(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 643 906**

(51) Int. CI.:

B63B 35/00	(2006.01)	***F03D 7/02***	(2006.01)
B63B 21/50	(2006.01)	***E04H 12/00***	(2006.01)
B63B 35/44	(2006.01)	***F03D 13/25***	(2006.01)
B63B 39/03	(2006.01)		
E02B 9/00	(2006.01)		
F03D 1/00	(2006.01)		
E02B 17/00	(2006.01)		
B63B 39/04	(2006.01)		
B63B 39/06	(2006.01)		
F03D 9/00	(2006.01)		

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.04.2009 E 14152768 (9)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.07.2017 EP 2727813**

(54) Título: **Plataforma de alta mar estabilizada por columnas con planchas de atrapamiento de agua y sistema de amarre asimétrico para soporte de turbinas eólicas de alta mar**

(30) Prioridad:

23.04.2008 US 125241

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.11.2017

(73) Titular/es:

PRINCIPLE POWER, INC. (100.0%)
93 S. Jackson Street, 63650
Seattle, WA 98104, US

(72) Inventor/es:

RODDIER, DOMINIQUE y
CERMELLI, CHRISTIAN

(74) Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

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

Plataforma de alta mar estabilizada por columnas con planchas de atrapamiento de agua y sistema de amarre asimétrico para soporte de turbinas eólicas de alta mar

REFERENCIA CRUZADA A SOLICITUDES RELACIONADAS

Esta solicitud de patente reivindica la prioridad de la Solicitud de Patente Provisional de Estados Unidos N.º 61/125.241, titulada "Column-Stabilized Offshore Platfonn With Water-Entrapment Plates And Asymmetric Mooring System For Support Of Offshore Wind Turbines" presentada el 23 de abril de 2008.

ANTECEDENTES

Una turbina eólica es una máquina rotativa que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica que luego es convertida a electricidad. Se ha desarrollado turbinas eólicas para instalaciones basadas en tierra, así como instalaciones en alta mar. Las turbinas eólicas basadas en tierra están fijadas al suelo y situadas en zonas ventosas. Hay turbinas eólicas de eje vertical que tienen el eje de rotor principal dispuesto verticalmente y turbinas eólicas de eje horizontal que tienen un eje de rotor horizontal que apunta al viento. Las turbinas eólicas de eje horizontal tienen por lo general una torre y un generador eléctrico acoplado a la parte superior de la torre. El generador puede estar acoplado directamente o mediante una caja de engranajes al conjunto de cubo y palas de turbina.

Las turbinas eólicas también se han usado para aplicaciones en alta mar. Los sistemas de alta mar de torre única se montan en el fondo del mar y están limitados a aguas poco profundas de hasta 30 metros. Si la torre de turbina se monta en una base más ancha, tal como una estructura reticular, este requisito de poca profundidad se puede ampliar a 50 m. En aguas más profundas, cabe esperar que solamente los sistemas flotantes sean económicamente viables. El inconveniente de los sistemas de aguas poco profundas es que el agua solamente suele ser poco profunda cerca de la costa. Por lo tanto, las turbinas eólicas situadas cerca de la costa pueden bloquear la vista de la costa y crear obstrucciones a la navegación y peligros potenciales para barcos y aviones.

Se están desarrollando actualmente varios conceptos para plataformas de turbina eólica flotantes de alta mar. Por lo general, se dividen en tres categorías principales: Spars; plataformas de patas de tensión (TLP); y sistemas semisumergibles/híbridos. Los ejemplos de plataformas de turbina eólica flotantes incluyen la Statoil Norsk-Hydro Hywind spar, (Fig. 1), el prototipo reciente Blue H TLP (Fig. 2), la híbrida SWAY spar/TLP (Fig. 3), la semisumergible Force Technology WindSea (Fig. 4) y la semisumergible Trifloater (Fig. 5). Con referencia a la Fig. 1, las Spars son estructuras alargadas lastradas con un lastre significativo en la parte inferior de la estructura y depósitos flotantes cerca de la línea de flotación. A efectos de estabilidad, el centro de gravedad debe estar más bajo que el centro de flotabilidad. Esto asegurará que la Spar flote vertical. La Spar está amarrada al fondo del mar con varias líneas que mantienen la Spar en posición. En términos generales, las estructuras tipo Spar tienen mejores rendimientos de arfada que las semisumergibles debido al calado profundo y la reducida respuesta a fuerzas de excitación de olas verticales de la Spar. Sin embargo, también tienen más movimientos de cabeceo y balanceo que los otros sistemas, dado que la zona plana de agua que contribuye a la estabilidad es reducida en este diseño.

Con referencia a la figura 2, las TLP tienen cables tensados verticalmente o tubos de acero que conectan el flotador directamente al fondo del mar. No se precisa un centro de gravedad bajo para estabilidad, excepto durante la fase de instalación, cuando se puede añadir temporalmente módulos de flotabilidad para proporcionar suficiente estabilidad. Las TLP tienen muy buenos movimientos de arfada y angulares, pero la complejidad y el coste de la instalación de amarre, el cambio de tensión de los cables debido a las variaciones de las mareas, y el acoplamiento de frecuencia estructural entre la torre y el sistema de amarre, son tres inconvenientes principales de los sistemas TLP.

El documento US2008/0014025 describe un sistema de montaje para montar estructuras y equipos, tales como aerogeneradores en el agua. La estructura está unida a un soporte, que está unido a una cimentación a través de elementos de conexión. Los tanques de flotabilidad o la flotabilidad inherente del soporte o de los elementos de conexión se usan para mantener una posición estable del soporte en el agua. Utilizando elementos de conexión que transmiten fuerza de empuje y de tracción, se suprimen movimientos no deseados del soporte, mientras que sólo se requieren fuerzas moderadas sobre la cimentación.

Al comparar diferentes tipos de estructuras de turbinas eólicas de alta mar, los movimientos inducidos por las olas y el viento no son los únicos elementos de rendimiento a considerar. La economía desempeña un papel significativo. Por lo tanto, es importante estudiar con esmero los costes de fabricación, instalación, puesta en servicio/cierre y la

facilidad de acceso para las metodologías de mantenimiento. Los conceptos semisumergibles con un calado poco profundo y una buena estabilidad en condiciones operativas y de tránsito son significativamente más baratos de remolcar, instalar y poner en servicio/cerrar que las Spars, debido a su calado, y las TLP, debido a su baja estabilidad antes de la conexión de los cables.

RESUMEN DE LA INVENCIÓN

La invención se define por la materia objeto de las reivindicaciones independientes 1 y 7, y por las reivindicaciones dependientes 2 a 6, 8 y 9. En el presente documento se describen plataformas de turbina eólica flotantes de alta mar semisumergibles que incluyen al menos tres columnas. Además de al menos tres columnas, las plataformas de turbina eólica descritas en el presente documento incluyen características adicionales que mejoran el rendimiento de la plataforma de turbina eólica. En una realización representada en la Fig. 6, la plataforma de turbina eólica flotante incluye un sistema de lastre activo que mueve el lastre de agua entre las columnas para mantener la torre verticalmente alineada. Además, un sensor de alineación puede estar acoplado a la plataforma para determinar la carga del viento. Además, la plataforma de turbina eólica según la presente descripción puede incluir una o más características adicionales, tal como un sistema de amarre asimétrico y un sistema de lastre activo que facilitan la producción de una estructura que no solamente puede resistir las cargas medioambientales, sino que también es de peso relativamente ligero en comparación con otros diseños de plataformas y que puede dar lugar a una mejor economía para la producción de energía.

Las columnas incluidas en las plataformas descritas en el presente documento pueden estar acopladas una a otra con un sistema de tirantes tubulares que incluye vigas de arriostrado horizontales y verticales. Una plancha de atrapamiento de agua horizontal está montada en la porción inferior de algunas o de todas las columnas. La torre de turbina eólica está sometida a cargas eólicas considerables muy altas en la estructura, y la separación entre columnas logra estabilidad. En una realización, ilustrada en la Fig. 6, la torre de turbina está montada encima de una de las columnas, que está acoplada a las otras columnas por las vigas principales. Esta construcción mejora la eficiencia estructural de la plataforma de turbina eólica flotante y permite que la estructura sea de un peso relativamente ligero.

En otra realización, ilustrada en la Fig. 7, la torre de turbina está acoplada directamente encima de una columna de flotabilidad que soporta el peso de la torre y los componentes de turbina eólica. En esta realización, las otras columnas sirven para estabilizar la plataforma y mantener la torre en una alineación vertical. Además, se puede usar un sistema de flotabilidad activo para mover lastre entre las columnas. En la realización representada en la Fig. 7, dado que el peso de la torre no es soportado por la flotabilidad de las columnas exteriores, la plataforma no requiere mucho soporte estructural entre las columnas exteriores y la columna de la torre central. En contraposición, en algunos diseños anteriores donde la torre se coloca en el centro de la cubierta, la estructura es relativamente pesada y potencialmente menos económicamente factible porque, debido al peso de la torre y la turbina y el momento aerodinámico, la estructura debe soportar grandes cargas en medio de una estructura larga.

Una góndola, que puede alojar, por ejemplo, uno o más de un sistema de control de cabeceo, caja de engranajes, controlador de guiñada y generador, puede ir montada encima de la torre y proporciona soporte al cubo y las palas de turbina que se extienden desde el cubo. El cubo puede incluir un mecanismo que permita regular el cabeceo de las palas de turbina de modo que la velocidad rotacional de las palas de turbina sea constante en un rango normal de velocidades del viento. La góndola puede estar acoplada a un sistema de control de guiñada, que apunte las palas de turbina directamente al viento para eficiencia óptima. El equipo de turbina eólica, tal como la caja de engranajes y el generador eléctrico, que se colocan típicamente dentro de la góndola, puede estar allí o se puede colocar más abajo en la torre o encima de la columna. También se pueden usar turbinas de accionamiento directo, que no tienen caja de engranajes, con las plataformas descritas en el presente documento. La potencia eléctrica producida por el generador puede estar a una frecuencia y amplitud aleatorias debido a la velocidad variable del viento. La potencia eléctrica puede ser alterada con un transformador, inversor y un rectificador para producir un voltaje y corriente de salida uniformes. Estos componentes eléctricos pueden estar situados en la góndola, en la parte inferior de la torre o en otra columna. La salida eléctrica de la turbina eólica puede ser transmitida a través de un cable eléctrico que se extiende al fondo del mar y una estación de potencia. En vez de ir directamente al fondo del mar, una porción del cable puede estar acoplada a mecanismos de flotabilidad que eleven la porción del cable. El cable puede tener entonces un recorrido curvado, que permita a la plataforma de turbina eólica flotante moverse vertical u horizontalmente con las olas, la corriente y las mareas sin imponer tensión adicional significativa al cable.

En una realización, la plataforma de turbina eólica flotante tiene una configuración especial que es una estructura de alta resistencia. Las vigas principales montadas entre las columnas son de igual longitud y forman sustancialmente un triángulo equilátero. Vigas transversales horizontales de arriostrado están acopladas entre las vigas principales

adyacentes aproximadamente en un tercio de la longitud de las vigas principales. Las vigas transversales horizontales de arriostrado y las vigas principales forman triángulos equiláteros adicionales en las tres esquinas del triángulo formado por las vigas principales. Vigas de arriostrado verticales están acopladas entre las secciones medias de las columnas y un tercio de la longitud de las vigas principales. Los triángulos formados por las vigas de arriostrado verticales, las columnas y las vigas principales son triángulos isósceles sustancialmente rectos. Esta configuración proporciona una estructura fuerte que puede soportar las fuerzas de carga requeridas minimizando al mismo tiempo la cantidad de material para la formación de la plataforma de turbina eólica flotante.

En realizaciones específicas, una plataforma de turbina eólica flotante como se describe en el presente documento puede estar diseñada de modo que se fabrique y monte totalmente en un muelle. Por ejemplo, se puede usar una grúa para montar componentes de la plataforma de turbina eólica flotante que se pueden construir completamente en el lugar de montaje del muelle. Además, cuando se desee, los componentes de turbina eólica se pueden montar e integrar con la plataforma y la subestructura en el muelle. Una vez completamente montado, el lastre se puede quitar completamente de las columnas de la plataforma de turbina eólica flotante de modo que la estructura pueda salir de un canal al lugar de instalación. Si se precisa flotabilidad adicional para reducir el calado para salir de un canal, se puede montar un módulo de flotabilidad en una o varias columnas para reducir el calado. Una vez que la plataforma ha alcanzado aguas más profundas, se puede quitar el módulo de flotabilidad y las columnas se pueden llenar parcialmente de lastre de agua para estabilizar la plataforma.

Se pueden fijar anclajes marinos al fondo del mar antes de arrastrar la plataforma de turbina eólica flotante al lugar de instalación. Cuando la plataforma de turbina eólica flotante es movida a posición, las líneas de amarre se pueden fijar a las columnas y apretar a una tensión predeterminada. En una realización, la torre está montada sobre una de las columnas y las líneas de amarre están dispuestas de manera asimétrica, con más líneas de amarre acopladas a la columna que soporta la torre de turbina que a las otras columnas. Por ejemplo, si se usan cuatro líneas de amarre, dos de estas líneas se conectan a la columna que soporta la torre a un intervalo en ángulo de aproximadamente 90 grados y se conecta una línea a cada una de las columnas restantes. Como otro ejemplo, si se usan seis líneas de amarre, se pueden conectar cuatro líneas de amarre a la columna de soporte de torre a un ángulo de aproximadamente 60 grados en un rango de aproximadamente 180 grados y cada una de las otras columnas se acopla a una sola línea de amarre. Los ángulos de las líneas de amarre pueden estar configurados de manera que se crucen en la columna de torre. Si se usa una plataforma de turbina eólica flotante simétrica, las líneas de amarre se pueden acoplar a la plataforma de manera simétrica. Por ejemplo, se pueden usar un total de seis líneas de amarre con dos líneas de amarre acopladas a cada una de las columnas.

Las líneas de amarre pueden ser líneas en forma de catenaria convencionales compuestas de una combinación de cadena, cables y anclajes de arrastre-embebidos. Como alternativa, las líneas de amarre pueden estar compuestas de secciones de poliéster tensas, y también incluyen lastres de aglomerado, que son masas pesadas suspendidas a secciones del sistema de amarre. En una realización, los anclajes están incrustados en el fondo del mar y una sección de cadena está acoplada a los anclajes. La línea de poliéster se puede unir a la cadena para proporcionar cierta elasticidad a la línea de amarre. Cuando se use, el extremo opuesto de la línea de poliéster se puede acoplar a un tramo adicional de cadena que esté montado en uno o más mecanismos tensores en cada una de las columnas. En las cadenas se pueden montar lastres de aglomerado pesados que se conecten a cada una de las columnas para bajar el ángulo de las cadenas a las columnas, y las líneas de amarre se pueden tensar mediante mecanismos acoplados a cada una de las columnas.

Si la turbina eólica y la torre están montadas en una de las tres columnas, una columna soporta más peso y el casco está asimétricamente equilibrado cuando no hay viento. Sin embargo, la fuerza del viento contra las palas de turbina y la torre produce un momento contra la torre que normalmente empuja la torre alejándola del centro de la plataforma. Este momento aplica una fuerza hacia abajo en la columna de soporte de torre reduciendo al mismo tiempo la fuerza hacia abajo en las columnas independientes que no soportan la torre.

Cuando la turbina eólica esté instalada, la turbina eólica girará y el generador producirá electricidad. Sin embargo, la velocidad y la dirección del viento pueden cambiar frecuentemente. Por lo tanto, en algunas realizaciones, una turbina utilizada en una plataforma según la presente descripción puede estar provista de un sistema de dirección del viento incluyendo un sensor de dirección del viento y un sistema de control de guiñada. En dicha realización, el sensor de dirección del viento detectará los cambios en la dirección del viento y el sistema de control de guiñada girará la góndola (guiñada) encima de la torre para alinear las palas de turbina con la dirección del viento. Además, una turbina utilizada en una plataforma según la presente descripción puede estar provista de un sensor de velocidad del viento que detecte cambios en la velocidad del viento y está acoplado a un sistema de control de cabeceo de turbina que responde a los cambios de la velocidad del viento induciendo un cambio en el paso de las palas de turbina para optimizar la potencia de salida o minimizar las fuerzas de arrastre del viento en las palas de

turbina. Se pueden obtener ejemplos de sensores de dirección y velocidad del viento disponibles en el mercado de Campbell Scientific Ltd., Reino Unido, y NovaLynx Corp., Estados Unidos.

A medida que aumenta la velocidad del viento contra la torre y las palas de turbina, la fuerza del viento puede hacer que toda la plataforma de turbina eólica flotante pierda la alineación vertical. Con el fin de compensar las fuerzas del viento (empuje), una plataforma de turbina eólica según la presente descripción está provista de un sistema de lastre interno que utiliza bombas de agua para mover el agua entre cada una de las columnas. En una realización, el sistema de lastre interno incluye uno o más sensores de alineación acoplados a un controlador que controla las bombas de agua del sistema de lastre. Si un sensor de alineación detecta que la plataforma de turbina eólica flotante se está inclinando hacia una de las columnas, el sistema de lastre interno puede bombear agua de la columna de flotación baja y a las otras columnas para aumentar la flotabilidad de la columna baja y reducir la flotabilidad de las otras columnas. Este movimiento del agua elevará la esquina flotante baja de la plataforma de modo que la torre vuelva a una alineación vertical. Cuando el sensor de alineación detecta que la alineación vertical se ha restablecido, las bombas se pueden parar. Dado que solamente hay que compensar el momento de giro excesivo aplicado a la estructura, en una realización del sistema de lastre interno, no hay necesidad de bombear agua adicional desde el exterior, y el sistema de lastre interno puede funcionar en bucle cerrado.

Dado que la operación del sistema de lastre interno requiere el bombeo de una cantidad sustancial de agua, el tiempo de respuesta para lograr un ajuste de lastre deseado puede ser de hasta 15-30 minutos. En una realización, el sensor de alineación pueden ser dos giroscopios que puedan detectar el movimiento rotacional alrededor de los ejes X e Y en el plano horizontal. En perfecta alineación vertical, los giroscopios de eje X e Y no detectarán ninguna rotación de la plataforma. Sin embargo, si hay inclinación de la plataforma de turbina eólica flotante, los giroscopios de eje X y/o Y pueden detectar el movimiento rotacional. Tal sensor de alineación puede estar acoplado a un controlador que responda a la desalineación bombeando agua a las columnas cuando sea necesario para corregir el error de alineación vertical. En una realización, el sistema de lastre es un sistema cerrado que aísla completamente el agua de lastre del agua del mar circundante. En tal realización, dado que el agua del mar no puede entrar en las columnas, las columnas no se pueden inundar y las plataformas no pueden volcar debido a un mal funcionamiento del sistema de lastre.

En una realización, el sistema de control de la turbina y el sistema de lastre están acoplados de modo que la torre puede estar vertical, pero la bomba de lastre todavía puede tener que funcionar hasta que la turbina esté en un modo óptimo de producción de potencia. En este caso el paso de las palas de turbina se modifica para reducir el empuje y mantener vertical el mástil. El paso de las palas se puede girar entonces lentamente de nuevo a su ángulo óptimo cuando el agua de lastre sea bombeada de una columna a la siguiente.

Las plataformas de turbina eólica descritas en el presente documento pueden usarse como una plataforma autónoma o, como alternativa, las plataformas aquí descritas se pueden colocar como parte de una pluralidad de plataformas de turbina eólica flotantes dispuestas en un parque eólico. La potencia eléctrica de cada una de las turbinas eólicas se puede combinar y transmitir a través de un solo cable hacia una estación de potencia que puede estar en tierra o en una plataforma flotante separada. En una realización, una de las plataformas puede ser usada como lugar de estancia para la tripulación o para mantenimiento. Esto puede proporcionar una zona protegida segura donde los operarios puedan estar protegidos contras condiciones medioambientales severas.

Si una plataforma de turbina eólica flotante como se describe en el presente documento tiene que ser devuelta a los muelles para servicio o cierre, la plataforma se puede desconectar de las líneas de amarre y cable de potencia y arrastrar al lugar de montaje del muelle. En canales de aguas poco profundas, el lastre de agua fijo puede ser expulsado de modo que el calado de la plataforma se reduzca a su calado de tránsito. Si es necesario, se pueden acoplar uno o más módulos de flotabilidad a las columnas si hay que reducir más el calado de tránsito.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La Fig. 1 ilustra una plataforma de turbina eólica flotante tipo Spar;
La Fig. 2 ilustra una plataforma de turbina eólica flotante de patas de tensión;
La Fig. 3 ilustra una plataforma de turbina eólica flotante de patas de tensión/spar;
La Fig. 4 ilustra una plataforma de turbina eólica flotante semisumergible simétrica;
La Fig. 5 ilustra una vista en perspectiva de una plataforma de turbina eólica flotante semisumergible asimétrica;
La Fig. 6 ilustra una plataforma de turbina eólica flotante semisumergible asimétrica;
La Fig. 7 ilustra una vista en alzado de una plataforma de turbina eólica flotante semisumergible;
La Fig. 8 ilustra una vista superior de una plataforma de turbina eólica flotante semisumergible;
La Fig. 9 ilustra una plancha de atrapamiento de agua conectada a la parte inferior de la plataforma de turbina eólica

flotante;
La Fig. 10 ilustra una vista superior de la plataforma de turbina eólica flotante semisumergible asimétrica;
La Fig. 11 ilustra una vista superior de la plataforma de turbina eólica flotante semisumergible asimétrica;
La Fig. 12 ilustra una vista en alzado de la plataforma de turbina eólica flotante semisumergible con un sistema de líneas de amarre tensas;
La Fig. 13 ilustra una vista en alzado de la plataforma de turbina eólica flotante semisumergible con un sistema de líneas de amarre de catenaria;
La Fig. 14 ilustra un diagrama del sistema de control de lastre;
Las Figs. 15-17 ilustran una vista en alzado de la plataforma de turbina eólica flotante reaccionando a cambios en la velocidad del viento;
Las Figs. 18-20 ilustran una vista en alzado de la plataforma de turbina eólica flotante reaccionando a cambios en la velocidad del viento;
Las Figs. 21-23 ilustran pasos secuenciales para mover la plataforma de turbina eólica flotante desde el muelle a aguas profundas;
La Fig. 24 ilustra una disposición de un grupo de plataformas de turbina eólica flotantes semisumergibles asimétricas.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

En el presente documento se describen plataformas de turbina eólica flotantes semisumergibles. Las plataformas descritas en el presente documento pueden usarse, por ejemplo, en instalaciones de turbinas eólicas en alta mar. Con referencia a la Fig. 6, el sistema de turbina eólica según la presente descripción puede incluir una plataforma de alta mar 105 que tiene al menos tres columnas 102, 103. Una plancha plana de atrapamiento de agua 107 está montada en la porción inferior de cada columna 102, 103. En una realización, las columnas 102, 103 son de forma cilíndrica. Sin embargo, las columnas pueden estar configuradas de cualquier forma adecuada para construir una plataforma de turbina eólica. Una torre de turbina eólica 111 está colocada directamente sobre una columna estabilizante 102. Las dos columnas estabilizantes independientes 103 que no soportan la torre de turbina 111 están separadas un ángulo que puede ser del rango de aproximadamente 40 a 90 grados de la columna de soporte de torre 102. Mientras que la plataforma 105 representada en las ilustraciones incluye tres columnas 102, 103, en otras realizaciones, la plataforma puede incluir cuatro o más columnas.

Las columnas 102, 103 están interconectadas con una estructura de tirantes compuesta de vigas principales 115, vigas de arriostrado 116 y vigas transversales 117. Las vigas principales 115 están conectadas a las partes superiores y a las partes inferiores de las columnas 102, 103 y las vigas de arriostrado 116 que están conectadas y acopladas entre las vigas principales 115 y las columnas 102, 103. Las vigas transversales están conectadas entre las vigas principales adyacentes 115. En una realización, las vigas principales 115 pueden estar configuradas de tal manera que se crucen con las tres columnas 102, 103 y formen un triángulo equilátero. De forma similar, las vigas de arriostrado horizontales 117 y las vigas principales 115 pueden estar configuradas para formar triángulos equiláteros adicionales. En una realización, las vigas de arriostrado verticales 116 están acopladas a las columnas 102, 103 aproximadamente en el medio de la altura y acopladas a las vigas principales 115 en puntos que están a aproximadamente un tercio de la longitud de las vigas principales. Las vigas principales 115, las columnas 102, 103 y las vigas de arriostrado verticales 116 pueden formar triángulos isósceles rectos. En una realización, las vigas principales 115, las vigas de arriostrado verticales 116 y las vigas de arriostrado horizontales 117 son preferiblemente estructuras tubulares huecas de secciones transversales circulares o rectangulares. Como alternativa, las vigas principales 115, las vigas de arriostrado verticales 116 y las vigas de arriostrado horizontales 117 también pueden ser vigas macizas en I, H o T. En otras realizaciones, las tres columnas 102, 103, las vigas de arriostrado 116 y las vigas de arriostrado horizontales 117 pueden formar cualesquiera otros tipos de configuraciones geométricas adecuadas para lograr una plataforma que exhiba las características deseadas de resistencia, peso, soporte de carga u otras prestaciones.

Este diseño de una plataforma de turbina eólica flotante descrita en el presente documento proporciona una estructura fuerte y eficiente. La resistencia puede ser atribuida a las estructuras tetraédricas formadas en las esquinas de la plataforma por las columnas, las vigas principales, las vigas de arriostrado verticales y las vigas de arriostrado horizontales. Un análisis de cargas de la estructura muestra que lo más probable es que cualquier deformación tenga lugar en las secciones medias de las vigas principales 115 entre los tetraedros adyacentes. Aunque la geometría de la estructura es muy eficiente, la resistencia de la estructura también se puede aumentar, por ejemplo, aumentando el diámetro exterior o los grosores de pared de las vigas principales 115, las vigas de arriostrado verticales 116 y las vigas de arriostrado horizontales 117. Si las vigas principales 115, las vigas de arriostrado verticales 116 y las vigas de arriostrado horizontales 117 son estructuras tubulares, la duración a la fatiga de la estructura se puede aumentar sustancialmente aumentando el grosor de pared. Por ejemplo, si el grosor de

pared de los tubos es el doble del grosor de pared nominal del tubo, la duración a la fatiga de la estructura se puede aumentar aproximadamente de 10 a 20 veces la duración a la fatiga de la estructura de grosor de pared nominal del tubo. El grosor de pared se puede aumentar en una sección corta cerca de las intersecciones de las vigas principales 115 con las vigas de arriostrado verticales 116 y las vigas de arriostrado horizontales 117.

En una realización, el diámetro o la anchura de la base de la torre de turbina 111 se aproxima a, pero es ligeramente menor que, el diámetro o la anchura de la columna 102 sobre la que se coloca. Esta uniformidad maximiza la continuidad de la estructura y minimiza las concentraciones de esfuerzos en las zonas críticas de la estructura de la plataforma 105. Las concentraciones de esfuerzos pueden ser más altas en la unión de la torre de turbina 111 y la columna 102 sobre la que se coloca la torre de turbina 111, donde los momentos de flexión son más altos debido a momentos inducidos por el viento y donde las vigas principales 115 conectan con las otras columnas estabilizantes 103. En una realización, el diámetro de las columnas 102, 103 puede ser uniforme para crear una estructura recta, tal como una estructura cilíndrica recta, mientras que la torre 111 puede ser más grande en la base y ahusarse a un diámetro o anchura más pequeños en la parte superior. Las columnas 102, 103 se pueden construir soldando conjuntamente varias secciones tubulares de diámetro uniforme mientras que la torre 111 se puede construir atornillando y/o soldando conjuntamente una serie de secciones ahusadas. Las columnas 102, 103 y la torre 111 se pueden reforzar con estructuras internas tales como planchas, nervios y pestañas internas.

Dado que las columnas 102, 103 solamente proporcionan flotabilidad y estabilidad a la plataforma de turbina eólica flotante, solamente se precisa un mínimo espacio de cubierta 119 entre las partes superiores de las columnas 103. Se pueden colocar portalones estrechos encima de las vigas principales superiores 115, conectando cada una de las columnas 102, 103. Se pueden usar zonas adicionales en la plataforma 105 para soportar estructuras secundarias, tal como células solares auxiliares o soporte de convertidores de energía de las olas, y para proporcionar acceso alrededor de la torre de turbina eólica 111. En una realización, las cubiertas 119 están colocadas encima de una o más columnas estabilizantes 102, 103, y la columna estabilizante y las cubiertas 119 están configuradas de tal manera que las crestas de las olas más altas esperadas no lleguen o dañen el equipo de cubierta o las palas de turbina 101. Se pueden montar escaleras y una estructura de acoplamiento de barcos en cualquiera de las columnas 102, 103. La plataforma 105 se puede fijar al fondo del mar por líneas de amarre 131-141 montadas en las partes inferiores de las columnas 102, 103.

Las palas de turbina 101 son largas y de poca anchura con una relación de aspecto muy alta. Las palas de turbina 101 están conectadas en su base a un cubo, un motor y accionadores pueden cambiar el paso de las palas 101. El paso de las palas 101 se puede poner con el fin de optimizar la salida de potencia eléctrica del generador. Esto se puede llevar a cabo regulando el paso de las palas para mantener una velocidad de rotación constante en un rango de velocidades del viento. A velocidades más bajas del viento, el paso de las palas de turbina es inferior de modo que puedan mantener una velocidad rotacional máxima. En contraposición, a velocidades más altas del viento, el paso se aumenta para evitar que la rotación supere la tasa de rotación óptima. Con el fin de detectar la verdadera velocidad del viento, la turbina eólica puede incluir un anemómetro que detecte la velocidad del viento y un controlador puede regular el paso de las palas de turbina 101 al ángulo de paso apropiado en base a la velocidad detectada del viento. Se pueden obtener sistemas comerciales de control del paso de palas de turbina de LTi REEnergy, Alemania, y Bosch Rexroth, Alemania.

La alineación exacta de las palas de turbina 101 en una orientación perpendicular a la dirección del viento da lugar a generación máxima de potencia eléctrica. Para facilitar dicha colocación, la turbina eólica puede incluir un sistema de dirección del viento que incluya, por ejemplo, un sensor de dirección del viento que detecte cualquier desalineación y un sistema de control de guiñada. Se pueden obtener sensores de inclinación comerciales de Pepper+Fuches, Alemania, y MicroStrain, Inc., Estados Unidos. Si el sensor de dirección del viento detecta una desviación angular, el controlador puede accionar un motor de guiñada que gire la góndola, el cubo y las palas de turbina 101. En una realización, las palas de turbina 101 y el cubo están acoplados a una caja de engranajes que aumenta la velocidad rotacional de las palas de turbina 101 a una velocidad adecuada para generar electricidad. La caja de engranajes aumenta la velocidad rotacional de un eje de accionamiento que está acoplado a un generador que produce electricidad. En otra realización, se usa una turbina de accionamiento directo. No hay caja de engranajes y el eje de accionamiento está acoplado directamente al generador, que puede estar en la góndola o en la torre.

La salida eléctrica aumenta por lo general con la velocidad del viento. Sin embargo, se precisa de ordinario una velocidad del viento mínima de aproximadamente 3 metros por segundo para hacer que las palas de turbina giren. Para un generador de turbina eólica típico, la salida de potencia seguirá aumentando con los aumentos de la velocidad del viento hasta aproximadamente 12 metros por segundo, y en un rango de velocidades del viento 6-12 metros por segundo, se regula el paso de las palas de turbina para optimizar la producción de energía eléctrica. A velocidades del viento superiores a 12 metros por segundo, las palas de turbina de un generador de turbina eólica

típico se regulan para controlar la fuerza de elevación y dejar que la turbina gire a su velocidad óptima, manteniendo por lo tanto la salida de potencia máxima. Un generador de turbina de 5 megavatios puede alcanzar una salida de potencia máxima a una velocidad del viento de aproximadamente 12 metros por segundo. A velocidades del viento más altas de entre aproximadamente 12 y 25 metros por segundo, el generador producirá 5 megavatios de energía eléctrica, pero las palas de turbina se giran a un ángulo de paso más alto para reducir las cargas de la fuerza del viento en las palas de turbina y mantener la velocidad de rotación óptima. A velocidades del viento superiores a aproximadamente 25 metros por segundo, el sistema de turbina eólica se puede parar y aparcar. Las palas de turbina se regulan para minimizar las fuerzas del viento y también se pueden bloquear hasta que la velocidad del viento disminuya para evitar la velocidad excesiva y el daño de la turbina eólica.

Aunque la plataforma de turbina eólica flotante se ha ilustrado hasta ahora en una colocación de torre asimétrica, en otras realizaciones la torre está situada simétricamente entre las columnas. Con referencia a las Figs. 7 y 8, se ilustra una plataforma de turbina eólica flotante 106 con la torre 111 situada simétricamente entre las columnas 103. La Fig. 7 ilustra una vista en alzado de la plataforma de turbina eólica flotante 106, y la Fig. 8 ilustra una vista superior de la plataforma de turbina eólica flotante 106. En esta realización, la torre 111 está montada sobre una columna de flotabilidad 104. La columna de flotabilidad puede ser una estructura hueca que proporcione parte o toda la fuerza de flotabilidad requerida para soportar el peso de la torre 111, la góndola 125, la pala de turbina 101 y otros componentes del sistema. Dado que la columna de flotabilidad 104 es en su mayor parte hueca y desplaza un volumen de agua grande, es inestable. Con el fin de estabilizar la plataforma de turbina eólica flotante 106, la columna de flotabilidad 104 está acoplada a tres o más columnas estabilizantes 103 que incluyen un sistema de lastre para estabilizar la torre 111. La plataforma de turbina eólica flotante 106 puede tener vigas de soporte 108 que se extienden entre las columnas estabilizantes 103 y la columna de flotabilidad 104 así como vigas de soporte de arriostrado 112 que se extienden entre las columnas estabilizantes 103 y la columna de flotabilidad 104. Otros detalles estructurales de la plataforma de turbina eólica flotante son los mismos que los descritos anteriormente con referencia a la Fig. 6.

Las plataformas de turbina eólica descritas en el presente documento incluyen una o más planchas horizontales de atrapamiento de agua 107 montadas en las bases de cada una de una o varias columnas de la plataforma. La una o más planchas de atrapamiento de agua 107 están colocadas de tal manera que estén sumergidas. Con referencia a la Fig. 9, la función de la plancha de atrapamiento de agua 107 es proporcionar masa hidrodinámica añadida y amortiguamiento. La cantidad de agua “arrastrada” por una plancha cuadrada con longitud de lado λ que se mueve a lo largo de su dirección normal, es aproximadamente igual a $p\lambda^3$, donde p es la densidad del agua. Una gran cantidad de agua arrastrada también conocida como masa hidrodinámica añadida está asociada por lo tanto con una plancha cuadrada horizontal de dimensiones sustanciales que se mueve verticalmente. Una plancha rectangular con una relación de aspecto grande arrastrará mucha menos agua con relación a su área.

La forma y las dimensiones de la plancha de atrapamiento de agua 107 son tales que produzcan un aumento sustancial de la masa añadida de la plataforma en elevación y momento de inercia añadido en balanceo y cabeceo. Dado que el calado de la plataforma es relativamente poco profundo, de ordinario de 100 pies o menos, no se puede despreciar las fuerzas de excitación de olas en la plancha de atrapamiento de agua. Se deberán realizar cálculos hidrodinámicos para determinar la respuesta de la plataforma, teniendo en cuenta el aumento de masa añadida y las fuerzas de excitación de olas. Se puede usar software comercial de difracción-radiación, tal como WAMIT, para calcular las respuestas de flotabilidad de la plataforma. En un ejemplo hipotético se consideró una plataforma de 15.000 toneladas de desplazamiento que soportaba más de 7.000 toneladas de carga para estos cálculos de respuesta. Sin planchas de atrapamiento de agua, el período natural de la plataforma es de alrededor de 12 segundos, que corresponde a una banda de frecuencia con considerable cantidad de energía durante grandes tormentas. La respuesta resonante resultante produce un inaceptable movimiento de la plataforma, dando lugar a daño de la estructura de la plataforma. Añadiendo la una o más planchas de atrapamiento de agua, que, en una realización, se extienden radialmente hacia fuera aproximadamente de 20 a 30 pies desde la base de una columna, el período de elevación natural de la plataforma se puede ampliar de forma significativa a 20 segundos, lo que da lugar a una respuesta de movimiento aceptable.

Por lo tanto, la una o más planchas de atrapamiento de agua 107 dispuestas en una plataforma descrita en el presente documento pueden proporcionar un aumento sustancial de la masa vertical añadida, minimizando al mismo tiempo el aumento de fuerza de excitación de olas, dando lugar a una beneficiosa reducción del movimiento de la plataforma. Dicho efecto estabilizante es especialmente beneficioso para plataformas pequeñas en las que no se puede obtener un rendimiento adecuado regulando simplemente el tamaño y la separación de las columnas. La colocación de la una o más planchas de atrapamiento de agua 107, tal como la distancia radial de una plancha desde el centro de una columna dada 102, 103, y la configuración de la una o más planchas de atrapamiento de agua 107, tal como el área de plancha total, se puede regular para lograr, por ejemplo, un aumento deseado de la

masa vertical añadida y una reducción o minimización del aumento de la fuerza de excitación de olas.

Debido a su tamaño, una plancha de atrapamiento de agua 107 atrae gran carga hidrodinámica incluyendo masa añadida y efectos de radiación de olas, fuerzas de excitación de olas y efectos viscosos debidos a desprendimiento de los torbellinos desde los bordes de la plancha 107. La plancha 107 debe ser soportada por elementos estructurales adicionales con el fin de resistir la carga de olas extremas, así como el daño por fatiga debido al gran número de ciclos de olas a los que se somete. En una realización, refuerzos radiales 179 se extienden desde las columnas 103 hacia los bordes exteriores de la plancha para soportar la plancha 107. Las vigas principales 115 conectadas a las columnas 103 también proporcionan soporte estructural a la plancha de atrapamiento de agua 107, así como rigidez a la estructura general. Los componentes de refuerzo adicionales de la plancha 107 pueden incluir, por ejemplo, viguetas 181 soportadas por refuerzos radiales 179, trancaniles 177 entre las viguetas 181 y riostras de plancha de atrapamiento de agua 121 montadas entre una columna 102 y los refuerzos 179. Estos elementos estructurales soportan los paneles que forman la plancha de atrapamiento de agua 107. Las planchas de atrapamiento descritas en el presente documento se pueden formar de cualquier material adecuado, tal como acero.

Con el fin de dimensionar adecuadamente los refuerzos de la plancha de atrapamiento de agua, hay que tener en cuenta adecuadamente los varios efectos hidrodinámicos que tienen lugar en la plancha. Estos constan de lo siguiente: inercia del fluido que rodea la plancha de atrapamiento de agua produciendo una fuerza opuesta a la aceleración de la plataforma, en particular en la dirección vertical; olas irradiadas generadas por la plataforma cuando se mueve dando lugar a que salga energía de la plataforma; olas incidentes interactúan con el casco de la plataforma produciendo fuerzas; y efectos viscosos, debidos predominantemente al desprendimiento de los torbellinos por los bordes de la plancha dando lugar también a transferencia de energía desde la plataforma al agua. Todas las fuerzas, a excepción de las fuerzas viscosas, se pueden modelar en base a la teoría de la difracción-radiación que desprecia la viscosidad del fluido, y requieren una solución numérica de la ecuación de Laplace. Los efectos viscosos se determinan a partir de un modelo empírico desarrollado con resultados de experimentos de laboratorio a pequeña escala. Las fuerzas hidrodinámicas pueden ser convertidas a un campo de presión en la porción sumergida de la plataforma, incluyendo la plancha de atrapamiento de agua, y entonces se puede ejecutar un modelo estructural de elementos finitos para determinar esfuerzos en todos elementos estructurales incluyendo los refuerzos y el recubrimiento. Los modelos de elementos finitos requieren la discretización del casco en pequeños elementos en los que se puede aplicar la teoría de la viga y/o la plancha. Se puede obtener una solución numérica proporcionando niveles de esfuerzo en el casco. Entonces se pueden confirmar las dimensiones apropiadas del casco, incluyendo la plancha de atrapamiento de agua. Se describe información adicional acerca de las planchas de atrapamiento de agua en las Patentes de Estados Unidos N.º 7.086.809 y 7.281.881 que se incorporan ambas por la presente en su totalidad por referencia.

Con referencia a la Fig. 10 se representa una vista superior de la plataforma de turbina eólica flotante 105. Con el fin de mantener la plataforma de turbina eólica flotante dentro de una posición deseada, la plataforma 105 se puede anclar al fondo del mar usando líneas de amarre convencionales. Por ejemplo, en una realización, la plataforma de turbina eólica flotante está fijada al fondo del mar con un sistema de amarre asimétrico. En la Fig. 10 se ilustran seis líneas de amarre 131-141. Cuatro líneas de amarre 131-137 están conectadas a la columna 102 que lleva la turbina eólica 125, y líneas de amarre singulares 139-141 están conectadas a cada una de las otras columnas 103. La separación angular de las líneas de amarre 131-141 es aproximadamente 60 grados entre cada línea adyacente. Las líneas 131-141 convergen hacia un punto situado en el centro de la columna 102 que soporta la turbina eólica 125. El viento también producirá tensión en las líneas de amarre a barlovento conectadas a las columnas a barlovento de manera que sea mayor que la tensión en las líneas restantes.

Con referencia a la Fig. 11 se representa una vista superior de la plataforma de turbina eólica flotante 105 que tiene una configuración de amarra alternativa. En esta realización, se usan cuatro líneas de amarre 151-157 para fijar la plataforma en posición. Dos líneas 151, 153 están acopladas a la columna 102 que soporta la torre 111, y los amarres 155, 157 están acoplados a una de las otras columnas 103. En esta realización, las líneas de amarre 151-157 están separadas una de otra un ángulo de aproximadamente 90 grados.

Con referencia a la Fig. 12, se representa una vista en alzado y una realización de una plataforma de turbina eólica flotante 105 como se describe en el presente documento. En la configuración mostrada en la Fig. 12, cada línea de amarre 131-141 está inclinada hacia abajo y hacia fuera de la plataforma de turbina eólica flotante 105 al fondo del mar y fijada y tensada individualmente. Las líneas de amarre 131-141 se pueden tensar de modo que la flotabilidad de las columnas 102, 103 proporcione una tensión igual en cada una de las líneas 131-141 cuando no haya viento. Cuando el viento sople contra la torre 111 y las palas de turbina 101, las fuerzas de la carga del viento serán transferidas a las líneas de amarre 131-141 y las líneas a barlovento que sujetan la estructura contra el viento estarán bajo mayor tensión que las líneas a favor del viento. Las líneas 131-141 se pueden tensar de modo que las

líneas de amarre no descansen en el fondo del mar en ningún momento y de modo que se extiendan en un recorrido sustancialmente recto. En una configuración alternativa, las líneas de amarre se pueden disponer en una configuración asimétrica similar alrededor de la plataforma, pero apretarse solamente a una fuerza de tensión semitensa específica de modo que las líneas se extiendan en un recorrido curvado al fondo del mar. Con un sistema de tensión semitensa, las líneas de amarre no descansan en el fondo del mar en su posición de equilibrio estático sin viento, olas o corriente.

En otra realización, ilustrada en la Fig. 13, la estructura 105 se puede fijar en posición con un sistema de amarre de catenaria con líneas de cadena 402 colocadas en el fondo del mar. Las líneas de amarre pueden incluir cualquier material adecuado, tal como, por ejemplo, cadena de metal, hilo metálico, poliéster o sus combinaciones. En este ejemplo, anclajes de arrastre embebidos de gran potencia de sujeción 401 están colocados en el fondo del mar. Los anclajes 401 están montados en secciones de cadena pesada 402 tendida en el fondo del mar. La orientación horizontal de la cadena 402 ayuda a mantener los anclajes 401 fijados dentro del fondo del mar. La cadena 402 está conectada a una línea de poliéster larga 403 que proporciona la mayor parte de la longitud del amarre. La línea de poliéster 403 proporciona un estiramiento adecuado a la línea de amarre para evitar que los picos de tensión alta sean transmitidos desde la plataforma 105 al anclaje 401. La línea de poliéster 403 está acoplada a otro tramo de cadena 405 que está montado en la plataforma 105. La línea de poliéster 403 permanece suspendida en el agua y nunca entra en contacto con el fondo del mar después de la instalación. Se pueden colocar lastres de aglomerado 404 en la unión entre la cadena 405 y la línea de poliéster 403 una curva más pronunciada en el amarre para reducir adicionalmente los picos de tensión y asegurar que la línea 403 tire horizontalmente del anclaje 401. Los lastres de aglomerado 404 suelen estar compuestos por materiales densos, tal como acero y hormigón, y se montan en las partes inferiores de las cadenas superiores 405. El peso del lastre de aglomerado 404 en agua es significativamente mayor que el peso de la cadena 405 en la que está montado.

Las cadenas 405 pueden pasar a través de las columnas 102, 103 a dispositivos tensores 407 que permiten regular individualmente las tensiones de la línea de amarre. Los dispositivos tensores 407 pueden ser, por ejemplo, gatos de polea de cadenas, molinetes, chigres u otros dispositivos tensores que se monten encima, a lo largo o dentro de las columnas 102, 103. Con el fin de evitar el daño por desgaste, se pueden colocar guías o zapatas de curvado 406 en las bases de las columnas 102, 103 que permitan el paso de las líneas de amarre a través de las planchas de atrapamiento de agua 107. Después de establecer la tensión adecuadamente, las líneas de amarre se pueden bloquear.

La turbina eólica está diseñada típicamente para operar en un rango normal de velocidades y direcciones del viento. El viento que sople contra las palas de turbina 101 y la torre 111 creará una fuerza de resistencia que tenderá a hacer que la plataforma de turbina eólica flotante 105 se incline alejándose de la dirección del viento. Si el viento entra por entre las columnas 102 sobre la columna 103, en la dirección representada en la Fig. 15, el par producido por las palas de turbina 101 y la torre 111 tenderá a empujar la columna a favor del viento 102 al agua y a elevar las columnas contra el viento 103 sacándolas del agua. Dado que el viento no siempre sopla en la misma dirección, como ya se ha descrito en el presente documento, la turbina eólica puede estar equipada con un mecanismo de guiñada que permita a la góndola 125, el cubo y las palas 101 girar alrededor de la parte superior de la torre 111 a alineación con el viento. Sin embargo, cuando cambie la dirección del viento, también cambiará la dirección el que se incline la torre 111. La línea horizontal 161 en la Fig. 12 en las columnas 102, 103 indica la línea de agua de flotación deseada. Cuando la velocidad y la dirección del viento cambian, la turbina eólica puede utilizar un sistema de lastre activo interno para contrarrestar las fuerzas y los momentos inducidos por el viento y mantener la estructura 105 en la línea de agua de flotación diseñada 161 en todas las condiciones operativas constantes.

Por lo tanto, una plataforma de turbina eólica como se describe en el presente documento puede incluir un sistema de lastre activo interno. Un ejemplo de dicho sistema se describe e ilustra con referencia a la Fig. 14. En dicha realización, las columnas 102, 103 son huecas y alojan un sistema de lastre activo 201 que transfiere agua entre los depósitos dentro de las columnas 102, 103 para mantener la plataforma 105 en una alineación vertical para óptima eficiencia de conversión de energía. Por ejemplo, cuando el viento sopla hacia la columna de torre 102, un sensor 127 puede detectar la rotación de la turbina eólica. El sensor 127 está acoplado a un controlador 123 que controla las bombas 221 para quitar agua de la columna de torre 102 con el fin de aumentar la flotabilidad y añadir agua a las otras columnas 103 para aumentar su peso. En una realización, puede haber múltiples bombas en cada columna que controlen un recorrido de agua independiente a las otras columnas. Se pueden obtener bombas de agua de flujo axial industriales en Huyundai, Corea del Sur, y Glynwed AS, Dinamarca.

El controlador también puede ajustar los volúmenes de agua en las columnas 103 que no soportan la torre de turbina 111 para regular el ángulo lado a lado de la turbina eólica. En una realización, las columnas tienen sensores 225 que detectan el volumen de agua, representado en la Fig. 14 por las diferentes profundidades del agua 203 en cada una

de las columnas 102, 103. El movimiento activo del lastre de agua entre las columnas 102, 103 compensa las fuerzas del viento inducidas para mantener la plataforma nivelada. Dado que hay que bombear una cantidad sustancial de agua entre las columnas 102, 103, el tiempo de respuesta del sistema de lastre activo interno puede ser entre aproximadamente 15 y 30 minutos. Dado que el tiempo de respuesta puede ser bastante lento, el sistema de lastre activo no se diseñará típicamente para eliminar los rápidos movimientos dinámicos de la estructura 105 debidos a las olas y otras fuerzas de acción rápida. Sin embargo, la plataforma está diseñada para resistir estas fuerzas sin el beneficio del sistema de lastre. El sistema de lastre activo está diseñado para mantener horizontal la posición media de la plataforma y maximizar la producción de energía manteniendo vertical la turbina todo lo posible.

En una realización, el sistema de lastre activo puede ser un sistema en bucle cerrado configurado para evitar la posible inundación y el hundimiento de la plataforma de turbina eólica flotante 105 aislando completamente el agua en el sistema de lastre del agua del mar circundante. El sistema de lastre activo mueve el agua contenida entre las columnas 102, 103 por bombas de agua eléctricas 221 que hacen que el agua fluya a través de las vigas principales 115 montadas entre cada una de las columnas 102, 103. En tal realización, el agua del mar circundante nunca puede entrar en el sistema de lastre activo. El agua del sistema de lastre activo puede ser agua dulce añadida en el muelle antes del arrastre, o usando un barco de suministro, para mitigar los problemas de corrosión y otros relacionados con el agua del mar.

En una realización, el sensor de alineación 127 incluye giroscopios montados a lo largo del eje X y el eje Y. Los giroscopios envían una señal que representa la tasa de rotación angular que puede ser en unidades de grados por segundo. Una integración de la tasa de rotación angular producirá una posición angular. Por lo tanto, los giroscopios en el sensor de alineación 127 pueden ser usados para medir la variación de la alineación de la plataforma y la torre. El giroscopio de eje X está en el plano horizontal y se puede alinear con la línea central de la plataforma de turbina eólica flotante. El acelerómetro de eje Y también está en el plano horizontal, pero perpendicular al giroscopio de eje X. El ángulo de asiento θ es el ángulo a la estructura alrededor del eje Y y el ángulo de inclinación φ es el ángulo de la estructura alrededor del eje X. Cuando la estructura esté perfectamente alineada, el giroscopio de eje X e Y no detectará ninguna aceleración. Sin embargo, si la estructura se inclina en cualquier dirección, el giroscopio de eje X detectará rotación de asiento y el giroscopio de eje Y detectará la rotación de inclinación. En base a esta información, el ángulo de rotación puede ser calculado usando ecuaciones matemáticas conocidas.

Con referencia a las Figs. 15-17, se ilustra un ejemplo de cómo puede reaccionar el sistema de lastre activo a variaciones de la velocidad del viento. En base a las señales del sensor de alineación, el controlador de lastre puede controlar las bombas para regular el volumen de agua 191 dentro de cada una de las columnas 102, 103 para corregir la desviación angular de la alineación vertical. Cuando la plataforma 105 esté dentro del ángulo horizontal aceptable, el sistema de lastre dejará de mover agua entre las columnas 102, 103.

En la Fig. 15, la plataforma de turbina eólica flotante 105 se ilustra en una alineación vertical con el viento soplando sobre la línea central de la plataforma 105. El volumen de agua 191 dentro de los cilindros 102, 103 se ha regulado adecuadamente para el viento, la velocidad actual del viento y dirección del viento. En la Fig. 16, la velocidad del viento ha aumentado y la mayor fuerza del viento ha hecho que la plataforma de turbina eólica flotante 105 gire en cabeceo. El sensor de alineación detecta la rotación de asiento, y el controlador acciona las bombas para mover agua de la columna de soporte de torre 102 a las otras columnas 103. En la Fig. 17, la plataforma de turbina eólica flotante 105 ha vuelto a una alineación horizontal para compensar la fuerza inducida por la mayor velocidad del viento. Dado que hay menos volumen de agua 191 en la columna de soporte de torre 102, hay más flotabilidad en el extremo de torre de la plataforma 105. A la inversa, el mayor volumen de agua 191 en las otras columnas 103 facilita más el giro de la plataforma 105 en asiento a una alineación vertical.

El sistema de lastre activo también regulará el agua en las columnas 102, 103 cuando el viento haya cambiado. Con referencia a las Figs. 18-20, la plataforma de turbina eólica flotante 105 se ilustra con el viento soplando con un cambio de 90 grados de la dirección del viento en la línea central de la plataforma, entrando el viento por el lado izquierdo de la plataforma 105. El sistema de lastre activo ha movido agua de la columna depósito derecha 191 a la columna depósito izquierda 191 y la plataforma 105 es sustancialmente horizontal. Con referencia a la Fig. 19, la velocidad del viento ha disminuido y la plataforma 105 ha cambiado en su ángulo de inclinación. El sensor de alineación detecta el ángulo de inclinación de la plataforma 105 y el controlador ordena a las bombas 221 que muevan agua de la columna depósito izquierda 191 a la columna depósito derecha 191. Con referencia a la Fig. 20, el sistema de lastre activo ha movido agua de la columna depósito izquierda 191 para aumentar la flotabilidad y añadido más agua a la columna depósito derecha 191 para aumentar el peso de la columna. La plataforma 105 está de nuevo horizontal y las bombas han parado hasta que el sensor de alineación detecte otro cambio en la alineación de la plataforma.

Las plataformas de turbina eólica flotantes descritas en el presente documento tienen diferentes modos de operación basados en las condiciones ambientales. La plataforma puede estar permanentemente amarrada usando un sistema de fijación hecho de un gato de polea de cadenas, secciones de cadena e hilo metálico, y un anclaje. En tal realización, la plataforma de turbina eólica flotante no se moverá ni desconectará de los amarres en caso de condiciones meteorológicas extremas. La finalidad principal de la plataforma de turbina eólica flotante es generar electricidad, por lo tanto, puede estar diseñada para maximizar la cantidad de tiempo que la turbina esté operativa.

Dado que las turbinas existentes dejan de operar a una velocidad del viento de 25 m/s, es deseable que los movimientos inducidos por las olas típicos de velocidades más altas del viento no interfieran con este límite operativo. Es decir, con referencia a la Fig. 6, cuando la estructura se mueve debido a las fuerzas de las olas, la torre 111 gira en asiento, lo que hace que la parte superior de la torre 111 se mueva horizontalmente y produce variaciones en el viento aparente contra las palas de turbina. Si la estructura 105 gira al viento, la parte superior de la torre 111 detectará una velocidad más rápida del viento y, a la inversa, si la estructura 105 gira alejándose del viento, la parte superior de la torre 111 detectará una velocidad menor del viento. La plataforma de turbina eólica descrita en el presente documento reduce el movimiento de balanceo utilizando planchas de atrapamiento de agua 107 fijadas a las partes inferiores de las columnas 102, 103, que resisten el movimiento vertical y amortiguan los movimientos de balanceo y cabeceo de la plataforma 105.

Por lo general, hay tres regímenes de pala de turbina separados para la turbina eólica delineados por la velocidad del viento. En el primer régimen a velocidades del viento inferiores a 12 metros por segundo, las palas son optimizadas para maximizar la producción de electricidad. En el segundo régimen a velocidades del viento de entre 12 y 25 metros por segundo, las palas se giran activamente (en cabeceo) para reducir la carga en las palas y mantener una velocidad rotacional óptima constante. En el tercer régimen a velocidades del viento de más de 25 metros por segundo, toda la turbina eólica se bloquea, en un modo de "supervivencia". En las condiciones de bloqueo, las palas de turbina se pueden parar completamente y el ángulo de pala se cambia a una condición de mínima resistencia al arrastre con relación al viento. Dado que la velocidad y la dirección del viento pueden cambiar muy rápidamente, el tercer régimen puede tener lugar muy rápidamente. Por lo tanto, la turbina eólica debe ser capaz de detectar rápida y exactamente las variaciones del viento y de responder a ellas.

Además de los procedimientos de parada con fuerte viento, otras condiciones pueden activar una parada de emergencia (ESD) destinada a conservar la plataforma de turbina eólica flotante y a minimizar la pérdida de equipo. Dado que la plataforma no está atendida por lo general, ambos procedimientos de parada automatizado y remoto deben tener lugar in situ. Diversas condiciones de fallo del sistema o de error activarán la ESD. Por ejemplo, un fallo del sistema de lastre activo puede ser detectado por una inclinación media grande y/o por ángulos de asiento que no disminuyen y/o un requisito de potencia anormal de las bombas. Otro fallo del sistema puede ser producido por una fuga de agua en una columna. Este fallo puede ser detectado por una inclinación o asiento de la plataforma hacia la columna con fuga, que no puede ser compensado por el funcionamiento del sistema de lastre activo. El sistema también se deberá parar si las palas de turbina se someten a esfuerzos superiores a un nivel umbral. Este fallo puede ser detectado por extensímetros montados en las palas. Otro fallo es la incapacidad de la góndola de girar las palas de turbina al viento. Esto puede ser indicado por una discrepancia entre la dirección medida del viento y el rumbo de la góndola. El sistema también se puede parar cuando haya fallos de potencia o una pérdida de comunicación entre la plataforma de turbina eólica flotante y el operador remoto.

Las plataformas de turbina eólica descritas en el presente documento están diseñadas para ser fabricadas, instaladas y puestas en funcionamiento/cierre de forma económica. Por ejemplo, con el fin de minimizar los costes de construcción, la estructura puede ser diseñada para minimizar la soldadura en el astillero de montaje proporcionando grandes secciones cilíndricas premontadas de las columnas, que se pueden fabricar eficientemente en un taller usando máquinas de soldar automáticas. La fabricación se puede completar cerca de una vía de agua que sea suficientemente profunda para poder arrastrar la plataforma de turbina eólica flotante. La torre, la góndola y la turbina se pueden instalar en un muelle en una instalación que tenga una grúa grande. Instalando todos los componentes en muelle, hay menos coste y menos riesgo de daño en comparación con la colocación de la torre y la turbina sobre una plataforma flotante en aguas abiertas.

Las Figs. 21-23 ilustran un procedimiento para arrastrar la plataforma de turbina eólica flotante 105 al lugar de instalación desde el lugar de fabricación. Con referencia a la Fig. 21, la torre 111, la góndola 125 y las palas de turbina 101 se montan completamente con la plataforma 105 en un muelle durante la fabricación, y una vez terminada, la plataforma 105 es arrastrada al lugar de instalación con un remolcador. Dado que la mayor parte de los astilleros tienen un canal de agua bastante poco profundo, el lastre de agua se puede quitar de las columnas 102, 103 de modo que la plataforma 105 asuma un calado de tránsito mínimo. La plataforma de turbina eólica flotante 105 es estable en su calado de tránsito. Dado que hay más peso soportado por la columna de torre 102, este lado de la

plataforma 105 tendrá normalmente un calado más profundo, lo que puede ser problemático si el canal de agua del lugar de montaje es poco profundo.

Con referencia a la Fig. 22, cuando sea necesario, con el fin de corregir el calado más profundo de la columna de torre 102, se puede montar un módulo de flotabilidad temporal 291 en la columna de torre 102, de modo que cada una de las columnas 102, 103 tenga el mismo calado mínimo. En otras realizaciones, se puede montar módulos de flotabilidad temporales en las otras columnas 103 para reducir más el calado si hay que flotar la plataforma 105 a través de un canal poco profundo.

Con referencia a la Fig. 23, una vez que la plataforma 105 está en aguas más profundas, el módulo de flotabilidad ya no es necesario y se puede quitar. Las columnas se lastran entonces con agua hasta un calado uniforme deseado, tal como, por ejemplo, un calado de aproximadamente 50 pies (15 m). Aunque el calado más profundo aumentará la resistencia hidrodinámica al arrastre, la plataforma 105 es mucho más estable con el lastre de agua.

La ruta de tránsito desde el lugar de fabricación al lugar de instalación deberá ser lo más corta posible. Por lo tanto, la posición del lugar de fabricación puede ser específica del proyecto. Esto es especialmente importante cuando se esté construyendo un gran parque eólico en alta mar incluyendo múltiples unidades de turbina eólica flotantes y cada casco tenga que ser arrastrado una larga distancia al lugar del parque eólico. La selección de un buque de instalación adecuado también es fundamental para la economía del proyecto de parque eólico. El buque usado para arrastrar la turbina eólica también deberá ser capaz de realizar la instalación del amarre y operaciones de mantenimiento.

El montaje en muelle tiene muchas ventajas sobre los sistemas que requieren el montaje en el lugar de instalación. Más específicamente, los cimientos contra el viento fijos en alta mar que se montan directamente en el fondo del mar requieren que la estructura de turbina sea instalada y mantenida en el lugar de instalación en alta mar, lo que puede ser difícil y costoso. Dado que es muy costosa de desmontar, sustancialmente todas las reparaciones deben ser efectuadas en el lugar de instalación en alta mar. En contraposición, la configuración de la plataforma flotante solamente requiere desplegar y conectar las líneas de amarre a la plataforma 105. En el caso de un fallo inesperado de la turbina eólica, la secuencia de instalación se puede invertir, y la plataforma 105 puede ser arrastrada de nuevo a puerto para repararla.

La plataforma de turbina eólica flotante también simplifica la fase de puesta en servicio en alta mar. El sistema de amarre tiene que estar colocado previamente y preparado para conexión cuando la plataforma de turbina eólica flotante sea arrastrada al lugar. La turbina eólica puede ser amarrada por un buque de amarre. Los procedimientos de amarre pueden incluir la recuperación de los cables portadores montados en las líneas de amarre de la plataforma y tirar de la sección de cadena de la línea de amarre. La conexión de la cadena a la sección de hilo metálico de la línea se puede hacer encima del agua. La tensión de las líneas de amarre se puede hacer desde la plataforma con gatos de polea de cadenas. Dado que la turbina ya está instalada, el procedimiento implicado en poner en marcha la turbina eólica también es mucho más simple y menos caro que una turbina eólica que tenga que montarse in situ.

Dado que la plataforma de turbina eólica flotante es una estructura dinámicamente móvil, es importante minimizar las fuerzas de carga aplicadas a los cables de potencia que conectan los generadores eléctricos a la estación de potencia. Una vez que la plataforma de turbina eólica flotante esté amarrada adecuadamente, el cable de potencia previamente instalado en la costa puede ser conectado a la plataforma de turbina eólica flotante. Con referencia a la Fig. 13, en una realización, un cable de potencia 501 está acoplado al cuadro de conmutación eléctrico en la plataforma 105. El cable se extiende a lo largo de la columna 102 en un alojamiento protector y sale cerca de la parte inferior de la columna 102. El mecanismo de conmutación también puede ser movido desde la torre 111 a la cubierta 119. En este caso, el cable de potencia bajará por la columna 103. El cable submarino 501 tiene que ser estable y estar protegido con cubierta tal como una envuelta y/o zanja para evitar el daño. Más bien que llevar el cable 501 directamente al fondo del mar, el cable 501 puede estar rodeado por una pluralidad de mecanismos de flotabilidad 505 en una porción del cable 501 adyacente y debajo de la porción más baja de la plataforma 105. Esta porción del cable deberá estar a suficiente profundidad en el agua para evitar cualquier contacto potencial con barcos que naveguen por la zona. Aunque la plataforma 105 está fijada con líneas de amarre, puede no estar absolutamente fija en posición. La plataforma se puede mover en respuesta a varias fuerzas externas, incluyendo fuertes vientos, fuerte corriente y subidas/bajadas de las mareas. Los mecanismos intermedios de flotabilidad en olas 505 permiten que el cable 501 y la plataforma 105 se muevan sin daño del cable 501. El cable 501 se extiende desde los mecanismos intermedios de flotabilidad en olas 505 al fondo del mar y puede estar enterrado en el fondo del mar o se puede colocar una(s) envuelta(s) protectora(s) alrededor del cable 501.

En una realización se puede disponer una pluralidad de plataformas de turbina eólica flotantes en serie. Con referencia a la Fig. 24, se ilustra una disposición ejemplar de plataformas de turbina eólica flotantes asimétricas 105 en un "parque eólico". Dado que la velocidad del viento se reduce y hace turbulenta cuando fluye a través de una turbina eólica, en una realización, las turbinas eólicas están separadas un radio 355 de aproximadamente 10 diámetros del rotor de turbina eólica o más y dispuestas en múltiples líneas decaladas 329, 331, 333 que son perpendiculares a la dirección más frecuente del viento 335. En la realización ilustrada, las turbinas eólicas 105 están igualmente separadas de seis turbinas eólicas adyacentes 105 10 diámetros de turbina. A causa de la configuración decalada, el viento que sople entre dos plataformas de turbina eólica flotantes 105 en la primera fila 329 tendrá un recorrido libre a las plataformas de turbina eólica flotantes 105 en la segunda fila 331. Este recorrido del viento estará libre, aunque la dirección del viento cambie hasta 30 grados alejándose de la dirección preferida. La plataforma de turbina eólica flotante 105 en la tercera fila 333 puede estar en línea con las plataformas de turbina eólica flotantes 105 de la primera fila 329, sin embargo, dado que hay una separación de aproximadamente 17 diámetros del rotor de turbina, la pérdida de potencia debida a turbulencia del viento ascendente es despreciable. Aunque la dirección del viento se desplace a un ángulo que alinee las plataformas de turbina eólica flotantes adyacentes 105, una separación de 10 diámetros de rotor solamente tendrá un efecto mínimo en la salida de potencia.

Con el fin de minimizar los cables de potencia eléctrica usados por las plataformas de turbina eólica flotantes 105, un primer cable 341 acopla las plataformas de turbina eólica flotantes 105 en la primera fila 329, un segundo cable 343 acopla las plataformas de turbina eólica flotantes 105 en la segunda fila 331 y un tercer cable 345 acopla las plataformas de turbina eólica flotantes 105 en la tercera fila. Los tres cables 341, 343, 345 se conectan entonces a un cuarto cable 347 que transfiere toda la potencia eléctrica a una estación de potencia 351, que distribuye la potencia eléctrica según sea necesario. En una realización, una de las plataformas 349 puede ser usada como una unidad de distribución de potencia y ser el puesto de la tripulación y mantenimiento. Esto puede proporcionar una zona protegida segura donde los operarios puedan vivir temporalmente y estar protegidos contra las severas condiciones medioambientales.

En otra realización, los cables individuales procedentes de cada turbina están acoplados a una caja de unión en el fondo del mar. Puede haber un cierto número de conexiones por caja de unión. Los cables más grandes de todas las cajas de conexión están acoplados a un cubo principal, que está conectado a la costa usando una sola línea de potencia. Se pueden añadir cables redundantes en caso de fallo a la infraestructura de la red de potencia.

En algunas realizaciones específicas, una diferencia entre las plataformas de turbina eólica descritas en el presente documento y las conocidas en la técnica es la configuración asimétrica de la torre de turbina que está montada directamente sobre una de las columnas. Esta configuración mantiene la mayor parte de la masa de la turbina eólica en los bordes exteriores de la estructura más bien que en el centro de la estructura. Por ejemplo, la estructura de turbina eólica "Force Technology WindSea" ilustrada en la Fig. 4, tiene tres torres y palas de turbina que están montadas en un cilindro diferente. Como se ha explicado anteriormente, es bien conocido que la eficiencia de la turbina eólica se reduce cuando hay turbulencia producida por otras palas de turbina poco espaciadas. La turbulencia y el flujo de aire no uniforme también pueden inducir vibración en el sistema de turbina eólica, lo que puede evitar la operación normal de las turbinas eólicas. La plataforma de turbina eólica asimétrica descrita en el presente documento evita estos problemas utilizando una configuración torre única y palas de turbina. Otro sistema de turbina eólica flotante de la técnica anterior es el "Tri-Floater", ilustrado en la Fig. 5, que ilustra una torre montada en el centro de tres columnas. Con el fin de soportar este peso, se precisa una cantidad sustancial de material en el centro de la estructura. Esto aumenta el tiempo de fabricación, el coste y el material requerido para producir este diseño de plataforma de turbina eólica flotante y aumenta el peso en el centro de la estructura. Colocando gran parte de la masa en el centro más bien que en los bordes exteriores, se precisa menos fuerza inercial para hacer que la plataforma de turbina eólica flotante se balancee. En contraposición, la plataforma de turbina eólica flotante a simétrica descrita en el presente documento simplifica la construcción montando todos los componentes de turbina eólica sobre una de las columnas de modo que no se precisen estructuras de soporte adicionales. Además, moviendo la masa hacia fuera en tal realización, se mejora la estabilidad inercial.

Una sola torre montada sobre una de las columnas en las plataformas de turbina eólica descritas en el presente documento da lugar a carga asimétrica de la plataforma, puesto que la contribución de fuerza dominante, que en la mayoría de las condiciones procederá de la turbina eólica, es aplicada a la columna correspondiente, en contraposición a cerca del centro de masa de la plataforma. Un sistema de amarre asimétrico puede ser usado con estas plataformas de carga asimétrica, donde el número de líneas de amarre conectadas a la columna con la torre es sustancialmente mayor que el número de líneas conectadas a las otras columnas.

A medida que ha mejorado la tecnología de las turbinas eólicas, el tamaño de la turbina eólica ha aumentado. En

una realización, una plataforma de turbina eólica como se describe en el presente documento está destinada a soportar un rotor de turbina eólica de 400 pies de diámetro que mueve un generador eléctrico de 5 megavatios. Los pesos estimados de los componentes para dicha turbina eólica se exponen a continuación en la tabla 1.

TABLA 1

Componente	Masa en toneladas cortas	Masa en toneladas métricas
Rotor	120	130
Góndola	250	280
Torre	380	420
Columnas	2500	2800
Agua de lastre	4000	4500

Los tamaños estimados de los componentes de una plataforma de turbina eólica que soporta un generador eléctrico de 5 megavatios se exponen a continuación en la Tabla 2. En otras realizaciones, los pesos y los tamaños de los componentes de la plataforma de turbina eólica flotante pueden ser sustancialmente diferentes de los valores indicados en las Tablas 1 y 2.

TABLA 2

Componente	Dimensión en pies	Dimensión en metros
Diámetro de la torre	26.25	8
Altura de la torre	300	91
Diámetro del rotor	400	126
Espacio entre la columna y la pala de turbina	16.4	5
Distancia entre centros de columna	200	61
Anchura de la plancha de atrapamiento de agua	70	21
Diámetro de la columna	30	9
Altura de la columna	100	30
Profundidad de calado debajo de la línea de agua en instalación	65	20
Profundidad de calado debajo de la línea de agua del muelle	20	6

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de control de lastre para una plataforma de turbina eólica flotante (105) que tiene una pluralidad de columnas estabilizadoras (102, 103), teniendo cada columna estabilizadora un volumen interno para contener un lastre (191), y una torre (111) con un rotor de turbina unido, estando la torre montada en alineación vertical sobre una de las columnas, estando el sistema de control de lastre **caracterizado por**:

un sensor (127) que está configurado para detectar una rotación de la torre; y
un controlador (123), acoplado al sensor, que está configurado para dirigir una transferencia del lastre de un volumen interno de una de las columnas a un volumen interno de al menos una de las otras columnas, tras detectar el sensor la rotación de la torre.

2. El sistema de control de lastre de la reivindicación 1, donde el sistema de control de lastre es un sistema en bucle cerrado.

3. El sistema de control de lastre de la reivindicación 1, donde el sensor incluye una pluralidad de giroscopios.

4. El sistema de control de lastre de la reivindicación 3, donde el giroscopio incluye

un giroscopio de eje x montado en la dirección del eje x, estando configurado el giroscopio de eje x para detectar una rotación de asiento (cabeceo), y
un giroscopio de eje y montado en la dirección del eje y, estando configurado el giroscopio de eje y para detectar una rotación de inclinación (balanceo).

5. El sistema de control de lastre de la reivindicación 4, donde

los giroscopios están configurados para emitir una señal que representa una velocidad angular de rotación, y
el controlador está configurado para convertir la velocidad angular de rotación en una posición angular de la torre.

6. El sistema de control de lastre de la reivindicación 1, donde el sensor incluye una pluralidad de acelerómetros.

7. Un procedimiento para ajustar una alineación vertical de una plataforma de turbina eólica flotante (105) que tiene una pluralidad de columnas estabilizadoras (102, 103), teniendo cada columna estabilizadora un volumen interno para contener un lastre (191), y una torre (111) con un rotor de turbina unido, estando la torre montada en alineación vertical sobre una de las columnas, estando el método caracterizado por:

detectar, con un sensor (127), una rotación de la torre; y
transferir el lastre de un volumen interno de una de las columnas a un volumen interno de al menos una de las otras columnas, en el momento de la detección.

8. El procedimiento de la reivindicación 7, donde el lastre está en un sistema de bucle cerrado.

9. El procedimiento de la reivindicación 7, donde la detección de la rotación incluye

detectar una rotación de asiento (cabeceo), y
detectar una rotación de inclinación (balanceo).

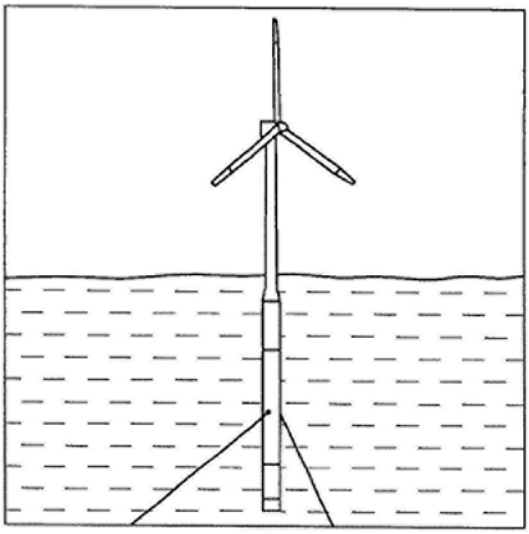

FIG. 1
(TÉCNICA ANTERIOR)

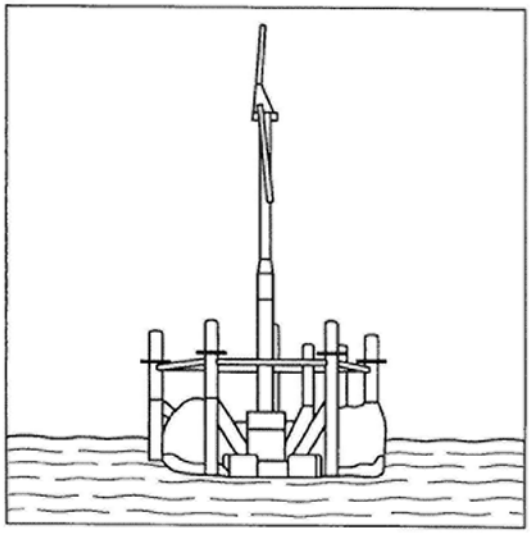

FIG. 2
(TÉCNICA ANTERIOR)

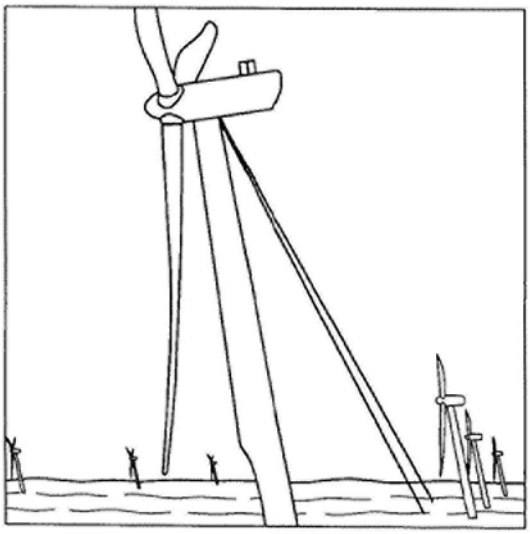

FIG. 3
(TÉCNICA ANTERIOR)

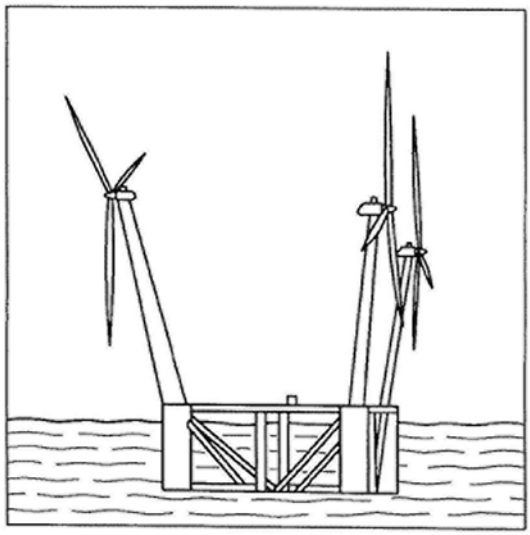

FIG. 4
(TÉCNICA ANTERIOR)

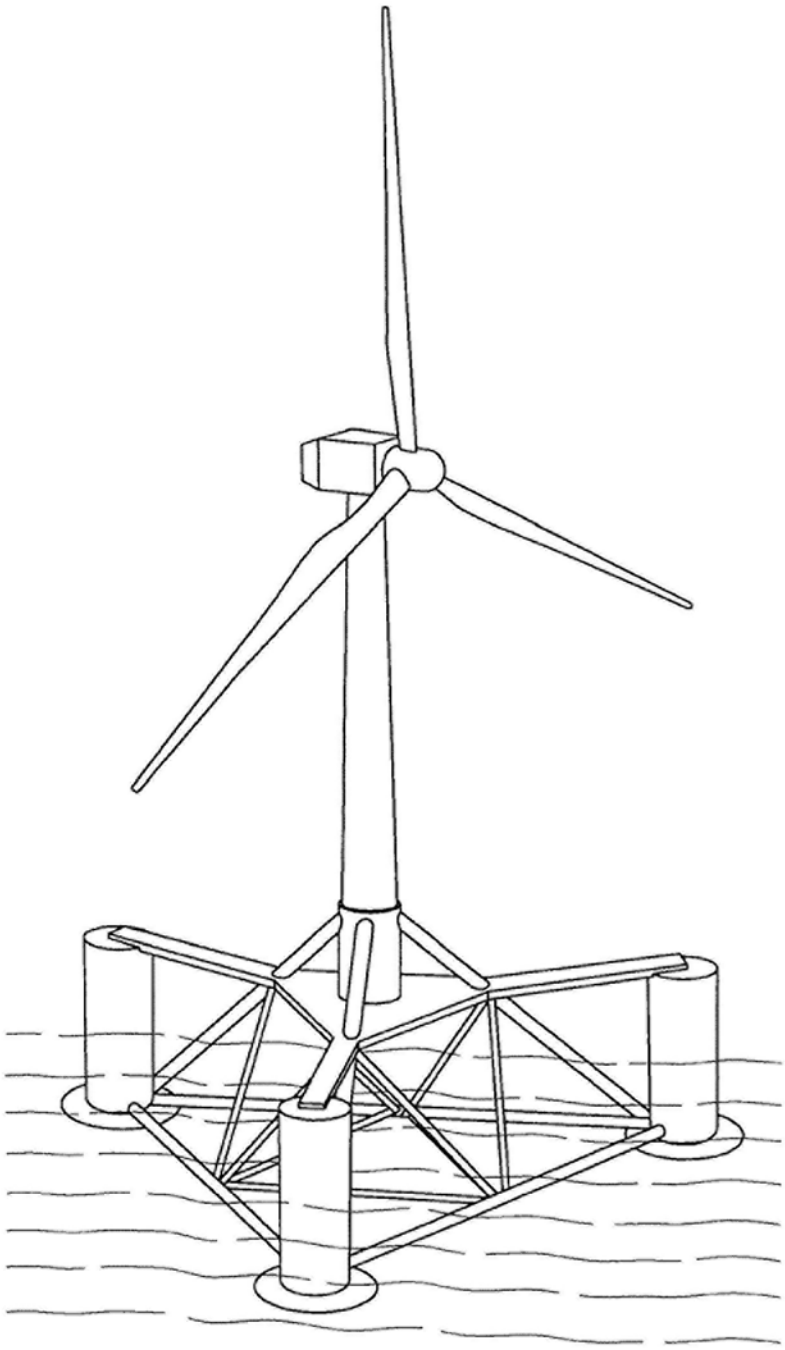

FIG. 5
(TÉCNICA ANTERIOR)

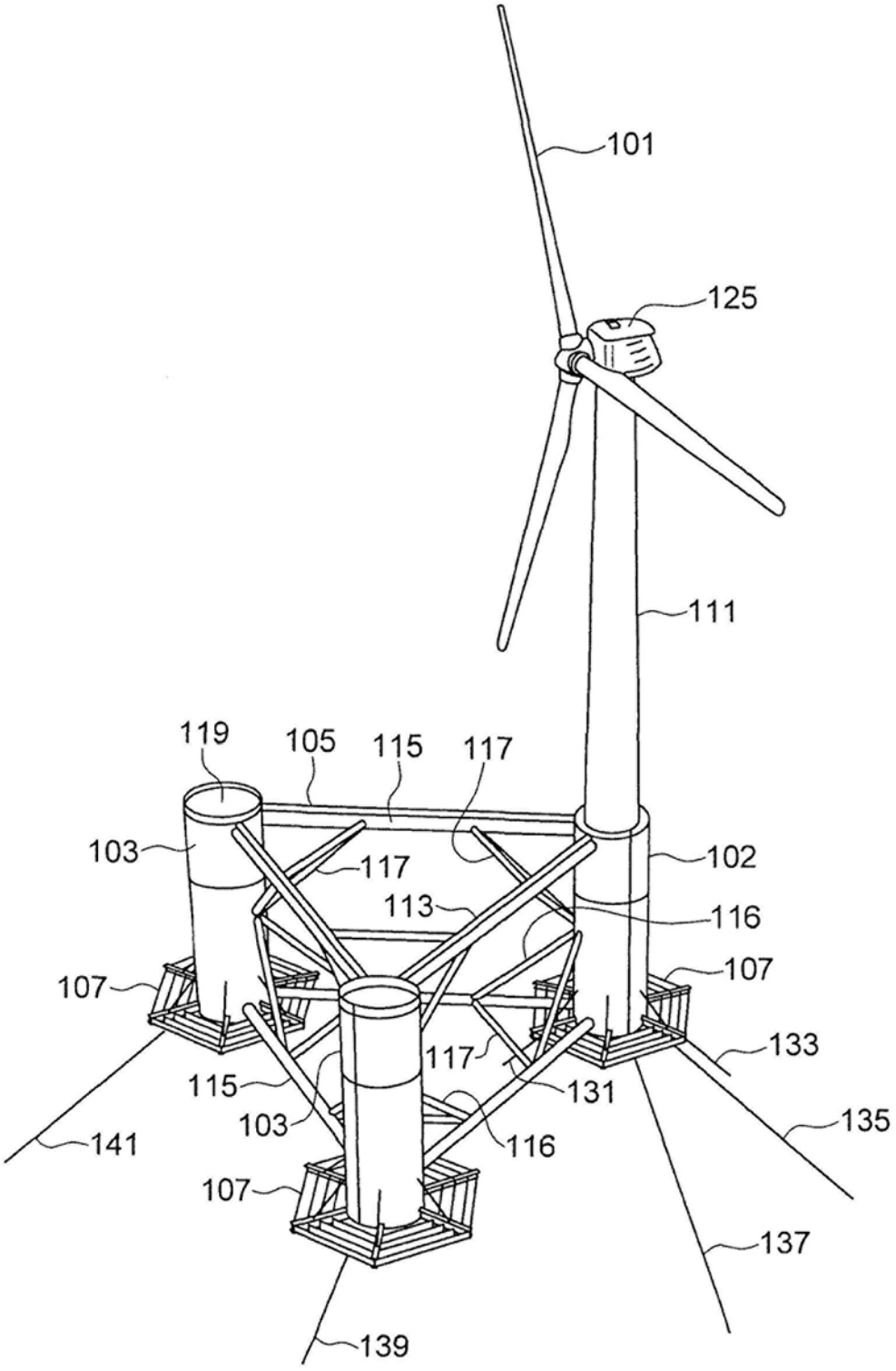
101
125
111
119
105
115
117
103
117
102
113
116
107
107
133
117
115
131
135
103
141
116
107
137
139

FIG. 6

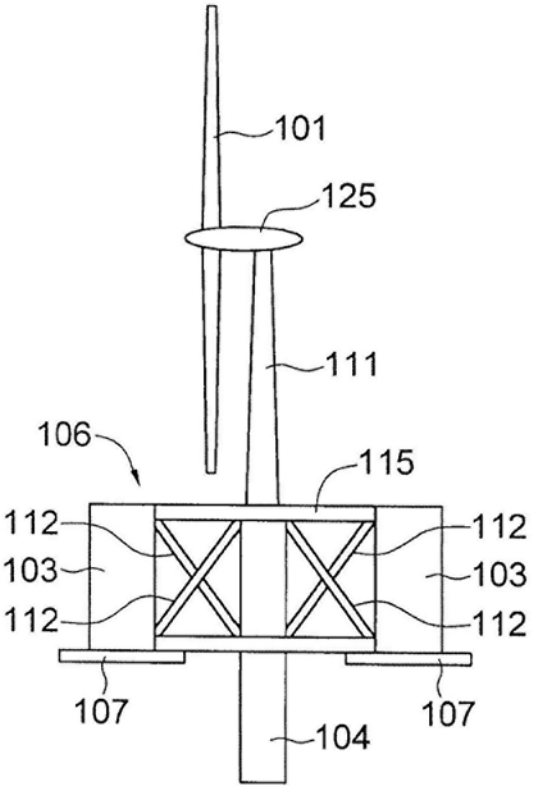
101
125
111
106
115
112
103
112
112
103
112
107
107
104

FIG. 7

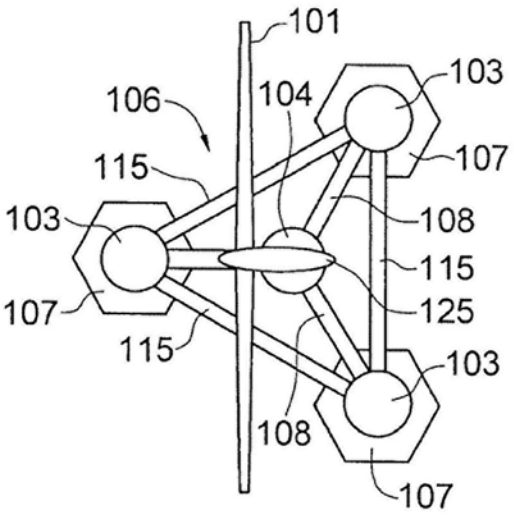
101
106
104
103
115
107
103
108
115
107
125
115
103
108
107

FIG. 8

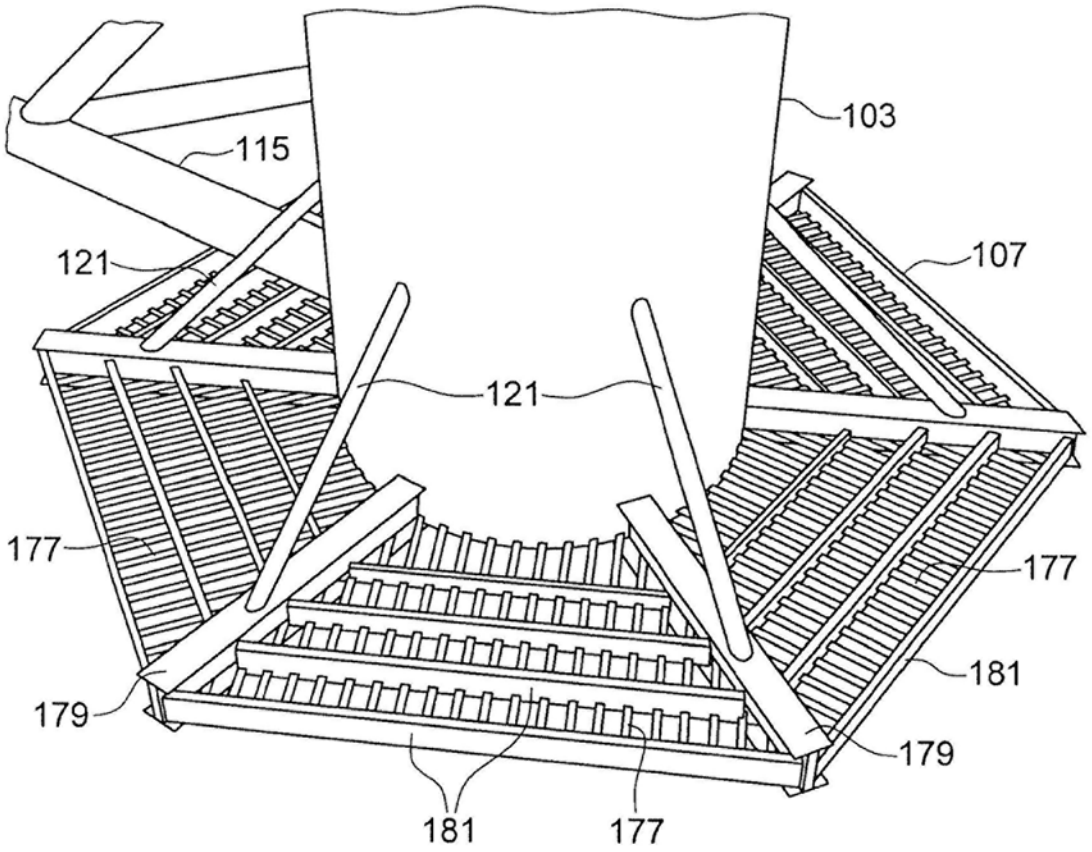

FIG. 9

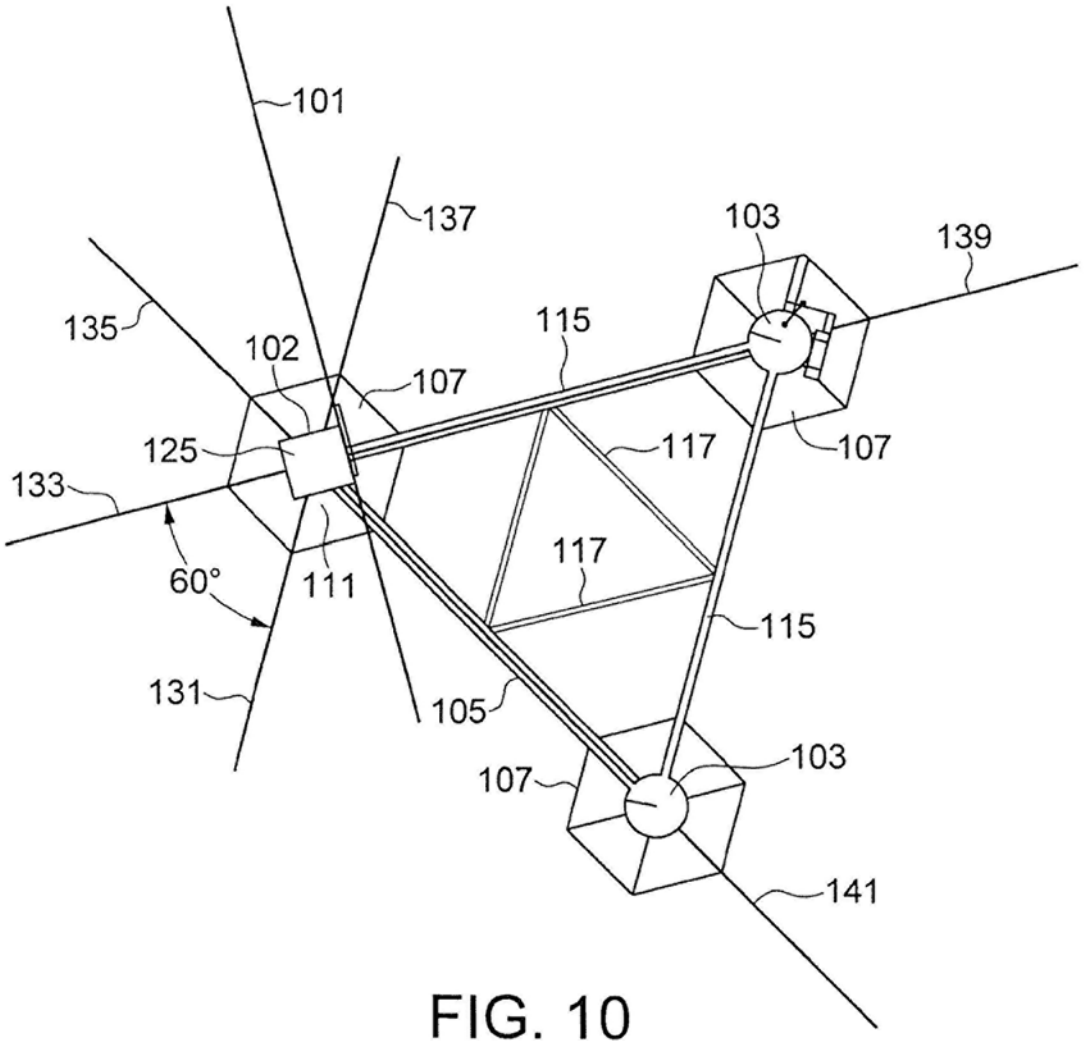
101
137
103
139
135
115
102
107
125
117
107
133
117
60°
111
115
131
105
103
107
141

FIG. 10

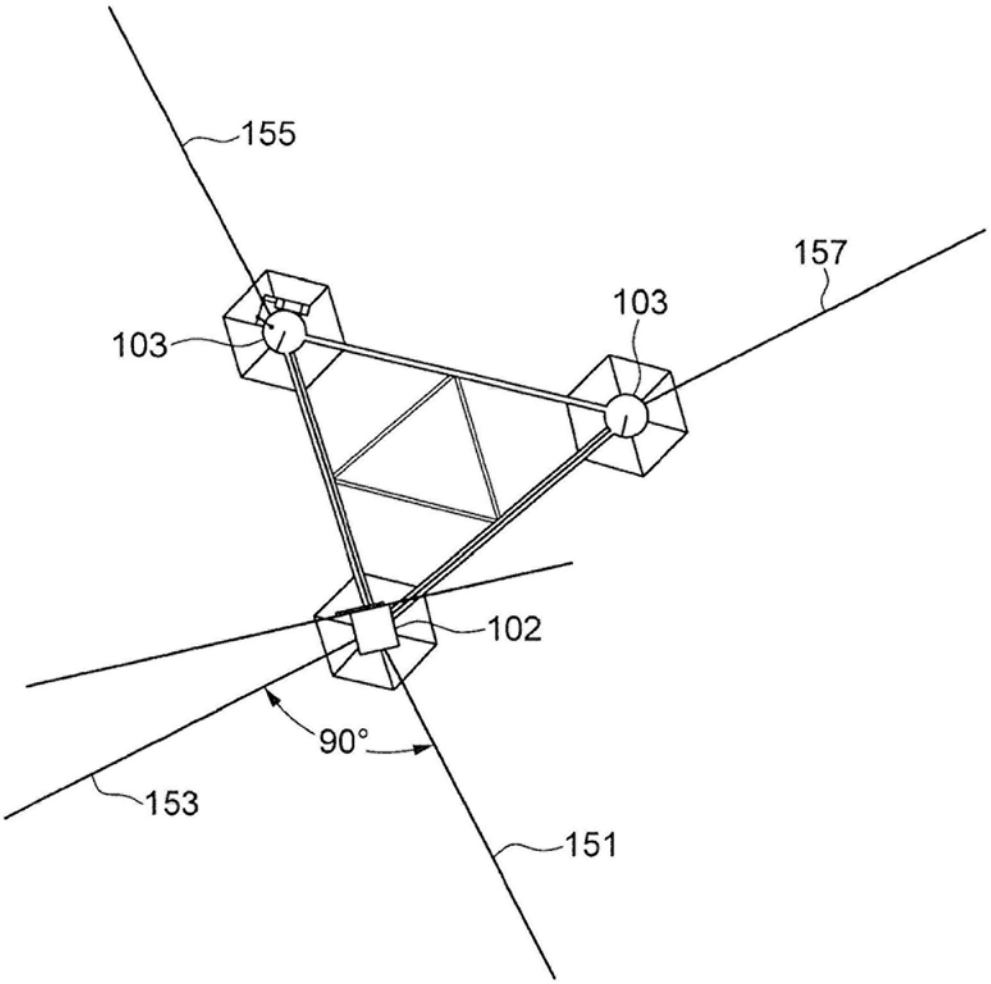

FIG. 11

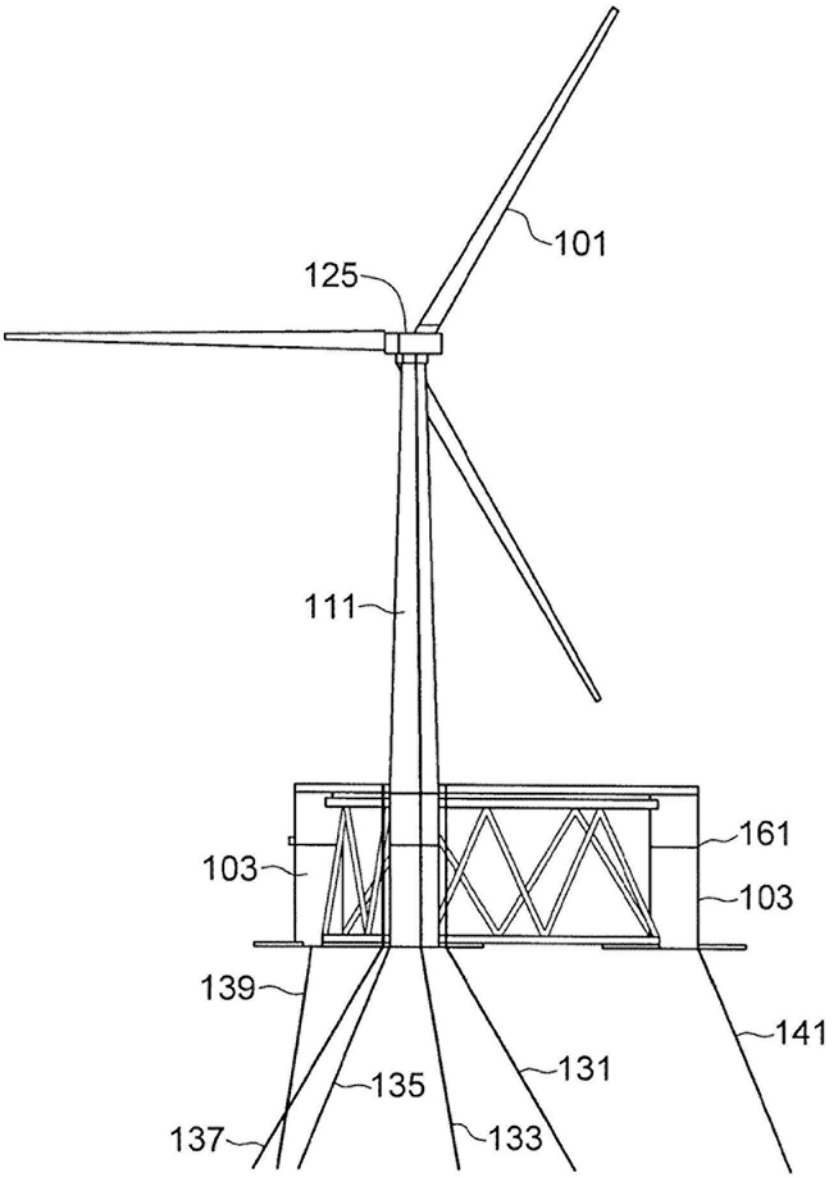

FIG. 12

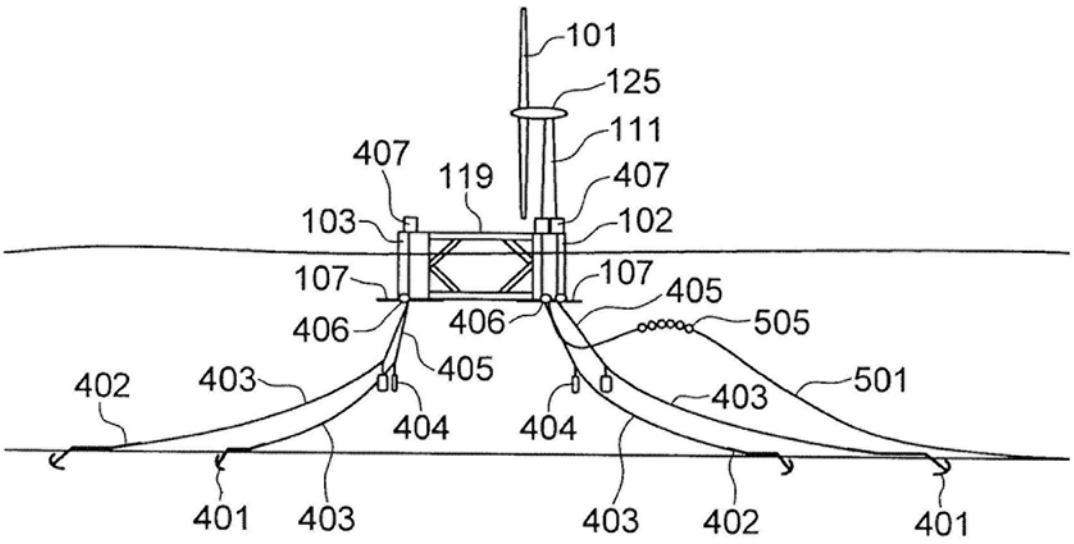
101
125
111
407
119
407
103
102
107
107
405
406
406
505
405
402
403
403
501
404
404
401
403
403
402
401

FIG. 13

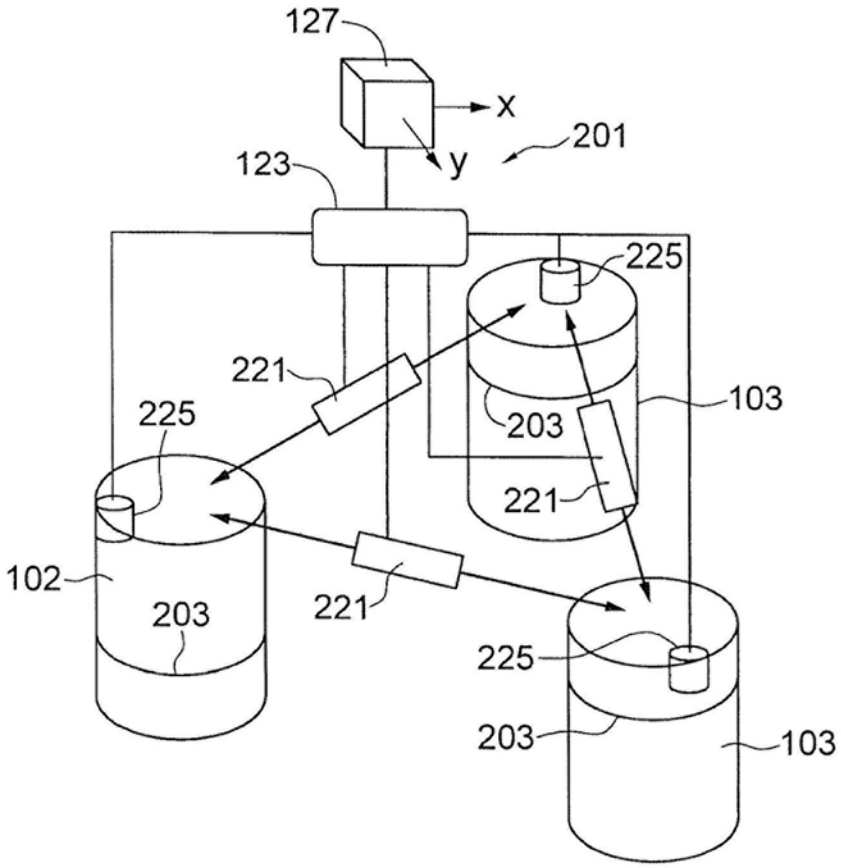

FIG. 14

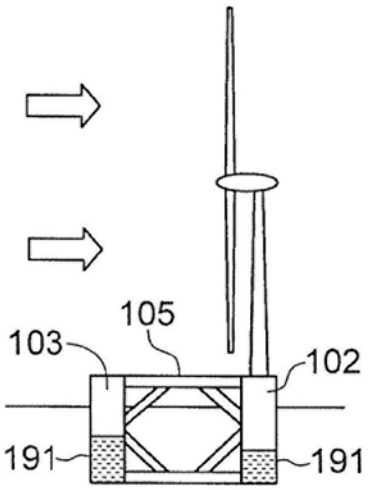

FIG. 15

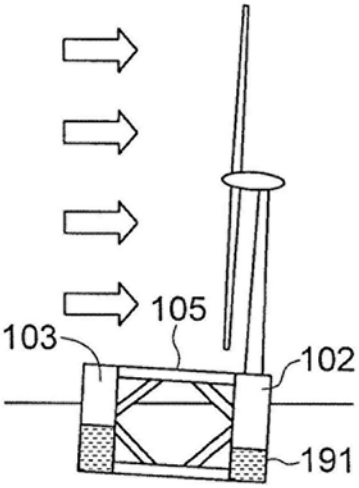

FIG. 16

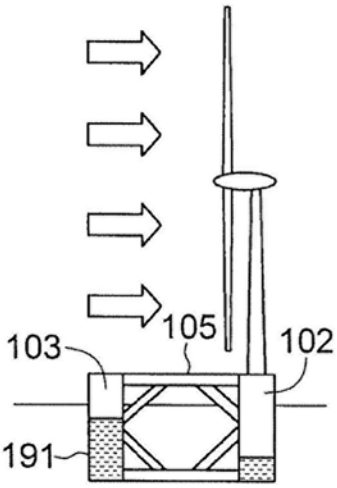

FIG. 17

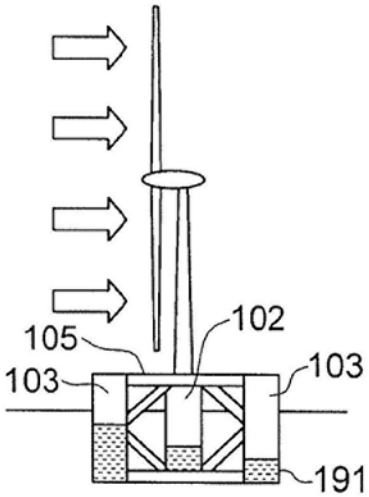

FIG. 18

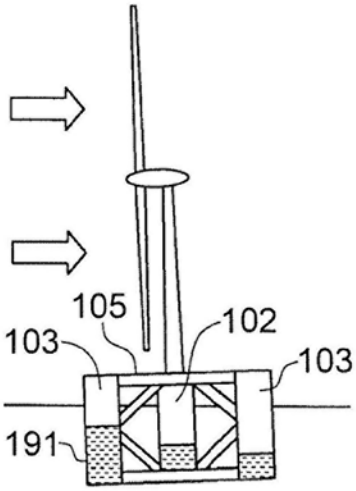

FIG. 19

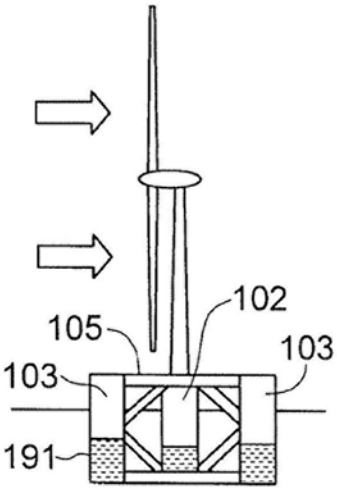

FIG. 20

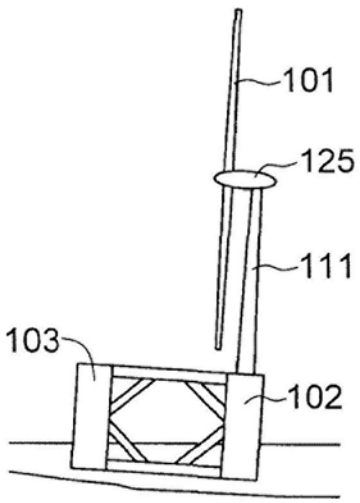

FIG. 21

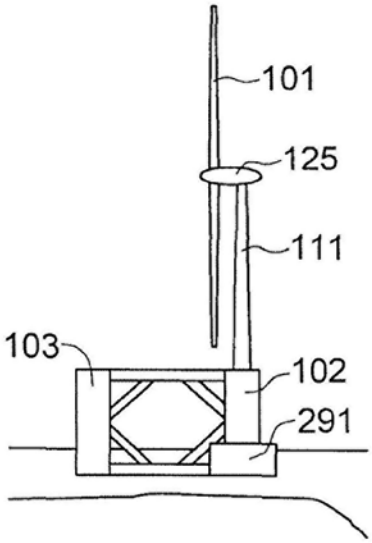

FIG. 22

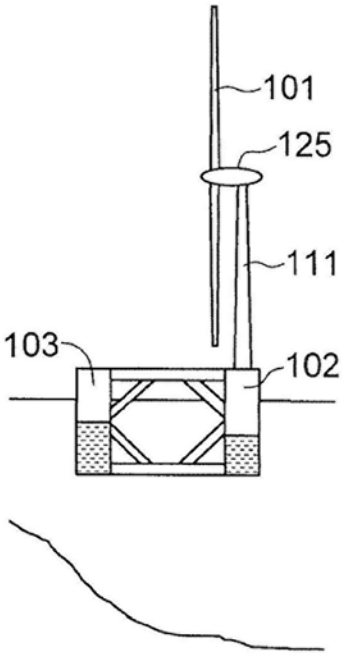

FIG. 23

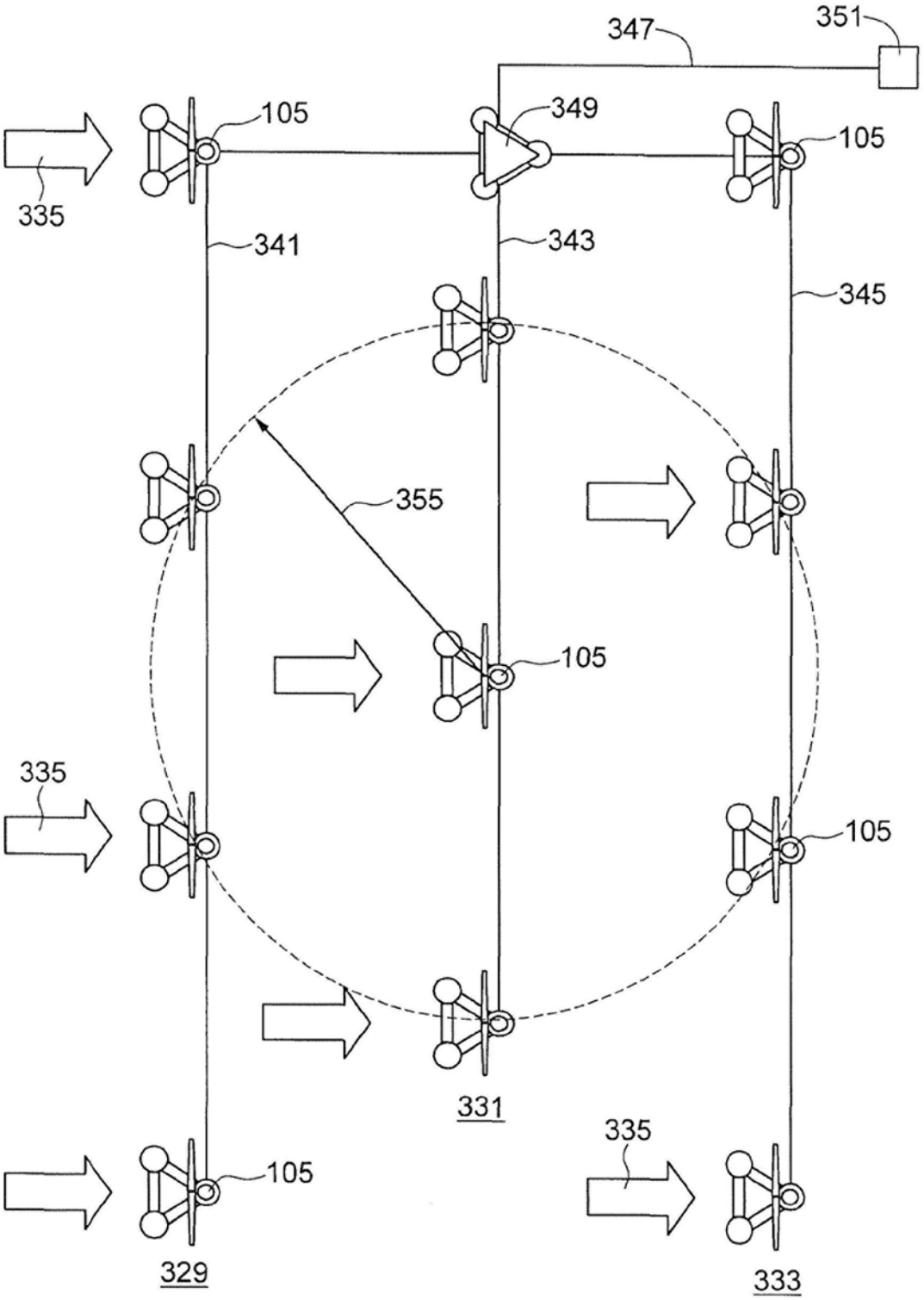
347
351
105
349
105
335
341
343
345
355
105
335
105
331
335
105
329
333

FIG. 24