

(12) FASCÍCULO DE PATENTE DE INVENÇÃO

(22) Data de pedido: 2004.08.20	(73) Titular(es): HYWIND AS	
(30) Prioridade(s): 2003.08.27 NO 20033807	FORUSBEEN 50 4035 STAVANGER	NO
(43) Data de publicação do pedido: 2006.07.19	(72) Inventor(es): FINN GUNNAR NIELSEN	NO
(45) Data e BPI da concessão: 2013.04.17 117/2013	(74) Mandatário: LUÍS MANUEL DE ALMADA DA SILVA CARVALHO RUA VÍCTOR CORDON, 14 1249-103 LISBOA	PT

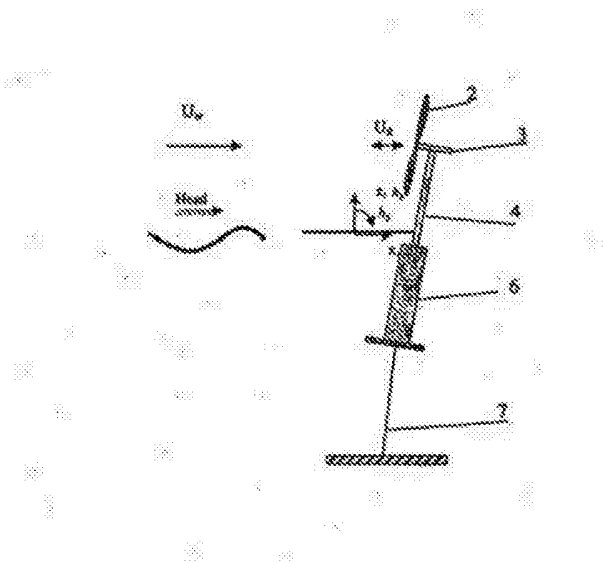
(54) Epígrafe: **TURBINA EÓLICA PARA USO NO MAR ALTO**

(57) Resumo:

UM PROCEDIMENTO E UM DISPOSITIVO EM LIGAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA NO MAR ALTO (¿OFFSHORE¿), COMPREENDENDO UMA TURBINA EÓLICA (2), LIGADA ATRAVÉS DE UM VEIO (NÃO MOSTRADO) A UM GERADOR (3), O QUAL É ROTATIVAMENTE MONTADO NUMA TORRE (4), E UMA BASE INFERIOR SOB A FORMA DE UM FLUTUADOR (6) NA QUAL A TORRE (4) É MONTADA. O FLUTUADOR (6) DESTINA-SE A SER ANCORADO DE MODO A QUE POSSA MOVER-SE LIVREMENTE NO PLANO VERTICAL ATRAVÉS DE UMA AMARRAÇÃO SOB A FORMA DE CABOS DE AMARRAÇÃO, ARTICULAÇÃO OU TIRANTE (7), PELO QUE, COMO CONSEQUÊNCIA DO EFEITO DAS ONDAS SOBRE O FLUTUADOR, O MOVIMENTO DA TURBINA EÓLICA (2) VAI ACTUAR COMO UM MECANISMO DE AMORTECIMENTO DO MOVIMENTO E, ASSIM, EXTRAIR ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS. O PERÍODO DE RESSONÂNCIA DA TURBINA EÓLICA É AJUSTADO PELO AJUSTE DO CENTRO DE GRAVIDADE DA PLATAFORMA E/OU DA TENSÃO NA ANCORAGEM (7) ATRAVÉS DA QUAL A TURBINA EÓLICA ESTÁ LIGADA AO FUNDO DO MAR.

RESUMO**"TURBINA EÓLICA PARA USO NO MAR ALTO"**

Um procedimento e um dispositivo em ligação com a utilização de uma turbina eólica no mar alto ("offshore"), compreendendo uma turbina eólica (2), ligada através de um veio (não mostrado) a um gerador (3), o qual é rotativamente montado numa torre (4), e uma base inferior sob a forma de um flutuador (6) na qual a torre (4) é montada. O flutuador (6) destina-se a ser ancorado de modo a que possa mover-se livremente no plano vertical através de uma amarração sob a forma de cabos de amarração, articulação ou tirante (7), pelo que, como consequência do efeito das ondas sobre o flutuador, o movimento da turbina eólica (2) vai actuar como um mecanismo de amortecimento do movimento e, assim, extrair energia a partir das ondas. O período de ressonância da turbina eólica é ajustado pelo ajuste do centro de gravidade da plataforma e/ou da tensão na ancoragem (7) através da qual a turbina eólica está ligada ao fundo do mar.



DESCRIÇÃO**"TURBINA EÓLICA PARA USO NO MAR ALTO"**

A presente invenção diz respeito a um processo e a um dispositivo em ligação com a utilização de uma turbina eólica no mar alto, compreendendo uma turbina eólica ligada através de um veio a um gerador, o qual é rotativamente montado numa torre, e uma base inferior sob a forma de um flutuador ou elemento flutuante na qual a torre é montada.

As turbinas eólicas estão sendo cada vez mais instaladas no mar alto, em parte por causa das necessidades de espaço e também para alcançar condições de vento exploráveis, idealmente constantes (maior velocidade média, menor turbulência, interface mais fina do que em terra). Neste momento, elas estão instaladas principalmente em águas pouco profundas, onde podem ser facilmente colocadas numa base que fica no fundo do mar. Estas instalações exigem que suficientes zonas de águas pouco profundas estejam disponíveis. Junto à maior parte das costas do mundo e, particularmente, ao longo da costa da Noruega, a água é geralmente demasiado profunda para permitir a instalação de turbinas eólicas no fundo do mar. A instalação de turbinas eólicas em águas pouco profundas, também pode causar problemas aos navios que tenham de efectuar a instalação. A maioria dos navios de instalação

terá um calado que é muito grande para permitir que operem em profundidades até 10 m.

Por estas razões, a utilização de estruturas de suporte flutuantes é uma solução relevante. Para tornar isso interessante do ponto de vista financeiro, cada turbina tem de ter uma elevada capacidade, por exemplo, na ordem de 5 MW. Com uma potência tão grande e explorando as propriedades do vento no mar alto, espera-se que as estruturas de suporte flutuantes sejam capazes de competir em preço de energia com as instalações em terra.

Os conceitos da técnica anterior para estruturas de suporte flutuantes são geralmente baseados numa estrutura flutuante simples (por exemplo, uma coluna vertical) que está ancorada ao fundo do mar por meio de cabos verticais (tirantes). Outros conceitos do casco são baseados na tecnologia de plataformas semi-submersíveis. Estas foram especialmente desenvolvidas para ter movimentos favoráveis (pequenos) nas ondas. Uma característica comum da maioria destes conceitos de turbinas eólicas da técnica anterior é que o objectivo é o de limitar o movimento da plataforma, tanto quanto possível. Além disso, elas são desenhadas para que possam suportar as condições de mar extremas. Quanto mais rigorosos são os requisitos feitos para o movimento, maiores são as forças experimentadas numa situação extrema. As combinações desses requisitos são, portanto, caras e contribuem para que as soluções da técnica anterior de turbinas eólicas instaladas no mar

sejam, até hoje, geralmente não lucrativas.

Os documentos WO 03/004869, WO 02/052150, GB 2378679 e DE 3107252 divulgam turbinas eólicas flutuantes que são ancoradas ao fundo do mar.

A presente invenção refere-se a um processo tal como definido na reivindicação 1 e a uma turbina eólica de mar alto tal como definida na reivindicação 5.

Na turbina eólica instalada no mar alto a montagem é simples e pouco dispendiosa, mas, ao mesmo tempo, a turbina eólica será capaz de extrair energia das ondas para além da energia eólica.

Na presente invenção, o flutuador é ancorado com cabos de amarração ou cabos (tirantes) ou é articulado ao fundo do mar, e, como uma consequência do efeito das ondas sobre o flutuador, o movimento da turbina eólica vai actuar como um mecanismo de amortecimento do movimento e, assim, extrair energia a partir das ondas.

Ao explorar o movimento da plataforma nas ondas, a turbina eólica será capaz de extrair mais energia. Esta energia é, portanto, extraída a partir das ondas. A turbina eólica actuará, assim, como um mecanismo de amortecimento do movimento e, assim, extraie energia que de outra forma teria sido desperdiçada. Ambos os movimentos, de arfagem ("pitch") e de deriva ("sway"), vão contribuir para esse

processo.

A quantidade de energia que pode ser extraída a partir das ondas está dependente de vários factores, tais como do desenho do flutuador (casco) ou elemento flutuante, das características da amarração e da distribuição da massa, isto é, das propriedades dinâmicas do flutuador. Além disso, a quantidade de energia extraída a partir das ondas depende de como as pás da turbina eólica são controladas em relação à velocidade relativa instantânea do vento, isto é, o controle do ângulo de passo ("pitch control") das pás da turbina eólica. Se o ângulo de passo é mantido constante, os coeficientes de impulso e de potência são aproximadamente constantes. Por outro lado, se o ângulo de passo for controlado de tal modo que os coeficientes de impulso e de potência aumentam com o aumento da velocidade relativa do vento, então a absorção de energia a partir das ondas aumenta.

A energia máxima será extraída a partir das ondas se o sistema oscilar em ressonância com as ondas. Ao conceber o sistema de tal modo que o amortecimento da radiação é igual ao amortecimento linearizado da turbina eólica, o máximo teórico de absorção de energia é alcançado. (O amortecimento de radiação é o amortecimento que provoca a criação de ondas que se afastam na água quando a estrutura está em movimento).

O amortecimento da radiação é influenciado pelo

desenho geométrico do flutuador ou elemento flutuante. É principalmente uma função do raio do flutuador. A uma dada frequência, o amortecimento de radiação em arfagem (com mar de proa) é proporcional à quarta potência do raio do flutuador. O amortecimento da turbina depende da velocidade média do vento, do raio da turbina e do coeficiente de impulso.

No entanto, também se pode extrair energia a partir das ondas quando o flutuador está oscilando a frequências não ressonantes. O período de ressonância em arfagem pode ser ajustado, por exemplo, bombeando lastro para dentro e para fora de um tanque. Isto fará com que seja possível ajustar o centro de gravidade da plataforma e/ou a tensão no tirante. A tensão do tirante afecta o período de ressonância do sistema.

A baixas velocidades de vento, em particular, quando a produção da potência nominal da turbina não é alcançada apenas com o vento, a interacção com as ondas vai induzir a produção de energia adicional.

A velocidades elevadas do vento (e correspondentemente a ondas altas) será possível ajustar o período natural do sistema para evitar a ressonância e, assim, reduzir o movimento. Isso também fará com que seja possível reduzir as cargas máximas no sistema.

A presente invenção será descrita em maior

detalhe nos seguintes exemplos de utilização e com referência às figuras, em que:

A FIG. 1 mostra um diagrama esquemático simples de uma turbina eólica da técnica anterior colocada no fundo do mar.

A FIG. 2 mostra um diagrama esquemático simples de uma turbina eólica flutuante da técnica anterior amarrada ao fundo do mar.

A FIG. 3 mostra um diagrama esquemático simples de uma turbina eólica de acordo com a presente invenção, a qual é livre para mover-se em movimento de deriva e de arfagem.

As Figs. 4-7 mostram várias curvas associadas com a potência da turbina eólica, com e sem o efeito das ondas, baseadas em cálculos teóricos.

Uma turbina eólica 1 compreende, em esboço como mostrado nas Figuras 1-3, uma turbina eólica 2 ligada através de um veio (não mostrado) a um gerador 3, o qual está montado rotativamente numa torre 4, e uma estrutura de suporte 5,6, na qual a torre está montada. A Fig. 1 mostra uma turbina eólica tradicional, na qual a torre 4 está montada numa estrutura fixa 5 no fundo do mar, enquanto a Fig. 2 mostra uma turbina eólica tradicional semelhante em que a torre está montada num flutuador mergulhado, ou

dispositivo flutuante 6 que está ancorado ao fundo do mar por meio de cabos de amarração 7 e que, conseqüentemente, tem movimentos muito pequenos.

Como indicado acima, a presente invenção baseia-se na teoria de que se é permitido à base ter flutuabilidade positiva e se é aceite que tenha movimento relativamente grande no plano horizontal, a amarração pode ser mais simples e provavelmente a estrutura ser menos dispendiosa, enquanto que ao mesmo tempo também oferece o potencial para aumento da produção de energia. Em particular, uma tal solução será capaz de produzir uma maior potência em situações com um vento moderado. Se assumirmos que as ondas vêm geralmente na mesma direcção que o vento, a turbina eólica vai mover-se para a frente e para trás, devido ao movimento da base (flutuador), como mostrado na Fig. 3. Isto irá resultar num movimento periódico da turbina eólica, alternadamente com e contra o vento. Como a potência da turbina é aproximadamente proporcional ao cubo da velocidade relativa entre a turbina eólica e o ar. (Isto é válido para turbinas com ângulo de passo fixo, no entanto, o expoente varia para turbinas com passo variável. Isto poderá aumentar ou reduzir a extracção de energia a partir das ondas, dependendo da estratégia de regulação). Isto irá resultar na produção de energia adicional. Esta energia adicional é feita a partir das ondas.

A base teórica da ideia mostra como a interacção

entre o vento e as ondas proporciona tanto o aumento da produção de energia como a redução de movimentos induzidos pelas ondas em relação aos movimentos sem essa interacção. Máxima potência a partir das ondas é alcançada quando a ressonância é explorada e quando o amortecimento devido à difracção das ondas é "sintonizado" com o amortecimento devido à turbina eólica. No entanto, deve-se acrescentar que a ressonância não é um requisito para o princípio funcionar.

Parece inapropriado entrar nas avaliações e cálculos teóricos fundamentais em relação à presente invenção. No que se segue, por conseguinte, apenas serão mostrados exemplos que ilustram a presente invenção.

Para explicar a presente invenção em mais detalhe, é mais fácil assumir uma turbina eólica flutuante na qual o flutuador ou base consiste num cilindro vertical com um diâmetro constante, como mostrado na Fig. 3. Ao ajustar a flutuabilidade, o peso e a posição do centro de gravidade, é possível fazer o sistema mover-se em ressonância no movimento de rotação virtualmente puro (arfagem) em torno de um ponto situado entre a linha de água e o fundo do mar. Em teoria, é possível mostrar quanta energia é possível extrair a partir das ondas, e que é ideal ter o amortecimento devido ao efeito da turbina igual ao amortecimento das ondas (isto aplica-se quando há ressonância). O cabo, no desenho mostrado na figura, pode, em profundidades moderadas de água, ser substituído por uma

ligação articulada entre a base e o fundo do mar. Alternativamente, podem ser utilizados cabos de correntes de ancoragem mais convencionais.

A potência máxima média que pode então ser extraída a partir das ondas em ressonância é dada por:

$$\bar{P}_\alpha = 3 \frac{r g^3 z_A^2}{\omega^3} \frac{B_{ss}^{(r)} B_t^{(r)}}{(B_{ss}^{(r)} + B_t^{(r)} + B_{add}^{(r)})^2} \frac{C_P}{C_T}$$

Onde r (rho) é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade, ζ_A (Zeta) é a amplitude da onda (ondas regulares monocromáticas), ω (omega) é a frequência da onda, assumida como sendo igual à frequência natural do ângulo de passo neste exemplo, $B_{ss}^{(r)}$ é o amortecimento da radiação da onda em ligação com a ressonância para o movimento de arfagem, $B_t^{(r)}$ é o amortecimento do movimento de arfagem devido à força do vento na turbina e $B_{add}^{(r)}$ é o amortecimento adicional devido, por exemplo, à força do vento sobre a torre e às forças de viscosidade na água. C_P e C_T são, respectivamente, o coeficiente de potência e o coeficiente de impulso para a turbina eólica. O amortecimento devido à força do vento sobre a turbina é dado por:

$$B_i^{(r)} = C_p \rho_a \pi R^2 (z_a - z_r)^2 U_w$$

O coeficiente de potência C_p das turbinas eólicas tem um valor máximo teórico de 16/27. O valor correspondente do coeficiente C_T é 8/9. ρ_a é a densidade do ar, R é o diâmetro do rotor, $(z_a - z_r)$ é a distância desde o centro do rotor até ao centro do movimento de arfagem e U_w é a velocidade do vento no rotor. O efeito máximo teórico das ondas é alcançado se $B_{aa}^{(r)} = 0$ e $B_{ss}^{(r)} = B_r^{(r)}$. Este efeito máximo é dado por:

$$\overline{P}_{ex,max} = \frac{3}{4} \frac{rg^3 z_A^2}{w^3}$$

A Figura 4 mostra uma curva típica de potência para uma turbina eólica em terra de tamanho moderado (600 kW) como uma função da velocidade do vento. Como a figura mostra, esta turbina só atinge a potência máxima a uma velocidade do vento de cerca de 15 m/s e superior. Turbinas situadas no mar alto serão geralmente desenhadas para velocidades de vento superiores. Usando activamente as propriedades dinâmicas do sistema, será possível extrair mais energia a velocidades do vento inferiores a aproximadamente 15 m/s.

A Figura 5 mostra um exemplo específico de quanta potência adicional pode ser conseguida a partir de uma

turbina a várias velocidades do vento ao incluir a energia das ondas. A curva a tracejado mostra a potência obtida através da exploração quer do vento quer das ondas. A linha contínua mostra a potência quando apenas o vento é explorado. Neste exemplo, é usada uma base com um raio de aproximadamente 7 m e um calado de 120 m. O rotor da turbina tem um raio de 40 m. Isto é equivalente a uma turbina em mar alto com uma potência na ordem de 5 MW. O sistema tem um período natural de passo de aproximadamente 10 segundos. No exemplo, é assumido que a amplitude da onda é proporcional à velocidade do vento (0,5 metros de amplitude da onda a 5 m/s de velocidade do vento, aumentando para 2 metros a amplitude da onda a 20 m/s de velocidade do vento) e que o sistema oscila em ressonância a aproximadamente 10 segundos.

A Figura 6 mostra a consequência na produção de energia ao incluir a energia das ondas e mostra o aumento relativo da potência por se explorar tanto o vento como as ondas relacionadas contra apenas o vento (linha contínua), ou seja, a linha contínua é o rácio entre a energia produzida a partir do vento e das ondas e a energia produzida apenas a partir do vento. A 6 m/s, mais de 25% de potência adicional é conseguida quando se explora a energia das ondas para além da do vento, em comparação com a exploração apenas do vento. As linhas contínua e tracejada longa mostram quanta energia das ondas é extraída em relação ao máximo teórico. A linha tracejada longa mostra a proporção da energia das ondas máxima teórica explorada.

Linha pontilhada: amplitude de onda usada. Raio do rotor: 40 m. Raio da base: 6 m. Calado: 60 m. Neste exemplo são usados coeficientes de impulso e de potência constantes (fixos). Usando controle do ângulo de passo a potência vai aumentar.

Um efeito positivo de extrair energia das ondas é que os movimentos do sistema são reduzidos. Na fig. 7 é mostrado o ângulo de resposta da arfagem por amplitude da onda em metros para o sistema acima descrito, ou seja, a Fig. 7 mostra a resposta da arfagem nas ondas com e sem interação entre o vento e as ondas. A frequência da onda varia de 0.02Hz a 0.25Hz. É usada uma velocidade de vento constante de 15 m/s. A linha contínua mostra a resposta das ondas sem a interação com o vento, enquanto que a linha a tracejado mostra a resposta quando a interação é incluída.

Deve notar-se que a presente invenção, como definida nas reivindicações, não está limitada à solução acima descrita e mostrada na Fig. 3. O princípio também funcionará para outras geometrias do flutuador que não sejam um cilindro vertical.

Lisboa, 12 de Junho de 2013

REIVINDICAÇÕES

1. Um processo para instalar uma turbina eólica no mar alto, turbina eólica (2) que compreende pás ligadas através de um veio a um gerador (3), o qual é rotativamente montado numa torre (4), e uma base sob a forma de um flutuador ou casco (6) na qual a torre (4) é montada, o processo compreende:

a ancoragem do flutuador (6), através de um cabo de ancoragem, tirante ou ligação (7), ao fundo do mar de modo que flutue livremente;

caracterizado por o processo compreender ainda:

o ajustamento do período de ressonância da turbina eólica através do ajuste do centro de gravidade da turbina eólica e/ou da tensão no cabo da ancoragem, tirante ou ligação (7), de modo que a turbina eólica oscila em ressonância com as ondas;

em que, como consequência do efeito das ondas sobre o flutuador, o movimento da turbina eólica (2) actua como um mecanismo de amortecimento do movimento e, assim, extraie energia a partir das ondas.

2. Um processo como reivindicado na reivindicação 1, que compreende ainda o ajuste do período de ressonância da turbina eólica, no ângulo de passo, por bombeamento de lastro para dentro e para fora de um tanque no flutuador (6).

3. Um processo como reivindicado na reivindicação 1, que compreende ainda o ajuste do período de ressonância da turbina eólica, no ângulo de passo, movendo o lastro líquido ou sólido verticalmente no flutuador (6) ou na torre (4).

4. Um processo como reivindicado em qualquer das reivindicações 1 a 3, que compreende ainda o controle do ângulo de passo das pás da turbina eólica para obter um efeito de amortecimento desejado e assim extrair energia a partir das ondas.

5. Uma turbina eólica de mar alto compreendendo:

um rotor de turbina eólica (2) ligado através de um veio a um gerador (3), o qual é rotativamente montado numa torre (4);

uma base por baixo da torre sob a forma de um flutuador (6) na qual a torre (4) é montada; e

um cabo de ancoragem, tirante ou ligação(7), ligado ao flutuador de modo que o flutuador pode mover-se livremente num plano vertical;

caracterizado por o centro de gravidade da turbina eólica e/ou a tensão no cabo de ancoragem, tirante ou ligação (7) ser ajustado para ajustar o período de ressonância da turbina eólica, de modo que a turbina eólica oscila em ressonância com as ondas; e

em que, como consequência do efeito das ondas sobre o flutuador, o movimento da turbina eólica actua como um mecanismo de amortecimento do movimento e é assim capaz

de extrair energia a partir das ondas.

6. Uma turbina eólica de mar alto como reivindicado na reivindicação 5, em que o flutuador compreende um tanque, e o período de ressonância da turbina eólica no ângulo de passo pode ser ajustado através do bombeamento de lastro para dentro e para fora do tanque.

7. Uma turbina eólica de mar alto como reivindicado na reivindicação 5, que compreende ainda lastro líquido ou sólido disposto no flutuador ou na torre, em que o período de ressonância da turbina eólica pode ser ajustado movendo o lastro líquido ou sólido verticalmente no flutuador (6) ou na torre (4).

8. Uma turbina eólica de mar alto como reivindicado em qualquer das reivindicações 5 a 7, em que as pás do rotor de turbina eólica podem ser ajustadas a fim de controlar o ângulo de passo da pá.

Lisboa, 12 de Junho de 2013

Fig. 1

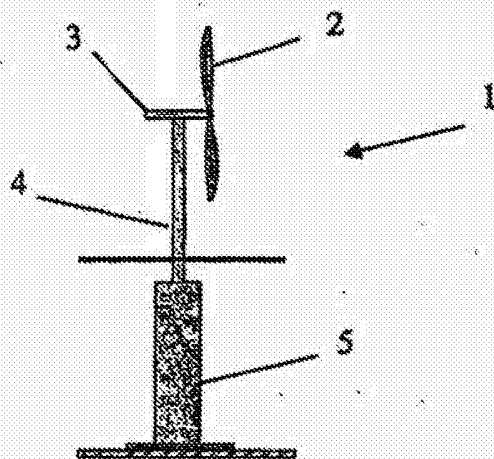
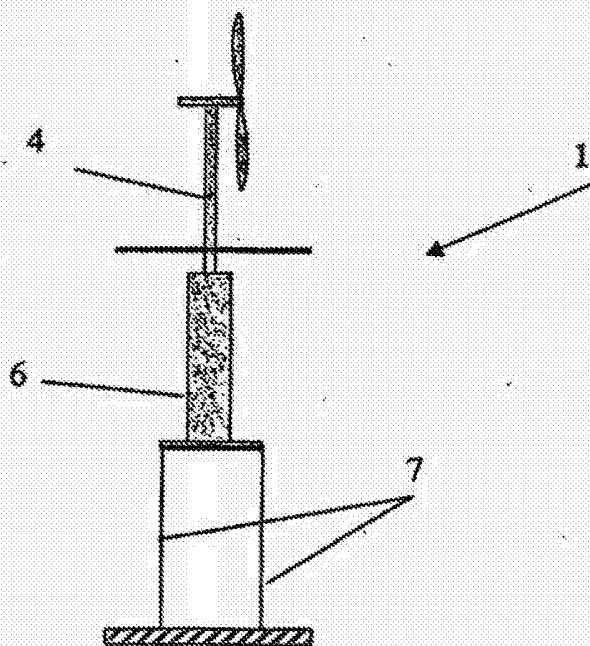
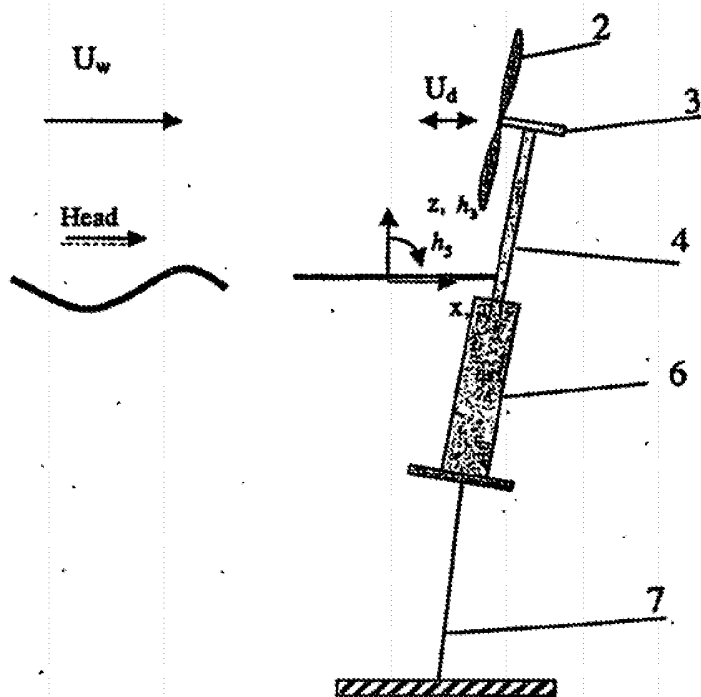


Fig. 2





Head = cabeça

Fig. 4

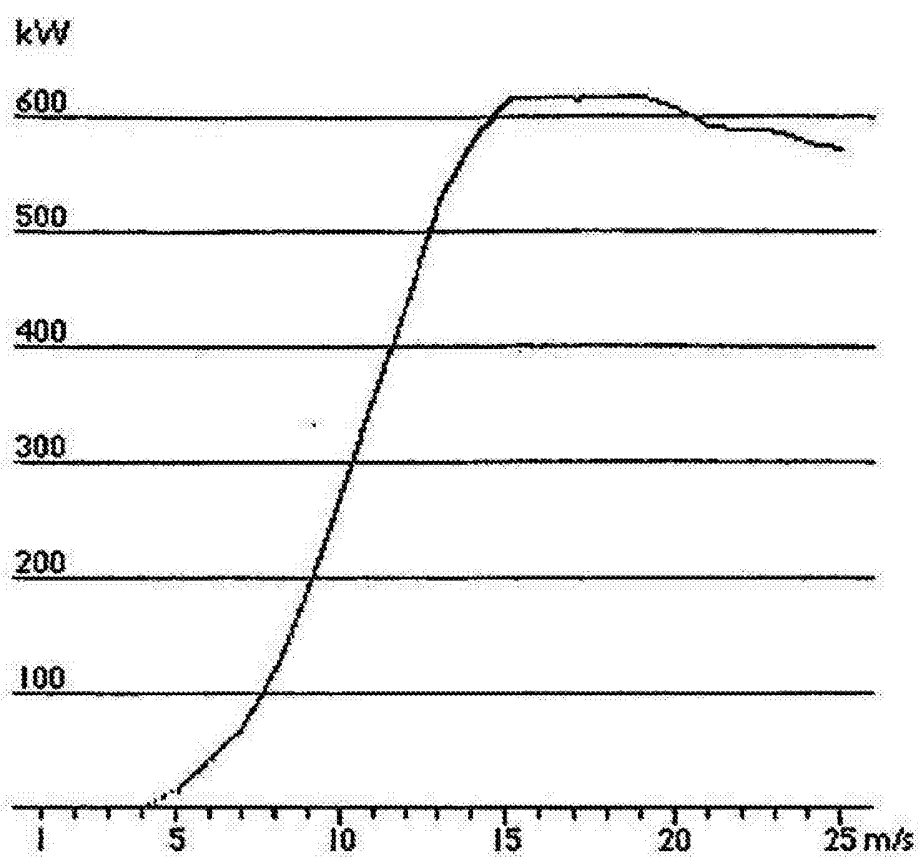
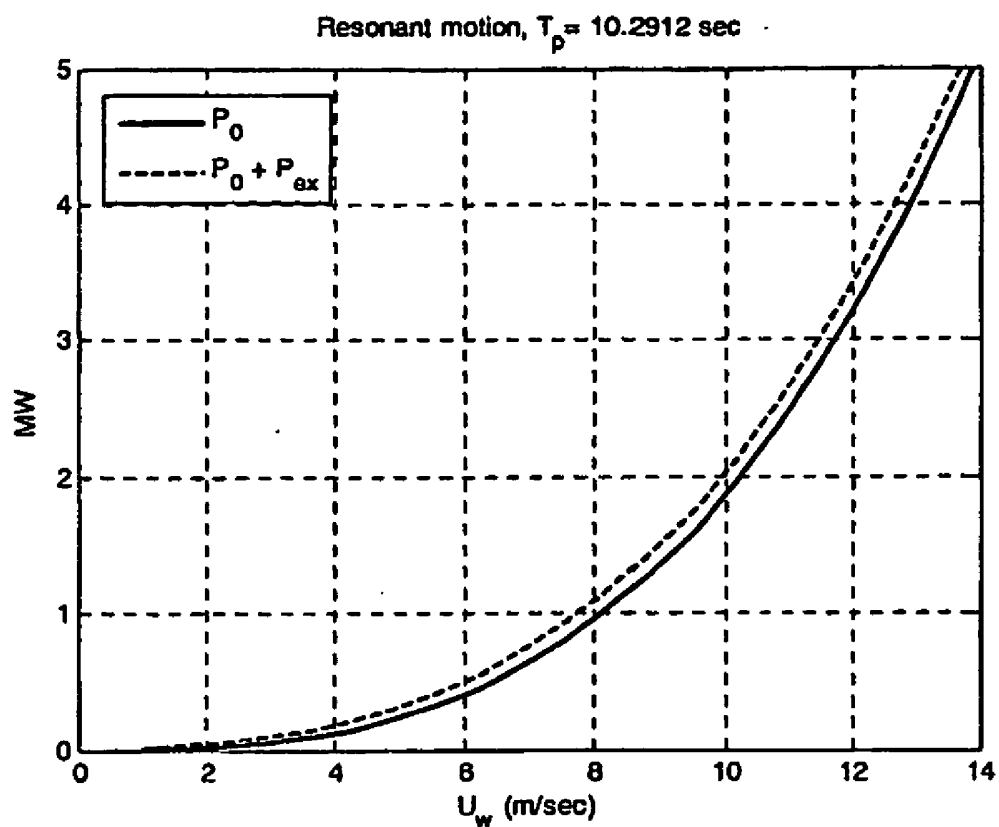
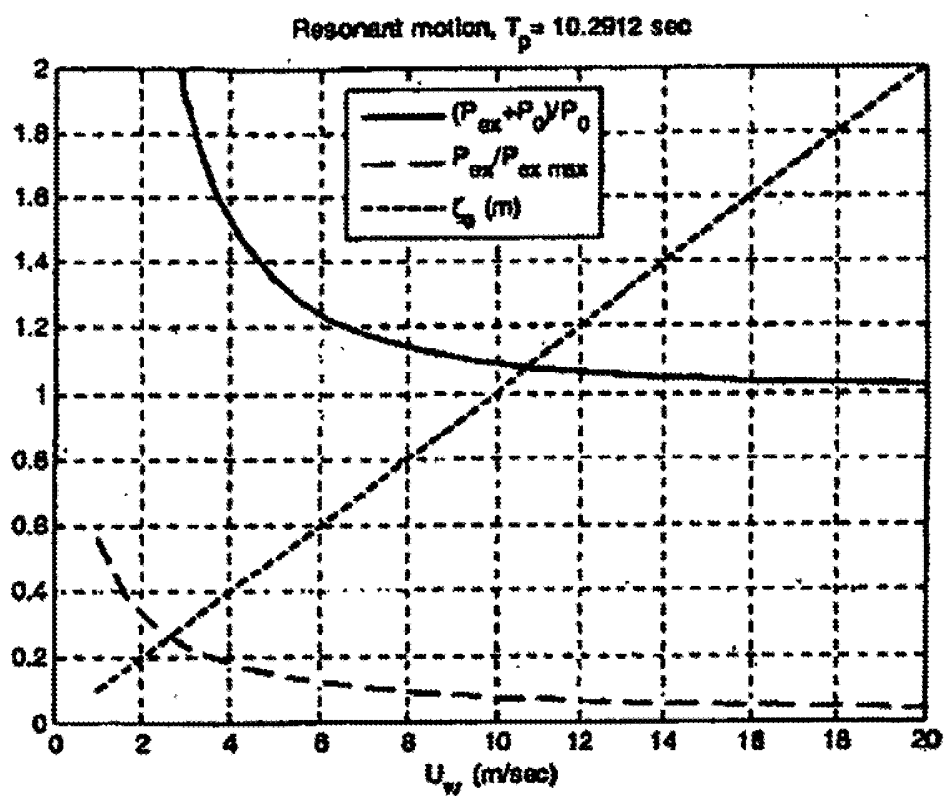


Fig. 5

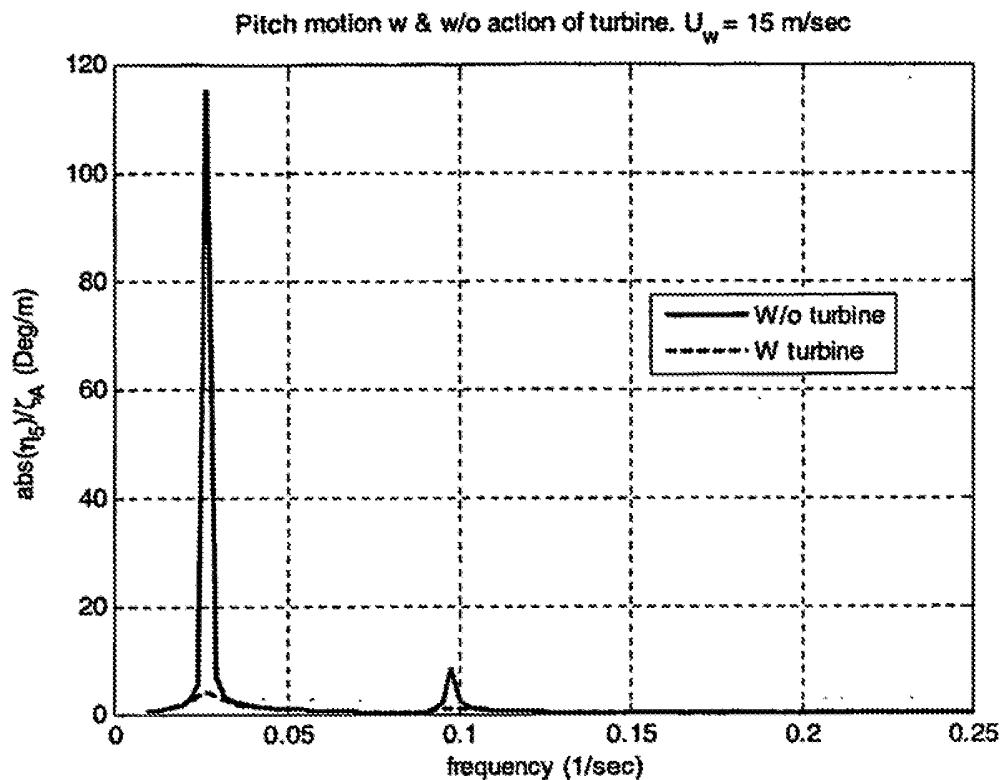


Ressonant motion = movimento de ressonância

Fig. 6

Resonant motion = movimento de ressonância

Fig 7.



Pitch motion w & w/o action of turbine = movimento de arfagem com e sem acção da turbina

W/o turbine = sem turbina

W turbine = com tubina

Frequency = frequência

REFERÊNCIAS CITADAS NA DESCRIÇÃO

Esta lista de referências citadas pelo requerente é apenas para conveniência do leitor. A mesma não faz parte do documento da patente Europeia. Ainda que tenha sido tomado o devido cuidado ao compilar as referências, podem não estar excluídos erros ou omissões e o IEP declina quaisquer responsabilidades a esse respeito.

Documentos de patentes citadas na descrição

- WO 03004869 A
- WO 02052150 A
- GB 2378679 A
- DE 3107252