteras públicas. Además, la altura de las torres necesarias para soportar los rotores grandes puede exceder de la capacidad de altura de las grúas fácilmente disponibles.

Otro problema que experimentan las turbinas eólicas grandes actualmente en desarrollo o comercializadas es que los rotores son tan grandes que experimentan un diferencial masivo de velocidad del viento de un lado del ro-

tor al otro. En el Medio Oeste se han medido exponentes de cizalladura vertical del viento de hasta 0,40, que pueden hacer que la velocidad del viento a través de un rotor de 70 m varíe 62% de la parte inferior a la superior si la turbina está montada en una torre de 65 m. La variación en la carga del viento es aún más severa dado que las cargas son generalmente proporcionales a la velocidad del viento al cuadrado. En el ejemplo dado, la carga de flexión debida al viento en la parte superior del rotor sería 262% más alta que la carga de flexión debida al viento en la parte inferior del rotor. Dado que cada pala se mueve a través de este campo de cizalladura, se somete a condiciones extremas de carga de fatiga. Desde el punto de vista de la energía, las cosas son aún peores. La energía del viento es proporcional a la velocidad del viento al cubo, lo que significa que la energía contenida en el viento en la parte superior del rotor es 425% más alta que la energía contenida en la parte inferior del rotor.

Dado que todas las palas tienen la misma velocidad rotacional y ángulo de paso, significa que todo el rotor debe estar optimizado para un viento medio que "da" a todo el rotor. La velocidad del rotor y el paso de pala que funcionan mejor para la velocidad del viento en el centro del rotor pueden no funcionar bien en porciones del rotor en la parte superior e inferior. Por lo tanto, al menos parte del rotor estará operando en una condición subóptima siempre que haya una cizalladura del viento. Este problema empeora cuando el diámetro de rotor de turbina es mayor.

El problema de la variación de la velocidad del viento a través del rotor también tiene implicaciones negativas para seleccionar una turbina apropiada para un lugar dado. Los fabricantes de turbinas eólicas ofrecen generalmente su equipo con un rango de diámetros de rotor

para un régimen de potencia dado o, a la inversa, con un rango de regímenes de potencia para un diámetro dado del rotor. Por ejemplo, una turbina de 750 kW se puede vender con un rotor opcional de 46 m, 48 m o 50 m para lugares de viento fuerte, viento moderado, y viento bajo, respectivamente. A la inversa, una compañía puede ofrecer una variedad de trenes de potencia y generadores con varios regímenes de potencia para una turbina con un tamaño fijo del rotor. Por ejemplo, una turbina eólica con un rotor de 48 m puede ser vendida como una turbina de 600 kW, 700 kW o 800 kW para lugares de baja velocidad, velocidad moderada o velocidad alta del viento, respectivamente. Cuando el rotor de la turbina eólica llega a ser muy grande, es más difícil adaptar el régimen de potencia y el diámetro de rotor al lugar. Una turbina con un rotor de 70 m de diámetro puede experimentar una velocidad anual media del viento de 6 m/s en la punta inferior del rotor, 8 m/s a la altura del cubo, y 10 m/s en la punta superior del rotor. En base a la velocidad anual media del viento en la punta inferior del rotor, la turbina deberá ser optimizada para un lugar de baja velocidad del viento, y, en base a la velocidad anual media del viento a la altura del cubo, la turbina deberá ser optimizada para una velocidad moderada del viento, y en base a la velocidad anual media del viento en la punta superior del rotor la turbina deberá ser optimizada para un lugar de alta velocidad del viento. Sea cual sea el rotor seleccionado, no estará optimizado para todo la zona de disco del rotor.

A medida que las turbinas eólicas se hacen muy grandes, hay que resolver varios problemas. Primero: el peso y el costo de la turbina crecen de forma desproporcionada para un diámetro muy grande del rotor. Sería deseable proporcionar una turbina de multi-megavatios con un peso por unidad de área de barrido del rotor que sea compara-

ble a los diseños de turbinas pequeñas. Segundo: la deflexión de las palas es un problema y limita el diseño del rotor para turbinas eólicas muy grandes. Sería deseable proporcionar una turbina eólica de multi-megavatios en la que deflexión de las palas no sea un problema. Tercero: los rotores grandes de turbinas eólicas tienen una probabilidad estadística más grande de defectos de material en las palas en comparación con las turbinas eólicas más pequeñas. Sería deseable proporcionar una turbina eólica de multi-megavatios que no requiera cantidades masivas de material en las raíces de las palas que den lugar a una probabilidad estadística más alta de defectos de material. Cuarto: la logística de transporte y construcción es problemática para turbinas eólicas muy grandes. Sería deseable proporcionar una turbina eólica de multi-megavatios que no utilice palas masivas y otros componentes de modo que se puedan transportar y levantar fácilmente. Quinto: las turbinas eólicas grandes experimentan variaciones masivas de la velocidad del viento a través de su rotores de modo que es probable que al menos una porción del rotor opere en condiciones subóptimas para la velocidad del viento que experimente. Sería deseable proporcionar una turbina eólica de multi-megavatios en la que toda la zona de rotor esté optimizada para la velocidad del viento que "reciba".

BREVE RESUMEN DE LA INVENCION

La presente invención resuelve los problemas de las turbinas eólicas de la técnica anterior utilizando una pluralidad de rotores más pequeños montados en una sola torre y optimizándolos y controlándolos según la reivindicación 1. Los rotores están a varias alturas en la torre de modo que cada una "reciba" diferentes velocidades del viento. Consiguientemente, cada rotor está optimizado para su velocidad del viento.

Los rotores individuales son de costo más razonable

que un rotor masivo en el que los pesos y costos combinados de la pluralidad de rotores pequeños son menos que el peso y costo de un rotor masivo. Además, dado que los rotores están montados en una sola torre, solamente se requiere un cimiento, carretera de acceso, y conexión eléctrica, proporcionando por ello ahorros de costos con respecto a una pluralidad de turbinas más pequeñas en torres individuales. Por lo tanto, la turbina de la presente invención proporciona la economía de escala que se puede obtener con una turbina muy grande, pero también evita las desventajas asociadas con un rotor masivo.

Otra ventaja de la presente invención es que cada uno de la pluralidad de rotores está optimizado para su régimen de viento individual. Cada rotor puede tener un régimen único de potencia con relación a su zona de barrido. De esta forma, las palas, cubos, conjuntos de paso, y cojinetes principales son similares para todos los rotores y son intercambiables como piezas de repuesto. Sin embargo, el tren de accionamiento y el generador de cada rotor serían únicos. Otros parámetros que podrían ser optimizados para cada rotor incluyen su solidez y velocidad en punta, aunque si los rotores han de ser intercambiables, entonces la solidez debe ser consistente entre los rotores. Generalmente, los rotores hacia la parte superior de la torre tienen un régimen de potencia más alto, una velocidad en punta más alta, y opcionalmente una menor solidez. Esto permite que cada rotor extraiga la cantidad de energía máxima posible del viento para el recurso eólico que "recibe". La energía extraída por una pluralidad de rotores pequeños es mayor que la energía extraída por un solo rotor masivo porque cada uno de los rotores más pequeños puede estar mejor adaptado a su único recurso eólico.

Cada uno de los rotores también es controlado individualmente con respecto a la velocidad local del viento

que recibe. Los parámetros de control pueden incluir arranque, corte, velocidad del rotor, y paso de pala. Controlando cada rotor individualmente es posible lograr una mayor eficiencia general en comparación con controlar un solo rotor masivo en base a la velocidad media del viento que el rotor recibe. Cada rotor es controlado de modo que esté a la velocidad del rotor y paso de pala apropiados para mantener la eficiencia máxima. Esto permite que todo el sistema opere a eficiencia máxima en todo el rango de velocidades del viento experimentadas desde el rotor más bajo al rotor más alto. En contraposición, un solo rotor grande puede solamente ser controlado de manera que opere a eficiencia máxima para una altura y una velocidad del viento mientras que gran parte del rotor opera a menor eficiencia.

La presente invención también tiene ventajas en términos de disponibilidad y mantenimiento. Cuando una turbina eólica muy grande falla en línea, se pierde toda su producción. En contraposición, uno de los rotores de la presente invención puede fallar fuera de línea con la pérdida resultante de solamente una pequeña fracción de la producción total. Por ejemplo, si se funde un fusible de una turbina eólica de 1,5 MW o tiene algún otro fallo relativamente menor, toda la turbina se para, con una pérdida de 1,5 MW de potencia. Un sistema de turbina eólica comparable según la presente invención puede incluir 15 rotores, cada uno con una salida de 100, 200, 300, o 400 kW sobre una altura de cubo de cada rotor en la serie vertical. Si falla un fusible u otra pieza menor incluso en el rotor superior, entonces la producción perdida es solamente 400 kW y el sistema puede seguir produciendo 3500 kW de la potencia de régimen total de 3900 kW del sistema.

Desde el punto de vista del mantenimiento, el mayor número de rotores pequeños de la presente invención per-

mite a los operadores mantener una selección más completa de piezas de repuesto. Por ejemplo, si un operador está encargado de una granja eólica de 30 MW que consta de 20 turbinas de 1,5 MW de régimen, no es probable que disponga de palas de reserva, generadores o cajas de engranajes. Si uno de los componentes falla, el operador debe esperar a que el fabricante de turbinas suministre otra pieza y la turbina puede estar parada semanas. En contraposición, si el operador se encargase de una granja eólica de 30 MW que consta de 20 turbinas según la presente invención, donde cada turbina tiene 15 rotores de 100 a 400 kW de régimen cada uno, el operador tendría un total de 300 conjuntos de palas, generadores y cajas de engranajes en operación. Podría justificar más fácilmente tener un conjunto de componentes de reserva a mano porque el costo del conjunto de piezas de repuesto sería inferior en relación al costo total de la granja eólica.

Otra ventaja de mantenimiento de la presente invención es que no requiere una grúa masiva como las turbinas de la técnica anterior. Las turbinas que se levantan hoy día en un rango de tamaño de 1,5 a 2 MW requieren grúas con capacidades de más 500 toneladas que son muy caras de mover. En comparación, cada uno de los rotores más pequeños de la turbina eólica de la presente invención puede ser elevado usando una grúa mucho más pequeña que esté disponible localmente y pueda ser movilizad a un coste pequeño. El mantenimiento se puede facilitar más si cada serie de rotores de turbinas eólicas incluye una grúa de brazo-cabina. La grúa de brazo-cabina podría situarse encima de la torre y podría ser usada para quitar y sustituir los rotores sin la asistencia de una grúa separada.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Otras características y ventajas de la invención serán evidentes por la descripción detallada siguiente tomada en unión con los dibujos acompañantes, en los que:

La figura 1 es un gráfico que representa la tendencia hacia rotores de turbinas eólicas más grandes en los últimos años.

5 La figura 2 es una turbina eólica de la técnica anterior.

La figura 3 es una vista en alzado de una primera realización de la presente invención.

La figura 4 es una versión de tres palas del rotor usado en el método de la presente invención.

10 La figura 5 es una versión de dos palas del rotor usado en el método de la presente invención.

La figura 6 es una vista en alzado de una segunda realización de la presente invención.

15 La figura 7 es una vista en sección a lo largo de las líneas 7-7 de la figura 6.

La figura 8 es una vista en sección a lo largo de las líneas 8-8 de la figura 6.

La figura 9 es una vista en sección a lo largo de las líneas 9-9 de la figura 6.

20 La figura 10 es una vista en alzado frontal de una tercera realización de la presente invención.

La figura 11 es una vista en planta de la tercera realización de la presente invención.

25 La figura 12 es una vista en alzado lateral de la tercera realización de la presente invención.

La figura 13 es una vista esquemática de una cuarta realización de la presente invención.

La figura 14 es una vista esquemática de una quinta realización de la presente invención.

30 La figura 15 es una vista esquemática de una sexta realización de la presente invención.

La figura 16 es una vista esquemática de una séptima realización de la presente invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

35 La figura 2 representa una turbina eólica según la

técnica anterior. La turbina incluye un conjunto de palas 2, un cubo 4, una barquilla 6, y una torre 8. Las turbinas de la técnica anterior pueden incluir cualquier número de palas 2, aunque tres palas es la configuración más común. Las palas 2 pueden estar orientadas contra el viento o a favor del viento de la torre 8, aunque contra el viento es la configuración más común y más eficiente. Se facilita un sistema de guiñada para permitir la rotación entre la barquilla 6 y la torre 8 de modo que la barquilla 6 se pueda alinear con la dirección del viento. El diámetro de rotor se define como dos veces la longitud de una pala 2 más el diámetro del cubo 4. El diámetro típico de los rotores para turbinas eólicas comercialmente disponibles ha aumentado de forma significativa en los últimos 15 a 20 años. A mediados de la década de los años 1980, las turbinas eólicas de la técnica actual comercialmente disponibles tenían diámetros de rotor de aproximadamente 20 metros y regímenes de potencia de aproximadamente 100 kW. En 2001, el tamaño medio de las turbinas eólicas instaladas en Alemania era 1284 kW, y el mercado estadounidense utilizaba turbinas de tamaños similares en 2001. La tendencia hacia turbinas más grandes parece continuar y no es claro cuándo los fabricantes dejarán de incrementar los tamaños de sus diseños de turbinas eólicas.

A medida que los rotores de turbinas eólicas son de mayor tamaño, la economía queda afectada adversamente. El peso y el costo de las palas 2, el cubo 4, y otros componentes de la turbina son proporcionales al diámetro del rotor al cubo. Sin embargo, la zona de barrido del rotor, y por lo tanto la captura de energía, solamente son proporcionales al diámetro de rotor al cuadrado. Por lo tanto, a medida que el rotor es mayor, la energía producida es más cara. Hay algunas economías de escala para turbinas más grandes, tal como el número reducido de cimientos

y la reducida cantidad de cable eléctrico necesaria para interconectar las turbinas. Sin embargo, las economías de escala tienen más peso en turbinas de más de aproximadamente 750 kW a 1 MW. El mercado de las turbinas eólicas ha demandado crecientemente máquinas grandes debido a cuestiones estéticas en Europa y a causa de la posibilidad de proyectos eólicos en alta mar donde los costos fijos son más altos y la economía de escala impone turbinas más grandes. A medida que las turbinas eólicas sigan creciendo, es probable que su economía quede afectada adversamente.

La figura 3 representa una primera realización preferida de la turbina eólica usada en el método de la presente invención. La turbina eólica incluye una torre con una pluralidad de rotores montados en la torre a varias alturas. Cada rotor está montado en la torre con una estructura de soporte. La torre se representa como una torre tubular, aunque también podría funcionar una torre del tipo de armadura. Las estructuras de soporte se representan como estructuras de armadura, aunque cualquier soporte estructural adecuado funcionaría bien y las estructuras de soporte podrían ser posiblemente de estructura tubular de tipo autoportante. Un aspecto importante de las estructuras de soporte es que no deben afectar negativamente al flujo de viento a través de los rotores. Por lo tanto, es preferible mantener las estructuras de soporte a un perfil relativamente pequeño y que los elementos estructurales usado tengan una forma aerodinámicamente eficiente.

Cada rotor consta de una barquilla que es soportada por una estructura de soporte, un cubo que está unido a un eje principal de un rotor que está situado dentro de la barquilla, y una pluralidad de palas montadas en el cubo para rotación con él. En las figuras 4 y 5 se representan dos realizaciones diferentes

del rotor 12. La realización representada en la figura 4 incluye tres palas 20 montadas en el cubo 18, mientras que la realización representada en la figura 5 incluye solamente dos palas 20 montadas en el cubo 18. Cualquier configuración puede funcionar bien y la realización preferida puede depender de la aplicación específica. Por ejemplo, en lugares donde la estética es un problema, el rotor de tres palas representado en la figura 4 puede ser preferible. Para uso en alta mar, los problemas estéticos no son tan importantes y puede ser preferible usar el rotor de dos palas como se representa en la figura 5 usando también velocidades en punta correspondientemente más altas y menor solidez. La turbina de dos palas representada en la figura 5 se podría hacer con palas flexibles 20 o con un cubo balanceado 18. Las palas 20 son preferiblemente estructuras compuestas de fibra de vidrio como las usadas en rotores de turbinas eólicas convencionales. Puede usar cualquier plano aerodinámico que sea adecuado para uso en una pala de turbina eólica. Los planos aerodinámicos son preferiblemente similares a los descritos en las Patentes de Estados Unidos números 6.068.446, 5.562.420 y 5.417.548.

Los rotores 12 pueden emplear paso variable para regulación de potencia o las palas 20 pueden estar diseñadas para proporcionar control de parada.

La turbina eólica usada en el método de la presente invención debe guiñar de forma diferente a las turbinas eólicas de la técnica anterior. En vez de girar la barquilla con relación a la torre, se gira toda la torre para orientar los rotores 12 con la dirección del viento. Para que toda la torre guiñe, debe estar montada en un soporte en la base de la torre. El soporte permite que la torre gire con relación al cimiento de la torre. El soporte en la base de la torre, en una realización preferida, toma la forma de neumáticos convencionales de camio-

nes o maquinaria pesada y ruedas que cabalgan en una pista de guiñada. La pista de guiñada puede ser una carretera lisa de forma circular y construida alrededor de la base del sistema. El sistema de guiñada se explicará con más detalle con referencia a la figura 6.

Los rotores 12 de la turbina eólica usados en el método de la presente invención están dispuestos a varias alturas. Los rotores etiquetados con el número de referencia 22 en la figura 3 son los rotores inferiores. Encima de ellos hay una fila de rotores etiquetada 24. Los rotores 26 son la fila media de rotores. Los rotores 28 son los segundos desde arriba. Los rotores 30 son los superiores en la configuración representada en la figura 3. En la figura 3, los rotores dentro de cada una de las filas 22, 24, 26, 28, 30 están decalados de modo que el rotor medio esté un poco más alto que los rotores exteriores. Esto permite el empaquetado más denso de los rotores. Sin embargo, como una opción de diseño, podría ser preferible tener los tres rotores dentro de cada fila a la misma altura. Estas dos configuraciones, así como otras configuraciones de los rotores, se consideran dentro del alcance de la presente invención.

Cada fila de rotores experimenta una velocidad diferente del viento a causa del efecto de cizalladura del viento. A modo de ejemplo solamente, cada rotor podría tener un diámetro de 19 m, la fila inferior de rotores 22 podría estar situada a una altura de 30 m por encima del nivel del suelo, y las filas podrían estar espaciadas una de otra 20 m de modo que la segunda fila 24 esté situada a 50 m por encima del nivel del suelo, la tercera fila a 70 m por encima del nivel del suelo, la cuarta fila a 90 m por encima del nivel del suelo, y la quinta fila a 110 m por encima del nivel del suelo. El tamaño del diámetro de los rotores y su espaciación son una opción de diseño, pero estas dimensiones se ofrecen a modo de ejemplo ilus-

trativo. Para un exponente de cizalladura del viento de 0,40, que es un valor típico medido en el Medio Oeste, la velocidad del viento variaría 68% de los rotores inferiores 22 a los rotores superiores 30. La potencia del viento variaría 475% entre los rotores inferiores 22 y los rotores superiores 30.

A modo de ejemplo, la fila inferior 22 de rotores 12 puede experimentar una velocidad anual media del viento de 6 m/s. Un régimen de potencia apropiado para los rotores podría ser 100 kW. La velocidad anual media del viento experimentada por la fila superior 30 de rotores 12 puede experimentar una velocidad anual media del viento de 10 m/s y tener un régimen de 300 kW. El régimen de filas intermedias sería niveles de potencia intermedios. Por ejemplo, la fila 24 podría tener un régimen de 150 kW, la fila 26 de 200 kW, y la fila 28 de 250 kW. Los regímenes exactos de cada fila de rotores se determinarían en base a características del viento para un lugar específico. La determinación del régimen de potencia exacto para cada fila es una opción de diseño que está dentro de la capacidad de los expertos en la técnica.

Además de personalizar el régimen de potencia para cada fila de rotores, la presente invención permite seleccionar otros parámetros de diseño para cada fila con el fin de optimizar el rendimiento del rotor para la velocidad del viento a dicha altura. Por ejemplo, se puede seleccionar la cantidad de torsión y ahusamiento en las palas para cada fila de rotores. Además, la solidez del rotor y la velocidad en punta pueden variar de una fila a otra. Incluso el tipo de plano aerodinámico usado en cada fila puede ser seleccionado para optimizar los rotores en dicha fila a la velocidad del viento a dicha altura.

Además de optimizar el rendimiento aerodinámico de cada fila de rotores para la velocidad del viento a dicha altura, la resistencia estructural de los rotores a cada

altura también se debe diseñar para las velocidades del viento que experimenten. La fila superior 30 experimenta las velocidades más altas del viento y así los rotores en dicha fila deben ser los más pesados y los más fuertes.

5 La fila inferior 22 experimenta las velocidades más bajas del viento y así los rotores en dicha fila pueden estar diseñados sustancialmente más ligeros que la fila superior. La resistencia de las filas intermedias deberá estar diseñada apropiadamente para las velocidades del
10 viento a la altura de cada fila respectiva. La resistencia de los rotores en cada fila se puede adaptar añadiendo simplemente más material (es decir más capas de vidrio en las palas y más acero en los ejes y caja de engranajes) o usando materiales diferentes (es decir añadiendo
15 fibras de carbono a las palas en las filas superiores).

Además de seleccionar parámetros de diseño como el régimen de potencia, la solidez, la velocidad en punta, la torsión, el ahusamiento, etc, para optimizar el rendimiento de cada fila, los rotores 12 son controlados individualmente con respecto a la velocidad del viento que
20 experimentan. Cada rotor 12 incluiría idealmente un anemómetro de control montado encima de la barquilla 16 del rotor para supervisar la velocidad del viento experimentada por dicho rotor en cada momento. La señal de cada
25 anemómetro puede ser suministrada a un controlador que regula el ángulo de paso de pala del rotor respectivo y velocidad del rotor en base a la velocidad detectada del viento. Controlando individualmente cada rotor, todos los rotores pueden operar a eficiencia máxima aunque la velocidad del viento varíe drásticamente de la fila inferior
30 22 a la fila superior 30. El control de rotor individual también puede controlar la carga en cada rotor. Por ejemplo, la fila superior de rotores puede experimentar una alta velocidad del viento suficiente para que estén por
35 encima de la velocidad de régimen del viento mientras que

las filas inferiores de rotores todavía están por debajo de régimen. Por lo tanto, la fila superior operaría en un modo de control de potencia mientras que las otras filas operan en un modo que maximiza la salida de potencia.

5 Puede haber incluso momentos en que la velocidad del viento sea suficientemente alta para hacer que la fila o filas superiores se paren debido a fuerte viento mientras que las otras filas todavía puedan seguir funcionando y producir potencia. El control de rotor individual ayuda
10 también en condiciones de poco viento porque habrá períodos de tiempo en que la velocidad del viento sea suficientemente alta para que la fila o filas superiores comiencen a producir potencia mientras que la velocidad del viento todavía esté por debajo de arranque con respecto a
15 las filas inferiores.

Uno de los aspectos críticos de la presente invención es la necesidad de guñar toda la torre 10 en contraposición a guñar solamente la barquilla en turbinas eólicas de la técnica anterior. Hay varios métodos posibles de lograr la guiñada de la torre. La figura 6 representa una realización posible de un sistema de guiñada de torre. La torre incluye un poste fijo 40 que está unido rígidamente a un cimiento 42. El poste 40 debe ser de resistencia suficiente para soportar una porción significativa del momento de flexión en la base de la torre durante
20 condiciones de viento fuerte. Se dispone una estructura de torre rotativa 44 alrededor del poste fijo 40 de manera que sea concéntrica con él. Estructuras de soporte de rotor 14 están unidas rígidamente a la estructura de
25 torre 44. La estructura de torre 44 está montada para rotación con relación al poste fijo 40 alrededor de un eje vertical de guiñada. Los componentes horizontales de la carga en la estructura de torre 44 son transmitidos al poste 40 a través de cojinetes 46 y 48. El componente
30 vertical de la carga en la estructura de torre 44 es
35

transmitido al cimiento 42 a través de bogies 50. Los momentos de flexión pasan a través de un acoplamiento entre las fuerzas horizontales en los dos cojinetes 46, 48.

La figura 7 representa una vista cortada del cojinete inferior 46. La torre 44 se representa en forma octagonal, aunque también podría ser de forma circular o podría ser una estructura de tipo de armadura. Rígidamente unida a la estructura de torre 44 hay una pluralidad de puntales 52. En cada puntal 52, hay un rodillo 54. Los rodillos 54 apoyan contra el lado del poste 40 para transmitirle fuerzas horizontales. La rotación de los rodillos 54 permite que la estructura de torre 44 guiñe suavemente alrededor del poste 40. Los rodillos 54 son preferiblemente neumáticos comercialmente disponibles.

Entre los rodillos 54 está interpuesta una pluralidad de dispositivos de freno 56. Los dispositivos de freno 56 incluyen un puntal 58 y una pastilla de freno 60. El puntal 58 se ha construido de forma que sea extensible y retráctil. La extensión y retracción del puntal 58 se puede lograr con un cilindro hidráulico o neumático u otro accionador adecuado. Cuando el puntal 58 se extiende, la pastilla de freno 60 engancha el lado de la estructura de poste 40. El rozamiento entre la pastilla de freno 60 y el poste 40 evita la guiñada de la torre 44.

Cuando el puntal 58 se retira, la pastilla de freno pierde el contacto con el lado del poste 40 y la guiñada es posible. Los cojinetes superiores 48 son de construcción similar al cojinete inferior 46 excepto que hay tres conjuntos de cojinetes superiores 48 para transmitir la carga más alta en la parte superior del poste 40. Los dispositivos de freno 56 se pueden omitir opcionalmente de los cojinetes superiores 48 si los dispositivos de freno 56 asociados con los cojinetes inferiores 46 son suficientemente fuertes para evitar su propia guiñada.

La figura 8 representa una vista en sección trans-

versal de la turbina eólica a lo largo de las líneas 8-8 en la figura 6. Se puede ver que los cojinetes superiores 48 incluyen un total de 16 puntales y rodillos 52, 54. El cojinete superior 48 también incluye un conjunto de dispositivos de freno 56, aunque estos dispositivos se podrían omitir opcionalmente en la estación de soporte superior. Hay tres conjuntos de cojinetes en la estación de cojinete superior 48. Los conjuntos de cojinetes extra 48 en la estación superior tienen la finalidad de transmitir las fuerzas laterales más altas en la parte superior del poste 40 en comparación con la parte inferior del poste. Como se representa en la figura 8, las estructuras de soporte de rotor 14 son estructuras de armadura que soportan los rotores 12 en las posiciones apropiadas. Alternativamente, las estructuras de soporte 14 pueden ser estructuras autoportantes tubulares. Un rotor 12 está situado en la parte delantera de la torre 44 y dos rotores 12 están situados a los lados de la torre 44. Esto crea una disposición decalada en la que el rotor central está algo delante de los rotores laterales. La disposición decalada de los rotores puede mejorar el rendimiento aerodinámico del sistema general aumentando el flujo de viento a través de los rotores laterales.

La figura 9 representa una vista en sección transversal de la turbina eólica a lo largo de las líneas 9-9 en la figura 6. Los cojinetes inferiores 46 son de construcción similar a los cojinetes superiores 48 excepto que se requiere un menor número de cojinetes para transmitir la fuerza horizontal en la parte inferior del poste 40. La figura 9 representa con más detalle los bogies 50 que transmiten fuerzas verticales al cimiento 42. Preferiblemente el cimiento 42 incluye una superficie superior alquitranada similar a las superficies de carretera convencionales. Cada bogie 50 consta de un cuerpo 58 que está unido y proporciona soporte a la torre 44. Cada

cuerpo de bogie 58 se soporta en una pluralidad de ruedas 60. Las ruedas de bogie 60 cabalgan en la superficie superior alquitranada de cimiento 42. Los bogies 50 están unidos uno a otro para formar un tren en forma circular.

5 Cuando los bogies 50 cabalgan en sus ruedas 60, permiten que la torre 44 efectúa un movimiento de guiñada. Esto proporciona un soporte de guiñada muy fuerte, muy simple y muy barato. Se espera que este sistema de guiñada sea muy superior a los cojinetes de rodillos de alta precisión sumamente grandes requeridos para el movimiento de

10 guiñada de grandes turbinas eólicas de multi-megavatios de diseño convencional. Los cuerpos 58 de los bogies 50 están llenos de material de lastre 62. El material de lastre 62 podría ser hormigón, roca, pasta, o cualquier

15 otro material barato con densidad relativamente alta. El peso del material de lastre 62 en los bogies 50 proporciona un momento de reacción para contrarrestar el momento de sobregiro en la torre 44 que es producido por fuerzas de empuje en los rotores 12. Si se dispone suficiente

20 material de lastre 62 en los bogies 50 y si el diámetro del tren circular de bogies 50 es suficientemente grande, entonces el momento de reacción proporcionado por los bogies 50 puede ser suficiente para resistir todos el momento de sobregiro en la torre 44. Si al momento de sobregiro no reacciona completamente el peso de los bogies

25 50, entonces parte del momento será soportado por las reacciones horizontales de cojinetes 46 y 48 en el poste 40.

La figura 10 representa otra realización de la invención. En esta realización hay 27 rotores dispuestos en

30 9 filas. Además del número diferente de rotores, los rotores dentro de cada fila no están decalados en altura. Puede haber consideraciones estructurales o de diseño que den lugar a una disposición en la que los rotores dentro

35 de cada fila no estén decalados. Sin embargo, escalonando

los rotores como se representa en las figuras 3 y 6, es posible lograr un empaquetado más apretado de los rotores. Además de la disposición modificada de los rotores, la realización representada en la figura 10 difiere de la de las figuras 6 a 9 en que la estructura de torre es una torre de armadura más bien que una torre tubular. Los rotores 12 son soportados por un bastidor 63 formado por una pluralidad de elementos de tensión-compresión 64. El tamaño, la forma, el número y la disposición de los elementos de tensión-compresión 64 se deberá diseñar para proporcionar soporte adecuado para las cargas estáticas y dinámicas que ejercen los rotores 12. No se dan aquí detalles exactos de la torre de armadura, pero caen dentro de la capacidad de los expertos en la técnica de diseño de un bastidor de torre adecuado.

El bastidor de torre de armadura 63 se soporta en bogies 66. Los bogies son de construcción y función similares a los descritos anteriormente en referencia a la figura 9. Los bogies 66 cabalgan en neumáticos en el ciemiento 68. Los bogies soportan ambas componentes de fuerza horizontal y vertical del bastidor 63. También proporcionan la única reacción a los momentos de sobregiro porque la realización representada en la figura 10 no incluye una estructura de poste estacionaria central ni cojinetes centrales. Dado que los bogies 66 deben proporcionar toda la reacción a momentos de sobregiro, es importante que sean suficientemente pesados.

La figura 11 representa una vista superior de la misma realización representada en la figura 10. Se puede ver que los rotores están decalados de modo que el rotor central esté más hacia delante que los rotores laterales. Esto puede proporcionar cierta ventaja de rendimiento aerodinámico. Sin embargo, por consideraciones de diseño estructural o por otras razones, puede ser preferible disponer todos los rotores en un plano común. Los rotores

laterales son soportados por alas de y elementos de armadura de tensión y compresión 64 que se extienden lateralmente desde el bastidor principal 63.

La figura 12 representa una vista lateral de la misma realización representada en la figura 10. Se puede ver que hay una pluralidad de cables de viento 70 que se extienden desde la parte delantera y trasera del bastidor de armadura 63 para transmitir cargas desde el bastidor a los bogies delanteros y traseros 66. La tensión en los cables de viento delanteros 70 proporciona la reacción primaria contra momentos de sobregiro.

Encima del bastidor de armadura 63, como se representa en las figuras 10 y 12, hay una varilla pararrayos 72. La varilla pararrayos 72 es suficientemente alta de modo que todos los rotores 12 estén dentro de su cono de protección. La varilla pararrayos atrae los rayos próximos y dirige la corriente de forma segura a través de bastidor 63 y a la tierra a través del cimiento 68. Se deberá disponer un conductor eléctrico adecuado entre el bastidor 63 y el cimiento 68 para poner adecuadamente a tierra todo el sistema. La reciente experiencia en la industria eólica ha demostrado que el daño producido por rayos puede ser un problema significativo en turbinas eólicas muy grandes. Las turbinas eólicas de la técnica anterior tienen la limitación de que una pala siempre es la parte más alta de la turbina y no se puede proteger fácilmente contra los rayos. El uso de rotores más pequeños montados en una estructura de bastidor permite colocar una varilla pararrayos más alta que la parte superior de la pala más alta, dando por ello adecuada protección a las palas.

La figura 3 representa una realización de la invención con 15 rotores en filas decaladas, y la figura 10 representa una realización de la invención con 18 rotores en filas rectas. Sin embargo, hay otras muchas configura-

ciones posibles de la cantidad de rotores y de la disposición de los rotores. Por ejemplo, la figura 13 representa una configuración con solamente tres rotores. La figura 14 representa una disposición con 8 rotores. La
5 figura 15 representa una disposición con 20 rotores. Se pueden idear otras muchas configuraciones y se considera que todas ellas caen dentro del alcance de la presente invención. El número y la disposición de rotores solamente están limitados por la capacidad del ingeniero de es-
10 tructuras de diseñar una estructura de soporte que soporte adecuadamente los rotores y proporcione la guiñada del sistema. Sin embargo, en cada configuración es importante que cada uno de los rotores esté optimizado para la velocidad del viento que experimente.

15 Otra posible realización de la presente invención se representa en la figura 16. Aquí hay 7 rotores dispuestos en filas a cuatro alturas diferentes. El diámetro de rotor es diferente en cada fila de modo que cada fila de rotores esté optimizada para las velocidades del viento
20 que experimente. La fila inferior de rotores experimenta la velocidad más baja del viento y por ello sus rotores son los más grandes. Se espera que los regímenes de potencia de todos los rotores sean los mismos en las realizaciones representadas en la figura 16. Es posible dise-
25 ñar esta realización de turbina con diferente regímenes de potencia para cada fila, pero haciendo el régimen de potencia consistente para todos los rotores, es posible utilizar cajas de engranajes y generadores intercambia-
bles.

30 La turbina eólica según el método de la presente invención tiene varias ventajas adicionales sobre la técnica anterior. Dado que múltiples rotores giran a velocidades rotacionales dispares, la excitación vibracional de la estructura se difunde a través de varias frecuencias
35 en vez de concentrarse en una sola frecuencia. Esto redu-

ce las cargas estructurales debidas a dinámica estructural y disminuye la posibilidad de fallo por fatiga de ciclo bajo. Otra ventaja de la presente invención es que puede ser transportada fácilmente. Las turbinas eólicas de escala de megavattios muy grandes tienen palas y barquillas sumamente grandes que son bastante difíciles y caras de transportar. Éste es un problema especial si las partes debe ser llevadas a una zona remota con curvas pronunciadas en la carretera o con puentes bajos. Dado que los componentes individuales de la presente invención son mucho más pequeños que los de las turbinas eólicas de la técnica anterior, todo el sistema puede ser empaquetado para transporte en contenedores estándar de 60 pies.

Una aplicación potencialmente muy atractiva de la presente invención es para generación de energía eólica en alta mar. En vez de usar bogies o algún otro sistema para guiar la torre, toda la torre se puede soportar en un casco en el agua. Dado que el casco puede girar fácilmente en el agua, la guiñada de la torre no es problema. El casco que soporta la torre estaría fijado por una soga conectada a un anclaje en el fondo del mar. De esta manera, sería posible desplegar series de turbinas eólicas en alta mar en aguas muy profundas.

Uno de los problemas que crea la presente invención es la suma de potencia de los rotores individuales. Generalmente, no es un problema que cada rotor genere potencia eléctrica y que la potencia eléctrica de cada uno de los rotores sea recogida en una sola línea de transmisión. Sin embargo, todavía existe el problema de su convertir la frecuencia variable en cada rotor a electricidad de 60 Hz (50 Hz en Europa) y sumar la potencia de 60 Hz resultante, o si alimentar la potencia de frecuencia variable de cada rotor a un solo convertidor electrónico de potencia en la base de la torre y convertir toda la potencia a potencia 60 Hz de una vez. Otra posibilidad es

generar potencia CC en cada rotor individual y combinar la potencia CC que entonces puede ser invertida a potencia CA de 60 Hz. Cualquiera de estos métodos de sumar la potencia funcionaría y cada uno de ellos podría proporcionar ventajas en algunas aplicaciones. Otra posibilidad sería proporcionar un sistema de articulaciones mecánicas de trenes de accionamiento de modo que la potencia mecánica de cada uno de los rotores se combine para accionar un solo generador eléctrico.

10 Un uso intrigante de la presente invención sería electrolizar agua para generar hidrógeno. El hidrógeno podría ser transportado posteriormente para uso en otro lugar en una pila de carburante o en un conjunto generador de turbina de gas o en motores de encendido por chispa. Este método de producción de potencia podría ser especialmente ventajoso para uso en alta mar y donde las turbinas eólicas estén situadas en posiciones remotas donde los vientos sean especialmente fuertes. El producto a enviar a mercado podría incluir hidrógeno gaseoso o líquido. Podría también incluir metanol sintetizado de CO₂ lavado de agua del mar o la atmósfera más el hidrógeno producido en electrolizador. El producto podría también incluir gasolina de alto octanaje creada por hidrogenación adicional (deshidratación) del metanol o, como amoníaco anhidro, sintetizado de N₂ destilado a partir de la atmósfera, más hidrógeno. Si la turbina eólica de la presente invención se usa para electrolizar agua a hidrógeno, o para crear algún otro producto a través de un proceso químico, entonces se resuelve el problema de la suma de potencia de los rotores individuales. Cada rotor podría incluir su propio electrolizador y el hidrógeno producido en cada rotor se podría combinar simplemente y embotellar en la base de la torre. La potencia CC combinada en la base de la torre podría ser usada para electrolizadores de potencia allí situados.

Aunque se han mostrado y descrito realizaciones preferidas de la invención, será evidente a los expertos en la técnica que se puede hacer varias modificaciones en estas realizaciones sin apartarse del alcance de la invención definido por las reivindicaciones siguientes.

5

REIVINDICACIONES

1. Un método de extraer energía eólica incluyendo:
proporcionar una torre (10);
soportar una pluralidad de turbinas movidas por rotor (12) en dicha torre (10) a múltiples alturas;
5 proporcionar un sensor de velocidad del viento asociado con cada una de dichas turbinas (12) para medir la velocidad del viento en una turbina respectiva (12);
optimizar los parámetros de diseño de cada turbina movida por rotor (12) para la velocidad esperada del viento a la altura en que se soporta; y
10 controlar cada turbina (12) para óptimo rendimiento para su velocidad medida del viento a la altura a la que se soporta.
- 15 2. El método de la reivindicación 1, donde el paso de optimizar cada turbina movida por rotor (12) incluye seleccionar una potencia de régimen para cada turbina (12) en base a la velocidad anual media del viento a la altura a la que se soporta.
- 20 3. El método de la reivindicación 1, donde el paso de optimizar cada turbina movida por rotor (12) incluye dotar a cada rotor (12) de una pluralidad de palas (20) y seleccionar la relación de la zona en forma plana de dichas palas (20) a la zona de barrido de cada dicho rotor (12) en base a la velocidad anual media del viento a la altura a la que se soporta.
- 25 4. El método de la reivindicación 1, donde el paso de optimizar cada turbina movida por rotor (12) incluye seleccionar un diámetro de rotor en base a la velocidad anual media del viento a la altura a la que se soporta.
- 30 5. El método de la reivindicación 1, incluyendo además el paso de proporcionar un controlador que recibe datos de cada uno de dichos sensores de velocidad del viento y controlar la operación de cada turbina (12) en base a la velocidad medida del viento.
- 35

6. El método de la reivindicación 5, donde el paso de controlar la operación de cada una de dichas turbinas movidas por rotor (12) incluye usar dicho controlador para regular el paso de pala de cada dicho rotor (12) en base a la velocidad medida del viento en la posición de la turbina.

7. El método de la reivindicación 5, donde el paso de controlar la operación de cada turbina (12) incluye usar dicho controlador para regular la velocidad rotacional de cada dicho rotor (12) en base a la velocidad medida del viento en la posición de la turbina.

8. Una turbina eólica para uso en el método de extraer energía eólica según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7.

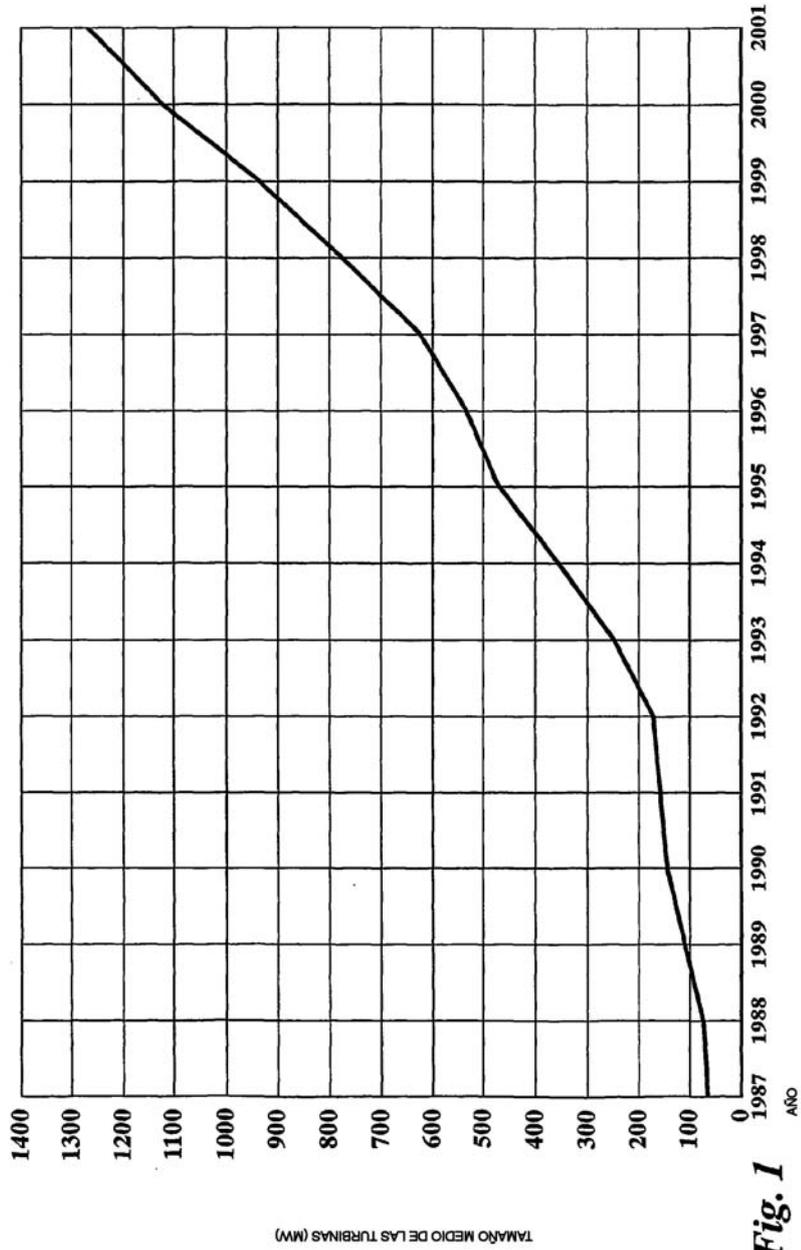


Fig. 1

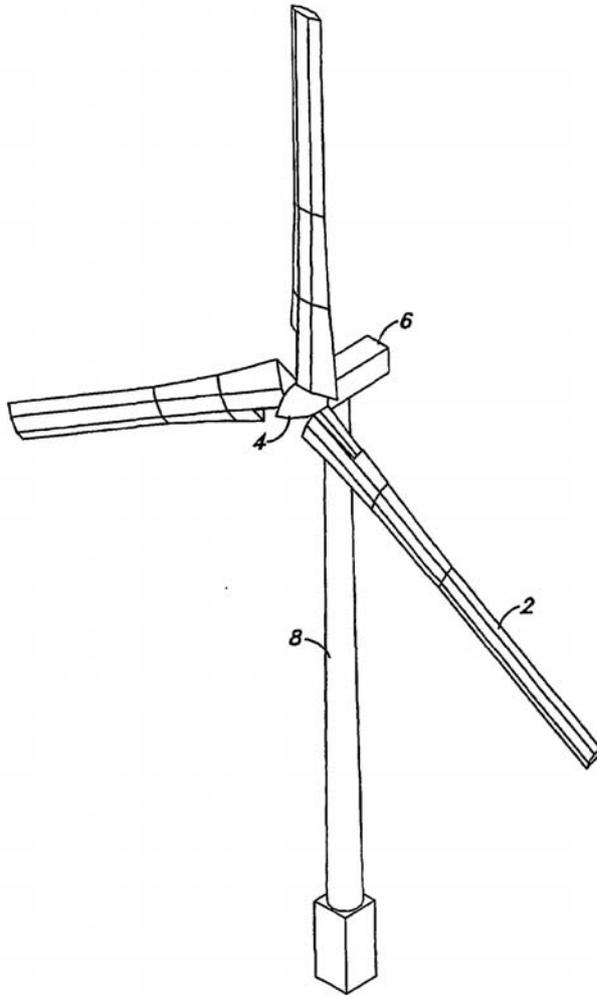


FIGURA 2

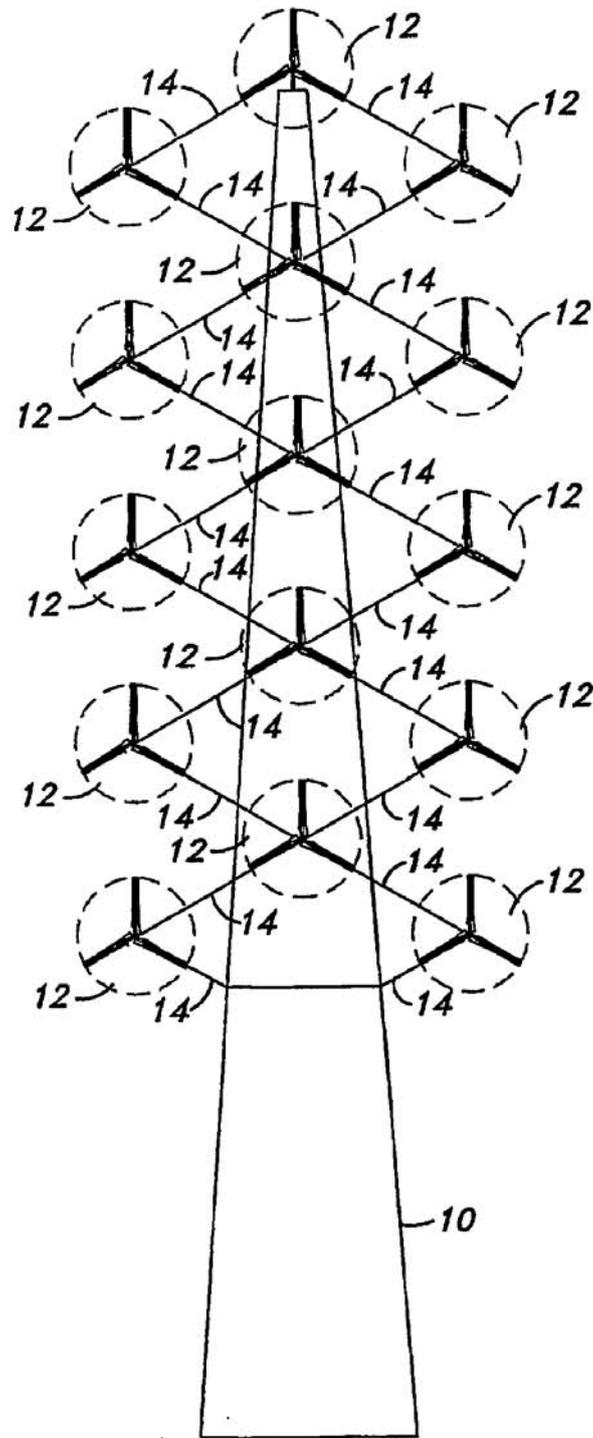


FIGURA 3

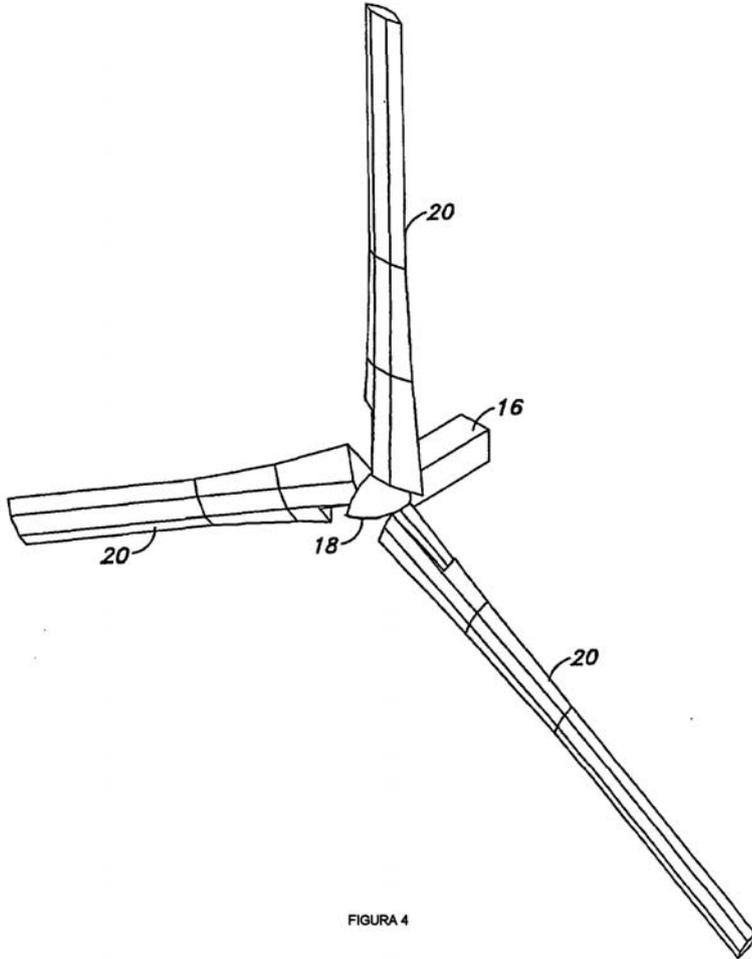


FIGURA 4

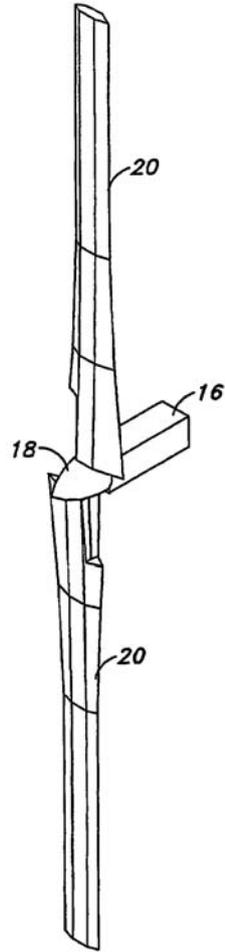


FIGURA 5

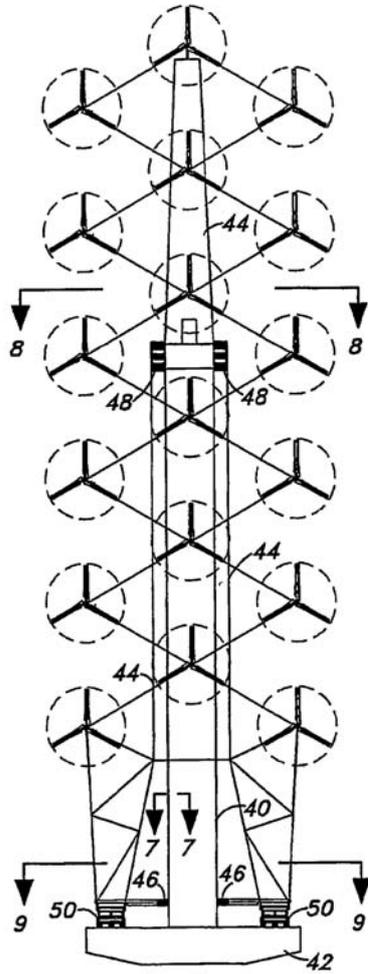


FIGURA 6

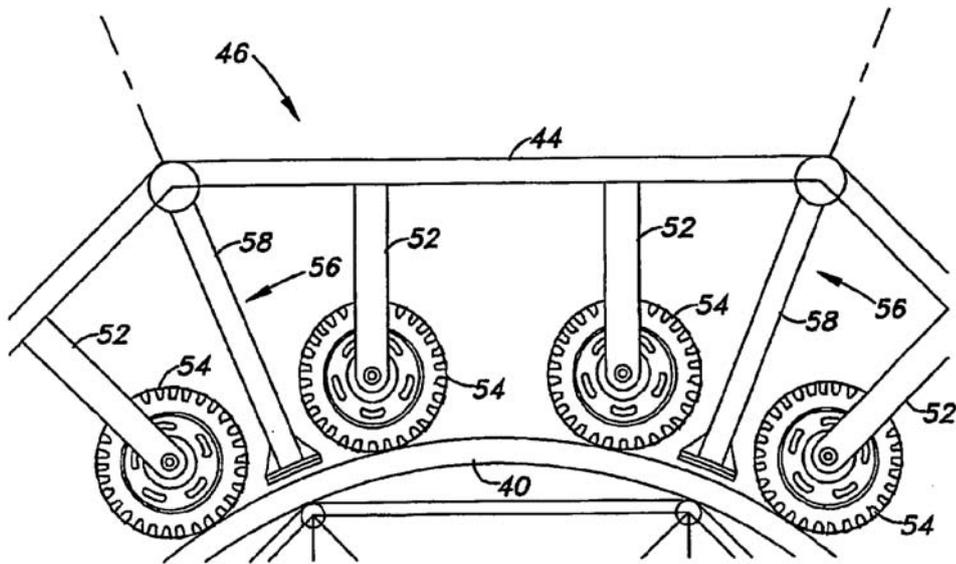


FIGURA 7

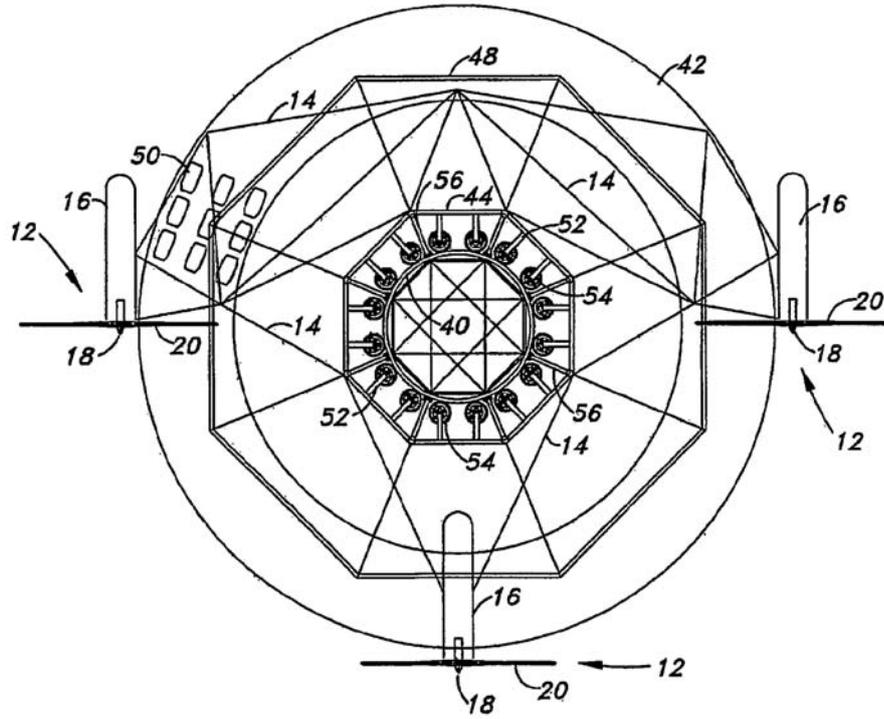


FIGURA 8

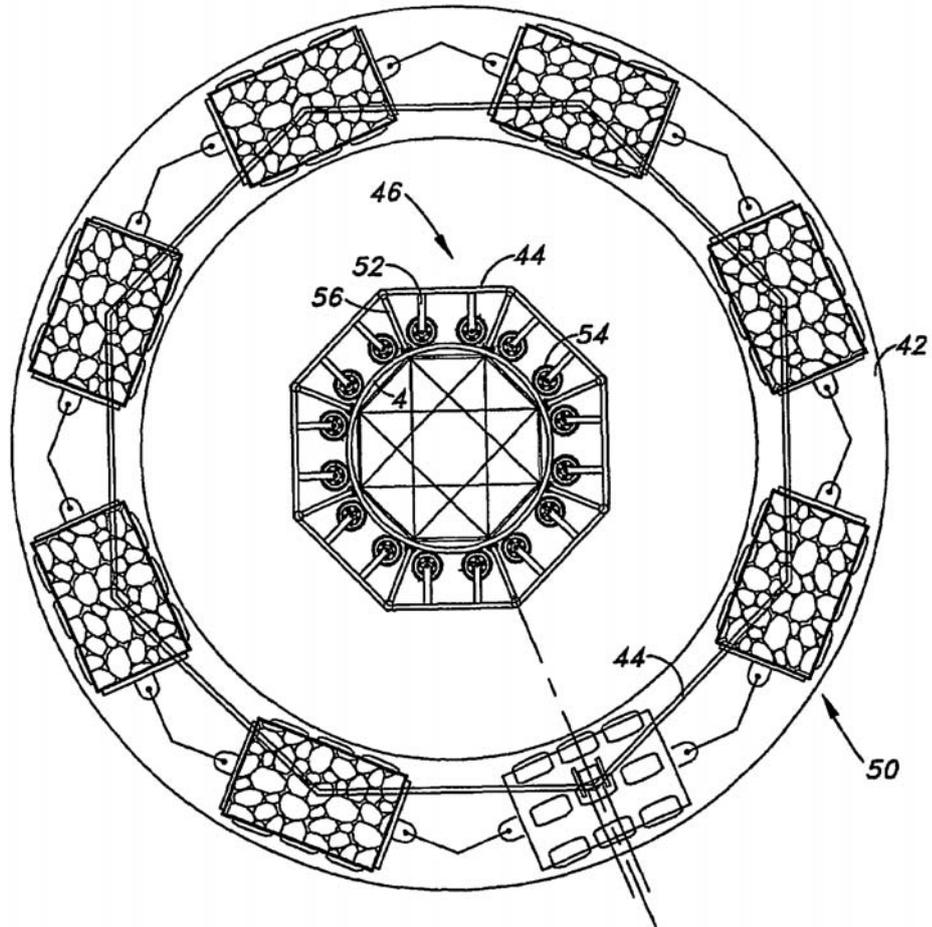


FIGURA 9

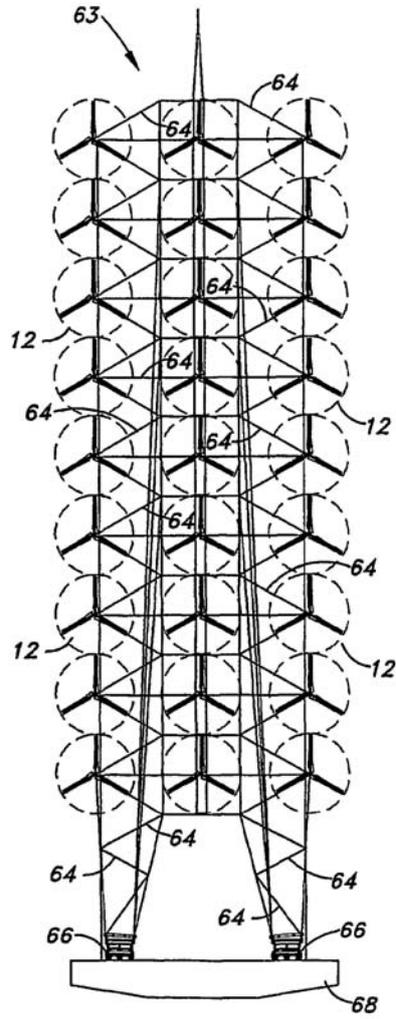


FIGURA 10

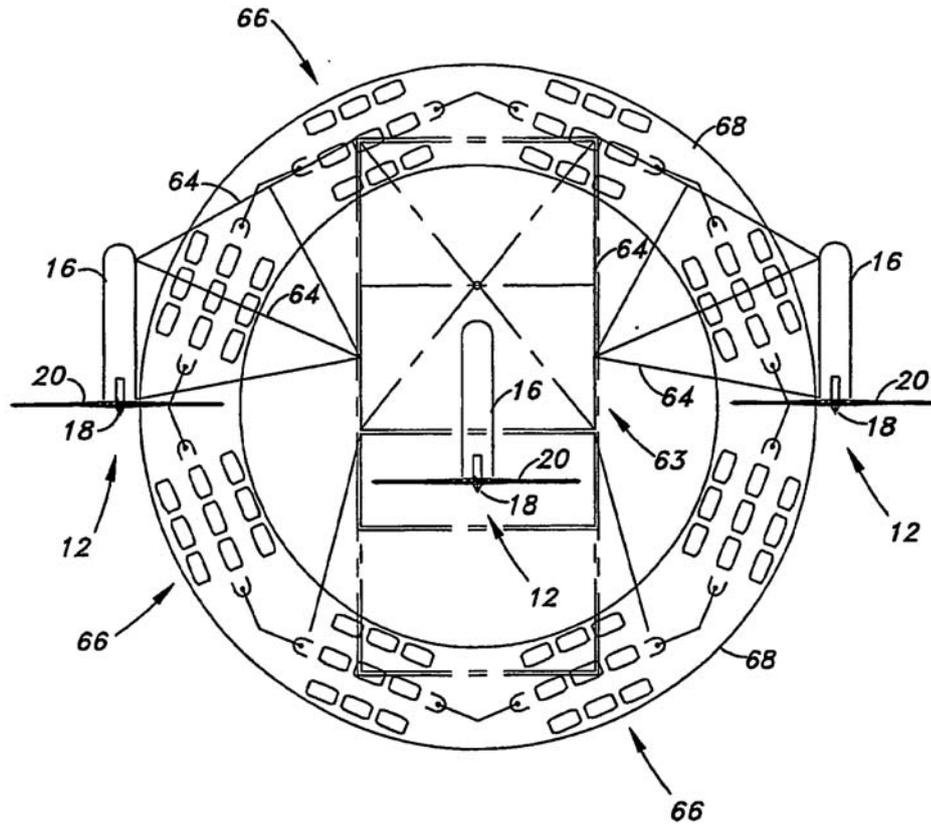


FIGURA 11

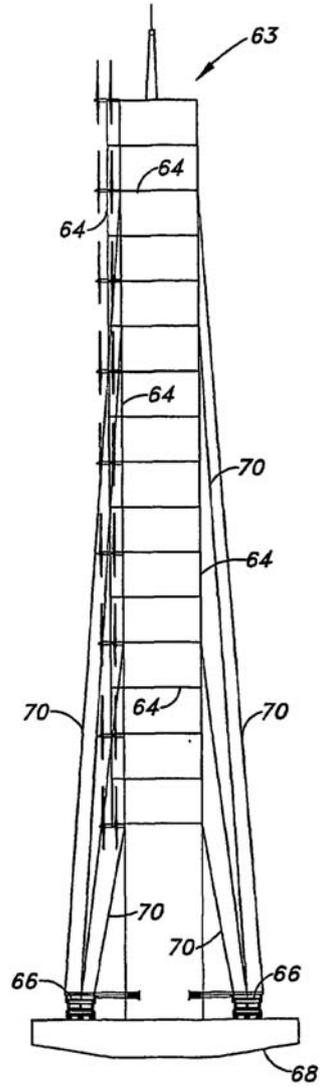


FIGURA 12

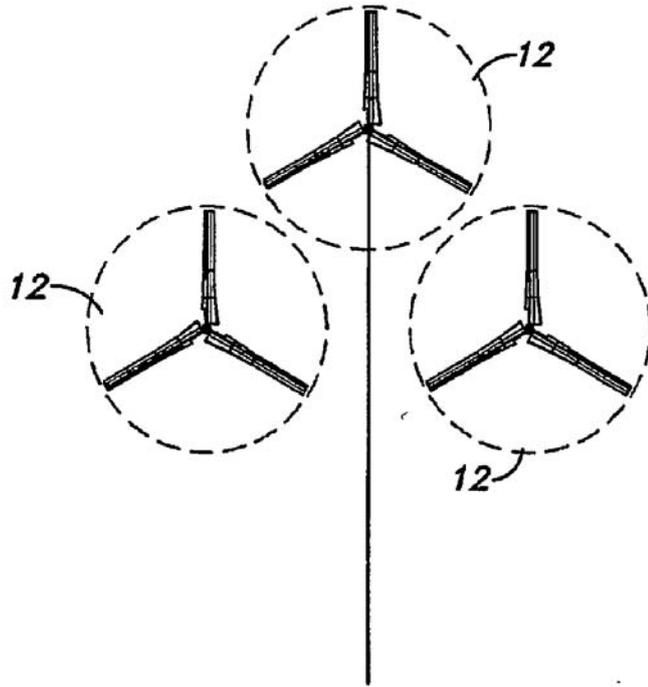


FIGURA 13

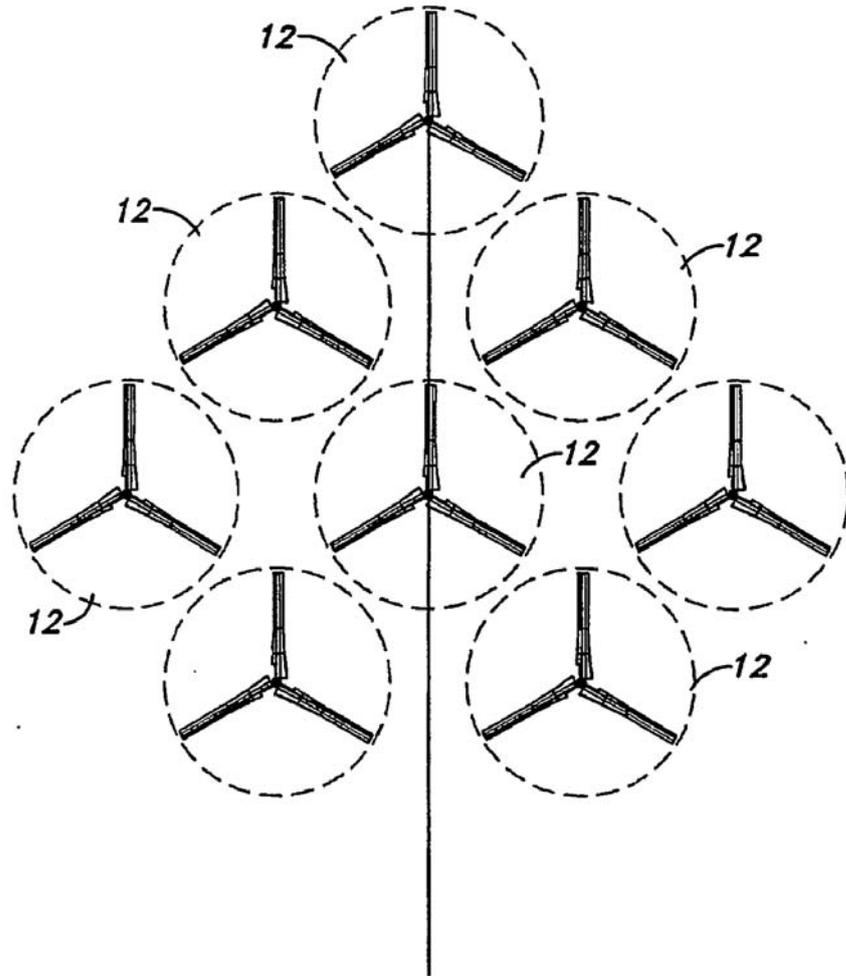


FIGURA 14

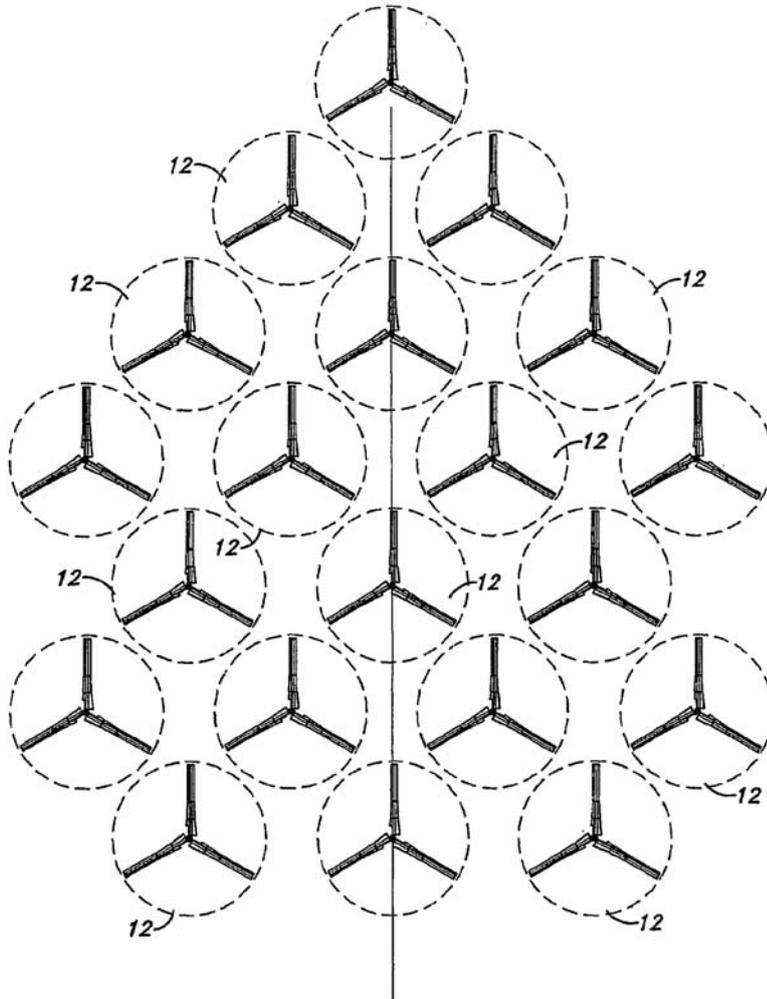


FIGURA 15

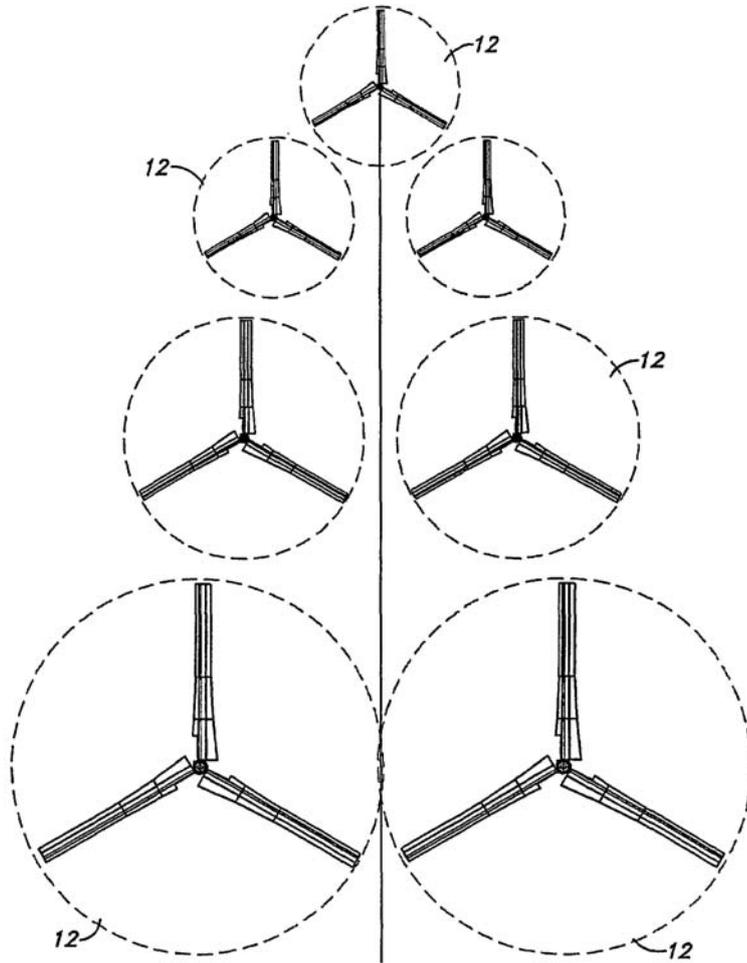


FIGURA 16