



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) **PI 0717277-0 A2**

(22) Data de Depósito: 15/03/2007
(43) Data da Publicação: 15/01/2013
(RPI 2193)



(51) *Int.Cl.:*
F03D 7/02
F03D 7/04
F03D 7/00

(54) Título: TURBINA DE VENTO COM CONTROLE DE PASSO DE PÁ PARA COMPENSAR CISALHAMENTO EÓLICO E DESALINHAMENTO EÓLICO

(30) Prioridade Unionista: 02/10/2006 US 60/849,160

(73) Titular(es): Clipper Windpower Technology, Inc.

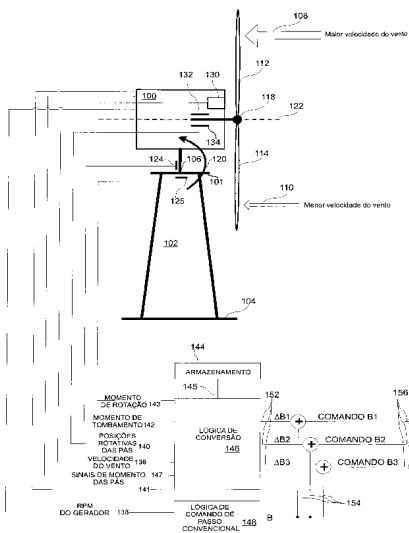
(72) Inventor(es): Kitchener Clark Wilson, Timothy J. McCoy, William Erdman

(74) Procurador(es): Dannemann, Siemsen, Bigler & Ipanema Moreira

(86) Pedido Internacional: PCT IB2007000648 de 15/03/2007

(87) Publicação Internacional: WO 2008/041066de 10/04/2008

(57) Resumo: TURBINA DE VENTO COM CONTROLE DE PASSO DE PÁ PARA COMPENSAR CISALHAMENTO EÓLICO E DESALINHAMENTO EÓLICO. A presente invenção refere-se a um controle de carga de rotor de turbina de vento. O passo das pás é controlado de uma maneira convencional por um componente de comando, um sinal de comando de passo de pás de rotor. Um armazenamento contém valores armazenados de um conjunto de momentos para várias velocidades do vento. Um sensor de momento proporciona uma saída de sinal de momento. Um indicador de velocidade de vento instantânea proporciona uma saída de valor de velocidade do vento instantânea. Uma lógica de conversão, conectada ao sinal de momento e ao valor de velocidade do vento instantânea, proporciona um comando de modulação de passo calculada. A lógica de combinação conectada ao comando de modulação de passo de pás calculada e ao comando de passo coletivo, proporciona um comando de passo de pás combinado, que inclui a compensação para os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**TURBINA DE VENTO COM CONTROLE DE PASSO DE PÁ PARA COMPENSAR CISA-
LHAMENTO EÓLICO E DESALINHAMENTO EÓLICO**".

Campo da Invenção

5 A presente invenção refere-se a turbinas de escoamento de fluido, tais como turbinas de vento e, mais particularmente, a um aparelho e a um método para compensar o cisalhamento eólico e o desalinhamento eólico.

Descrição da Técnica Anterior

10 O desenvolvimento de sistemas de geração de energia eólica práticos cria problemas, que são únicos e não encontrados no desenvolvi-
mento de sistemas de geração de energia convencionais. A variabilidade natural do vento afeta a natureza e a qualidade da eletricidade produzida. A relação entre a velocidade da ponta de uma pá de turbina e a velocidade
15 do vento afeta a energia máxima, que pode ser capturada do vento. Esses aspectos em conjunto com a fadiga mecânica, devido à variabilidade do ven-
to, têm um impacto significativo no custo da eletricidade gerada por vento.

 No passado, as turbinas de vento eram operadas a uma veloci-
dade constante. O torque produzido pelas pás e eixo principal determinava a
20 energia transmitida por essa turbina de vento. A turbina é controlada tipica-
mente por um sinal de comando de energia, que é alimentado a um servo-
mecanismo de ângulo de passo de pá de turbina. Esse servomecanismo controla o passo das pás de rotor e, portanto, a saída de energia da turbina de vento. Em virtude das considerações de estabilidade, esse circuito fecha-
25 do de controle deve ser operado com uma largura de banda limitada e, des-
se modo, não é capaz de responder adequadamente a rajadas de vento. Nessa condição, o torque do eixo principal sobe e sobretensões de energia transientes ocorrem. Essas sobretensões de energia não apenas afetam a qualidade da energia elétrica produzida, mas criam cargas mecânicas
30 significativas na própria turbina de vento. Essas cargas mecânicas forçam ainda para mais o custo de investimento das turbinas, porque as estruturas das turbinas devem ser projetadas para suportar essas cargas por longos

períodos de tempo, em alguns casos, de 20 a 30 anos.

Para minorar os problemas de sobretensões de energia e de cargas mecânicas com as turbinas de vento de velocidade constante, a indústria de energia eólica tem se movimentado no sentido de turbinas de vento de velocidade variável. Uma turbina de vento de velocidade variável é descrita na patente U.S. 7.042.110.

As grandes turbinas de vento modernas têm diâmetros de rotores de até 100 metros, com torres em uma altura compatível para acomodá-las. Nos Estados Unidos da América, torres altas estão sendo consideradas para alguns lugares, tais como nas grandes planícies norte-americanas, para tirar vantagem das estimativas de que dobrando a altura da torre, vai-se aumentar a energia eólica disponível por 45%.

Para simplificar essa discussão, o cisalhamento eólico é usado geralmente para incluir os cisalhamentos verticais e horizontais convencionais, bem como o efeito do desalinhamento eólico (por exemplo, devido a desalinhamento por guinada).

Os estudos mostraram que o cisalhamento eólico varia com a altura e a largura de turbinas de vento de grande eixo horizontal. O cisalhamento eólico é provável de ser mais pronunciada no caso de torres altas. O cisalhamento eólico é uma variação na direção e na velocidade do vento entre os diferentes locais verticais ou horizontais. A falha por fadiga e a qualidade da energia de turbinas de vento são afetadas pelas cargas nas pás, provocadas por flutuações no cisalhamento eólico pelo disco de rotação das pás.

A carga por esses rotores pode variar em virtude das diferenças na velocidade do vento, entre o ponto mais alto do rotor, com uma velocidade do vento gradualmente menor, sentido do ponto mais baixo do rotor, e a menor velocidade do vento no ponto mais baixo do rotor. Também varia horizontalmente pelo rotor. Desse modo, em qualquer ponto no tempo, cada pá pode ter uma carga diferente, devido à dependência do vento da sua posição rotativa em tempo real. Essas cargas contribuem para a fadiga nas pás do rotor e outros componentes de turbina de vento.

Várias técnicas estão em uso, ou propostas para uso, para controlar uma turbina de vento. O objetivo dessas metodologias de controle é maximizar a geração de energia elétrica, enquanto minimizando as cargas mecânicas impostas nos vários componentes de turbina. As cargas provocam tensão e deformação e são a fonte de falhas por fadiga, que abreviam o período de vida útil de componentes. A redução das cargas permite o uso de componentes menores ou mais leves, uma consideração importante tendo em vista os tamanhos crescentes das turbinas de vento. A redução das cargas permite o uso dos mesmos componente em turbinas de energia mais altas, para lidar com a maior velocidade de vento, ou propicia um aumento no diâmetro do rotor para a mesma energia nominal.

O cisalhamento eólico é uma perturbação bastante determinística, tendo um componente médio variando lentamente, embora instantaneamente o cisalhamento eólico varie, devido à turbulência. Os sistemas de controle de turbinas podem considerar o componente médio, para reduzir as cargas, reduzir o torque de motor e proporcionar um melhor controle. Os sistemas de controle variam de simples controladores de pás coletivas derivativo integral (PID), proporcionais a controladores de espaço de estado de pás independentes. Qualquer que seja o tipo de controle, quanto mais são as perturbações determinísticas incluídas ou compensadas, melhor a modernização de controle, porque menos é atribuído às perturbações estocásticas.

Quaisquer que sejam as suas fontes, o cisalhamento eólico provoca um desequilíbrio de momento de turbina, que tende a girar a turbina ou encurvar as pás. Consequentemente, é desejável proporcionar uma compensação de desequilíbrio de carga ou de momento, como um componente de sistema de controle de turbina, em que o desequilíbrio de momento é devido ao cisalhamento eólico ou outras fontes.

É também desejável proporcionar uma turbina de vento na qual as cargas, provocadas pelos desequilíbrio de momento de cisalhamento eólico, são atenuadas.

Resumo da Invenção

Sucintamente, a presente invenção se refere a um aparelho e a

um método de controle de uma turbina de vento, tendo várias pás de rotor, compreendendo um método de compensação de desequilíbrio de momento. O desequilíbrio de momento pode ser provocado por cisalhamento eólico vertical, cisalhamento eólico horizontal, desalinhamento eólico, erro de guinada, ou outras fontes. A turbina de vento usa um comando de passo para controlar o passo das pás de rotor da turbina de vento. O controle primeiro determina e armazena uma relação entre os vários valores de momentos instantâneos e de modulação de passo, que compensa os desvios do momento instantâneo de um valor de momento nominal. O controle sente um momento instantâneo da turbina de vento, resultando em um sinal de momento. O controle usa o sinal de momento para calcular uma modulação de passo de pá, necessária para compensar o desequilíbrio de momento instantâneo. A modulação de passo de pá calculada é combinada com o comando de passo nominal determinado para controlar, por exemplo, a rpm do rotor. Finalmente, a combinação é usada para controlar o passo das pás de rotor, para compensar os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento.

A invenção usa, portanto, a saída de sistemas de controle convencionais e auxilia na compensação para as condições instantâneas se desviando das condições nominais ou médias por modulação dos sinais de controle. Uma vez que os sistemas de controle convencionais são em vez disso baseados em valores médios, não consideram as variações instantâneas. Por modulação dos sinais dos sistemas de controle de reação lenta, a compensação para perturbações de curto tempo é alcançada. No entanto, o mecanismo de controle básico, que proporciona o comando de passo básico, não é afetado, uma vez que apenas o sinal de saída é modulado. Portanto, o sistema pode retornar uniforme e estavelmente para os valores de controle demodulados, se os desvios dos valores nominais não são registrados.

A invenção também usa, portanto, sistemas de controle que formulam inerentemente a compensação para as condições instantâneas se desviando das condições nominais ou médias, por determinação simultânea dos comandos de pás individuais e coletivas, enquanto que usando diretamente as medidas de turbinas. Esses sistemas de controle são referidos

como projetos de espaço de estado.

De acordo com um aspecto da invenção, a fonte do desequilíbrio de momento é um ou mais de cisalhamento eólico vertical, cisalhamento eólico horizontal, e desequilíbrio de momento no plano horizontal e/ou vertical.

5 Breve Descrição dos Desenhos

A invenção e o seu modo operacional serão mais inteiramente entendidos da seguinte descrição detalhada, quando considerada com os desenhos em anexo, nos quais:

10 a figura 1 é um diagrama de blocos da turbina de velocidade variável, de acordo com a presente invenção, realçando os elementos básicos da turbina e ilustrando o cisalhamento eólico vertical, que provoca o momento de tombamento;

15 a figura 2 é um diagrama ilustrando os quadros de posição dos passos de pás fixas e rotativas, como visto contra o vento para as pás de rotor mostradas na figura 1;

a figura 3 é um diagrama de blocos de um compensador de cisalhamento eólico vertical de pré-alimentação geral, em paralelo com um controlador coletivo convencional;

20 a figura 4 é um gráfico de uma tabela M de momento de tombamento para expoente de cisalhamento = -0,2 a +0,5, apresentando limites de passo = 0 e passo = 5 graus para cada alfa;

a figura 5 é um gráfico de torque RMS de motor de passo com compensação de cisalhamento eólico vertical e sem compensação de cisalhamento eólico usando controle de pré-alimentação;

25 a figura 6 é um gráfico de carga equivalente à fadiga de pá com compensação de cisalhamento eólico vertical e sem compensação de cisalhamento eólico usando controle de pré-alimentação;

30 as figuras 7 A - C são gráficos de carga de eixo, nacela e torre com compensação de cisalhamento eólico vertical e sem compensação de cisalhamento eólico usando controle de pré-alimentação;

as figuras 8 A - H são gráficos da tabela M de momento de tombamento versus velocidade do vento, alfa e passo representados grafica-

mente para diferentes valores de alfa;

as figuras 9 A - F são gráficos de alfa versus momento de tombamento, velocidade do vento e passo representados graficamente para diferentes valores de passo da tabela M';

5 as figuras 10 A - F são gráficos de passo versus momento de tombamento, velocidade do vento e alfa representados graficamente para os diferentes valores de alfa da tabela M'';

a figura 11 é um diagrama de blocos de controlador de pré-alimentação;

10 a figura 12 é um diagrama de blocos de controle à base de PID de realimentação; e

a figura 13 é um diagrama de blocos de controlador à base de espaço de estado de realimentação.

Descrição Detalhada da Invenção

15 Com referência à Figura 1, que é um diagrama de blocos de um aparelho de turbina de vento de velocidade variável de acordo com a presente invenção. O dispositivo gerador de energia eólica inclui uma turbina com um ou mais geradores elétricos alojados em uma nacela 100, que é montada na parte superior de uma estrutura de torre alta 102, ancorada no
20 solo 104. A nacela 100 se apóia em uma plataforma de guinada 101 e é livre para girar no plano horizontal em torno de um pivô de guinada 106 e é mantida no caminho de corrente de vento prevalecente 108, 110.

A turbina tem um rotor com pás de passo variável 112, 114 preso em um cubo de rotor 118. As pás giram em resposta à corrente de vento
25 108, 110. Todas as pás podem ter uma seção de base de pá e uma seção de extensão de pá, de modo que o rotor seja de comprimento variável, para proporcionar um rotor de diâmetro variável. Como descrito na patente U.S. 6.726.439, o diâmetro do rotor pode ser controlado para estender-se inteiramente pelo rotor a uma baixa velocidade de escoamento, e retraindo o rotor na
30 medida em que a velocidade aumenta, de modo que as cargas transmitidas pelo, ou exercidas no rotor não excedam os limites pré-ajustados. A nacela 100 é mantida na estrutura da torre, no caminho da corrente de vento, de

modo que a nacela seja mantida no lugar horizontalmente, em alinhamento aproximado com a corrente de vento. O gerador elétrico é acionado pela turbina para produzir eletricidade e é conectado aos cabos condutores de energia interligando-se às outras unidades e/ou a uma grade de energia.

5 O cisalhamento eólico vertical é a variação na velocidade do vento com a altura acima do solo, como ilustrado na figura 1 pela seta de velocidade do vento maior 108 e pela seta de velocidade do vento menor 110 mais próxima do solo. Entre outras influências, o cisalhamento eólico vertical é provocado pelo atrito dependente de altura com a superfície do
10 solo 104. Quanto maior a altura acima do solo 108, menor o efeito de atrito superficial 104 e maior a velocidade do vento. Quanto mais próximo do solo 110, maior efeito tem o atrito superficial 104 e menor a velocidade do vento.

O cisalhamento eólico vertical local pode ser estimado por uso de uma torre metereológica instrumentada com mais de um anemômetro.
15 O cisalhamento eólico é estimado pela curva de ajuste de uma lei de energia para a velocidade do vento versus a altura do anemômetro. Como a extensão de terra varia, é conseqüentemente necessário adicionar torres adicionais.

O cisalhamento eólico horizontal local pode ser estimado por uso
20 de várias torres metereológicas, fisicamente separadas e sensíveis às variações horizontais no vento e alinhamento do vento.

Uma abordagem mais desejável, uma que não requer torres espalhadas adicionais, é o uso de informações das turbinas para estimar o cisalhamento eólico efetivo. Na medida em que o cisalhamento eólico não altera consideravelmente a rpm do gerador ou o movimento da torre, então
25 uma medida mais direta é necessária.

Essa medida é o momento de tombamento da nacela, ilustrado pela seta 120 na figura 1. O momento é medido em torno de um eixo perpendicular à vertical e à direção da linha de acionamento 122 da turbina de
30 vento. As contribuições para o valor desse momento se originam da massa pendente do rotor e da nacela, das acelerações inerciais do rotor e da nacela, das forças de empuxo no rotor e do cisalhamento eólico vertical pelo ro-

tor, que resulta em um momento aerodinâmico líquido.

O momento de tombamento 120 é a tendência da nacela 100 de virar, devido à maior força do vento 108 na parte superior do disco de pá, e é medida usando um ou mais sensores de força 124 (tais como medidores de
5 deformação, parafusos instrumentados, etc.) no ponto no qual o pivô de guinada 106 se prende na plataforma de guinada 101. Estando em uma parte facilmente acessível da turbina, em vez de na pá ou cubo, os sensores 124 são submetidos à manutenção facilmente.

Uma medição similar, para cisalhamento eólico horizontal, é o
10 momento de rotação sentido como uma tendência da turbina para guinar. Um sensor de momento de rotação 125 tem uma saída 143, que é um sinal de momento de rotação.

Um conjunto de medições adicionais é também usado juntamente com as medições de rotação e tombamento. Essas medições são a de-
15 formação de pá, medida adequadamente em um ou mais pontos ao longo de cada pá, para indicar os componentes de deformação no e fora do plano do movimento da pá. As medições de deformação são convertidas em momentos equivalentes.

O aparelho mostrado na figura 1 compensa o desequilíbrio de
20 momento em uma turbina de vento 100. O passo das pás é controlado de maneira convencional por um componente de comando, a lógica de comando de passo convencional 148, que usa a rpm do gerador 138 para desenvolver um sinal de comando de passo de pá de rotor nominal 154. Um armazenamento 144 contém os valores armazenados de um conjunto de momen-
25 tos medidos de rotação, tombamento e pás para várias velocidades de vento e valores de passo. Um sensor de momento de tombamento 124 tem uma saída, que é um sinal de momento de tombamento 142; um sensor de momento de rotação 125 tem uma saída 143, que é um sinal de momento de virada; cada pá tem um sensor de deformação montado (não-mostrado) ne-
30 la, que tem uma saída, que é convertida em um sinal de momento de pá 147. Um indicador de velocidade de vento instantâneo 130 proporciona uma saída, que é um valor de velocidade de vento instantâneo 136. A lógica de

conversão 146, conectada ao sinal de momento de tombamento 142, ao sinal de momento de rotação 143, a cada sinal de momento de pá 147, às posições rotativas das pás 140, aos sensores de passo das pás 141, e ao valor da velocidade do vento instantâneo 136, proporciona uma saída, que é um comando de modulação de passo calculado 152. A lógica de combinação 150, conectada ao comando de modulação de passo de pás 152 e ao comando de passo 154 calculados, proporciona um comando de passo de pás combinado 156, capaz de comandar o passo das pás do rotor, que inclui a compensação para os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento.

Ainda que as condições de vento comuns a todas as pás sejam processadas e consideradas pela lógica de comando coletivo convencional 148, essa lógica pode não detectar as, e certamente não pode responder às condições que podem não aparecer em todas as pás simultaneamente e que requerem um controle de pás individual para atenuação. No entanto, o comando de modulação de passo 152 considera essas condições incomuns. Uma vez que os comandos 154 e 152 são combinados em um comando 156, o controle de turbina se beneficia desse sinal considerando as condições não coletivas.

20 Descrição Detalhada da Concretização Preferida

O cisalhamento eólico vertical é a variação na velocidade do vento com a altura acima do solo, como ilustrado na figura 1. Entre outras influências, o cisalhamento eólico vertical é provocado por atrito dependente da altura com a superfície do solo. Quanto maior a altura acima do solo, menor o efeito de atrito superficial e mais alta a velocidade do vento. Uma função de lei de energia é geralmente usada para modelar esse fenômeno como

$$\text{velocidade do vento} \propto h^{\alpha}$$

na qual h é a altura acima do solo e α é um expoente de energia, tipicamente 0,14. O expoente de energia real varia com as condições locais do vento e com o tipo de terreno.

Como o cisalhamento eólico faz com que a velocidade do vento varie com a altura, uma pá de turbina percebe a variação da velocidade do vento, na medida em que gira em torno do cubo da turbina. A variação cíclica da velocidade do vento confere uma força variável cíclica nas pás, fazendo com que elas flexionem para frente e para trás, provocando uma falha por fadiga. Da equação acima, a velocidade do vento a uma elevação h é relacionada com a altura do cubo h_{cubo} e a velocidade do vento na velocidade do vento v_{cubo} do cubo como

$$\text{velocidade do vento } (h) = \text{velocidade do vento}_{\text{cubo}} \left(\frac{h}{h_{\text{cubo}}} \right)^{\alpha}$$

Em um ponto em uma pá, a uma distância r do cubo, na medida em que a pá gira em torno do cubo, com o ângulo rotativo φ medido da vertical, a velocidade do vento é cíclica:

$$\begin{aligned} \text{velocidade do vento } (\varphi) &= \text{velocidade do vento}_{\text{cubo}} \left(\frac{h_{\text{cubo}} + r \cos \varphi}{h_{\text{cubo}}} \right)^{\alpha} \\ &= \text{velocidade do vento}_{\text{cubo}} \left(1 + \frac{r}{h_{\text{cubo}}} \cos \varphi \right)^{\alpha} \end{aligned}$$

A força cíclica agindo na pá a uma distância r é uma função da velocidade do vento ao quadrado e do coeficiente de empuxo aerodinâmico C_T , definido pela velocidade do vento, taxa de rotação das pás e ângulo de passo β das pás:

$$\begin{aligned} \text{força do vento } (\varphi) &\propto \text{velocidade do vento}^2 C_T \left(\text{velocidade do vento}, \dot{\varphi}, \beta \right) \\ &\propto \text{velocidade do vento}_{\text{cubo}}^2 \left(1 + \frac{r}{h_{\text{cubo}}} \cos \varphi \right)^{2\alpha} C_T \left(\text{velocidade do vento}, \dot{\varphi}, \beta \right) \end{aligned}$$

Isso sugere que a força do vento cíclica pode ser feita mais uniforme por variação do ângulo de passo, em função de um ângulo de rotação: no sentido da mudança do passo da pá para uma posição de pá zero e longe da mudança do passo da pá para uma posição de pá de 180°. A modulação cíclica resultante do passo de pá é diferente para cada pá, uma vez que

O cisalhamento eólico horizontal não é suscetível a modelos, mas deve ser medido no campo, tipicamente aproximado como uma variação linear.

10 Conversão de Quadros de Referência Rotativos em Fixos e de Fixos em Rotativos

Como usado abaixo, é útil transladar os ângulos de passos de pás do quadro rotativo (rotação em torno do cubo) em um quadro não rotativo. Isso é feito simplesmente usando a transformada múltipla de Coleman (também conhecida como transformada d-q para equipamento elétrico rotativo). Se $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ são os três ângulos de passos de pás e $(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3)$ são as posições rotativas das pás em torno do cubo, como ilustrado na figura 2, os componentes vertical e horizontal são determinados como

$$\begin{bmatrix} \beta_{vertical} \\ \beta_{horizontal} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \cos \varphi_2 & \cos \varphi_3 \\ \sin \varphi_1 & \sin \varphi_2 & \sin \varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix}$$

A transformada inversa é

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \\ \cos \varphi_3 & \sin \varphi_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_{vertical} \\ \beta_{horizontal} \end{bmatrix}$$

20 Essas transformadas de coordenadas são também usadas para converter os momentos das pás rotativas em componentes vertical e horizontal.

Controle de Pré-Alimentação

Com referência à Figura 3, que é um diagrama de blocos de um compensador de cisalhamento eólico vertical de pré-alimentação, em paralelo com um controlador coletivo convencional. O aparelho mostrado na figura 3 compensa o desequilíbrio de momento em uma turbina de vento 200. O passo das pás é controlado de uma maneira convencional por um componente de comando, um controlador coletivo convencional 248, que usa a rpm do gerador real 238 realimentada e combinada com uma rpm desejada 239 para desenvolver um sinal de comando de passo coletivo 254. A lógica de conversão (não mostrada) conectada a um sinal de momento de tombamento, a um sinal de momento de rotação, a cada sinal de momento de pá, às posições rotativas das pás, aos sensores de passo das pás, e ao valor da velocidade do vento instantâneo, proporciona uma saída para cada uma das pás nº 1, nº 2 e nº 3, que é um comando de modulação de passo calculada 252. A lógica de combinação 250, conectada ao comando de modulação de passo de pá de cisalhamento calculado 252 e ao comando de passo coletivo 254, proporciona um comando de passo de pás combinado 256, capaz de comandar o passo das pás do rotor, que inclui a compensação para os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento 200.

O controlador coletivo 248 proporciona, portanto, um sinal de controle usado como base para controlar cada uma das pás nº 1, nº 2 e nº 3. No entanto, a lógica de combinação 250 transmite comandos de pás individuais por modulação do sinal de comando coletivo 254 pelo comando de modulação de passo de pás individuais 252.

Com referência à Figura 11, que é um diagrama de blocos de um compensador de cisalhamento eólico vertical de pré-alimentação mais detalhado, em paralelo com um controlador coletivo convencional. O aparelho mostrado na figura 11 compensa o desequilíbrio de momento em uma turbina de vento 400. O passo das pás é controlado de uma maneira convencional por um componente de comando, o controlador coletivo convencional 448, que usa a rpm do gerador real 438 realimentada e combinada com uma rpm desejada 439, para desenvolver um sinal de comando de passo coletivo 454.

A lógica de conversão 406 converte componentes cíclicos em fixos, usando a transformada de Coleman, resultando em um componente vertical 409 e um componente horizontal 413, que são introduzidos na lógica 408.

5 A lógica 408 conectada a um sinal de momento de tombamento, a um sinal de momento de rotação, a cada sinal de momento de pás, às posições rotativas das pás, aos sensores de passo das pás, e ao valor da velocidade do vento instantâneo 403, proporciona uma saída, que é uma modulação 415 no componente vertical 409 e no componente horizontal 413.

10 A modulação 415 no componente vertical 409 e no componente horizontal 413 e nas posições rotativas das pás 404 é introduzida na lógica de conversão 407, que converte componente fixo em cíclico, usando a transformada inversa de Coleman, para desenvolver um comando de modulação de passo de pás 411.

15 A lógica de combinação 412, conectada ao comando de modulação de passo de pás calculado 411 e ao comando de passo coletivo 454, proporciona um comando de passo de pá combinado 422, capaz de comandar o passo das pás do rotor, que inclui a compensação para os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento 400.

20 Um esquema de controle de pré-alimentação, tal como aquele mostrado na figura 3 e em mais detalhes na figura 11, é relativamente simples para implementar, pelo fato de que opera em paralelo com os controles convencionais existentes. Considerando que a modulação do passo $\Delta\beta_{pá}$ para cada pá é conhecida, a abordagem de pré-alimentação para compensar o cisalhamento eólico é modular o passo, comandado pelo controlador
25 convencional em um esquema de controle de alimentação de antemão, como mostrado nas figuras 3 e 11.

O comando de passo líquido enviado para os motores de passo de pás é

$$\text{passo}_{pá} = \text{passo}_{coletivo} + \Delta\beta_{pá}$$

em que o $\text{passo}_{coletivo}$ é o comando de passo nominal gerado
30 pelo controlador.

O controlador coletivo convencional é um PID ou espaço de estado, ou qualquer outro tipo de sistema de controle. Uma turbina de três pás é ilustrada, embora qualquer número de pás possa ser usado. Um controlador coletivo com passo, como sua única saída, é ilustrado, embora torque de gerador e qualquer outra saída sejam possíveis. Um controlador coletivo com rpm do gerador como sua única entrada é ilustrado, embora o passo de pás real e quaisquer outras entradas estejam dentro do âmbito desta invenção.

Cálculo da Modulação do Passo para Pré-alimentação:

Uma abordagem para estimar o expoente de energia de cisalhamento α do cisalhamento eólico vertical local é usar uma torre metereológica, instrumentada com mais de um anemômetro. O expoente é avaliado pelo ajustamento da curva à lei de energia para a velocidade do vento versus a altura do anemômetro. Como o terreno varia, é consequentemente necessário adicionar torres adicionais.

A abordagem de pré-alimentação preferida, uma que não necessita de torres espalhadas adicionais, é usar as informações das turbinas para estimar o cisalhamento eólico efetivo, bem como a modulação de passo desejada. O cisalhamento eólico não altera significativamente a rpm do gerador, nem o movimento da torre, e uma medição mais direta é necessária para estimar o expoente de energia do cisalhamento eólico vertical efetivo, bem como a modulação de passo desejada.

A medição preferida de momento de tombamento é ilustrada na figura 1. O momento é medido em torno de um eixo mutuamente perpendicular à vertical e à direção da linha de acionamento da turbina de vento. As contribuições ao valor desse momento se originam da massa pendente do rotor e da nacela, das acelerações inerciais da mesma, das forças de empuxo no rotor, e do cisalhamento eólico vertical através do rotor que resulta em um momento aerodinâmico líquido. O momento de tombamento é a tendência da nacela de tombar, devido à maior força do vento na parte superior do disco de pá, e é medido simplesmente usando um ou mais sensores de força (tais como medidores de deformação, parafusos instrumentados, etc.), no ponto no qual o pivô de guinar se prende à plataforma de guinar. Estando

em uma parte facilmente acessível da turbina, em vez de na pá ou cubo, os sensores são submetidos à manutenção facilmente.

A medição preferida de momento de rotação é feita em torno do eixo de guinar. As contribuições para o valor desse momento se originam dos erros de guinar e do cisalhamento eólico horizontal. O momento de rotação é a tendência da nacela de girar, devido à maior força do vento em um lado do disco de pá, e é simplesmente medido usando um ou mais sensores de força (tais como medidores de deformação, parafusos instrumentados, etc.) no ponto no qual o pivô de guinar é preso à plataforma de guinar. Estando em uma parte facilmente acessível da turbina, em vez de na pá ou cubo, os sensores são submetidos à manutenção facilmente.

A medição preferida dos momentos das pás no plano e fora do plano é com os sensores de deformação medindo o efeito direto do cisalhamento eólico no encurvamento das pás. A Insensys, Ltd. na 6 & 7 Compass Point Ensign Way, Hamble, Southampton, Reino Unido SO31 4RA, projeta e fornece sistemas de monitoração usando tecnologia de fibra óptica, para medir a deformação dentro das estruturas compostas. Um pequeno sistema leve usa fibras ópticas de diâmetro de 0,25 mm embutidas dentro do processo de manufatura de compósitos, para proporcionar medições de carga em tempo real, tal como a medição do efeito direto de cisalhamento eólico no encurvamento das pás. Embora não tendo uma manutenção fácil, não possui partes móveis e é considerado inflexível. Essas medições são compensadas para passo de pás e convertidas nos momentos no plano e fora do plano.

Os estudos de simulação de turbinas proporcionam a dependência do momento de rotação, momento de tombamento, e momentos das pás no plano e fora do plano a outros parâmetros: velocidade do vento no cubo e os componentes vertical e horizontal da grandeza de modulação de passo, $\Delta\beta_{\text{vertical}}$ e $\Delta\beta_{\text{horizontal}}$. Cada dependência é tabulada por simulação da turbina a várias condições de estado constante, enquanto variando os parâmetros dependentes. Isso produz uma tabela ou tabelas, representando a rotação, o tombamento e os momentos das pás em função de $\Delta\beta_{\text{vertical}}$, $\Delta\beta_{\text{horizontal}}$, velo-

cidade do vento_{cubo}. Um algoritmo para calcular a modulação do passo necessária para cada pá usa as tabelas de momentos.

Determinação da Velocidade do Vento para Pré-alimentação:

- 5 A velocidade do vento é determinada por medição de anemômetro na altura do cubo. Uma alternativa é usar um estimador de velocidade do vento, tal como no pedido de patente copendente U.S. 11/128.030, intitulado "Wind flow estimation and tracking using tower dynamics", número de publicação US 2006-0033338 A1, publicado em 16 de fevereiro de 2006.

Estudos de Simulação de Cisalhamento Eólico Vertical com Pré-alimentação:

- 10 Para gerar as comparações de cargas, estudos de simulação ADAMS foram conduzidos em uma turbina de 2,5 megawatts, tendo uma altura de cubo de 80 m, pás de 46 m de três cordas integrais, e um controlador PI coletivo convencional. Os ensaios de simulação foram feitos para produzir as relações mostradas nas figuras 4 e 8; o sistema de compensação de cisalhamento eólico vertical das figuras 3 e 11 foi desenvolvido; e a turbina com a compensação foi simulada em ar turbulento, com e sem o compensador de cisalhamento vertical. Os resultados da simulação foram submetidos a uma avaliação de carga padrão, com os resultados apresentados nas figuras 6 e 7, e o torque do motor de passo na figura 5. Observou-se um aperfeiçoamento substancial no torque do motor de passo e nas cargas equivalentes das pás.

- 25 A redução superior a 10% na carga nas pás em velocidades de vento superiores a 10 m/s é substancial. A redução de 33% no torque do motor de passo é também substancial. Isso é devido à correlação entre a demanda de passo e as forças da gravidade que agem como uma carga no motor de passo. As pás são assentadas tipicamente nas suas posições de mudança do passo de pá mais distantes, quando estão verticalmente para cima (posição do rotor = 0 grau). Na medida em que a pá se movimenta para baixo 90 graus e para uma posição horizontal, o passo cíclico vertical fica de volta na posição de estol. As forças da gravidade na pá a 90 graus são ex-
- 30 cêntricas ao eixo do passo e criam um momento de passo, que ajuda esse

movimento no sentido da posição de estol. A 270 graus, os passos das pás voltam no sentido da mudança dos passos das pás, com a ajuda também da gravidade. De modo que não apenas a gravidade auxilia na ação de passo requerida para compensação de cisalhamento, mas permite que o motor exerça menos esforço no controle de passo coletivo, pois não tem que se manter contra a gravidade.

A redução no torque de passo das pás é específica para as pás pré-dobradas ou pré-encurvadas, isto é, nas quais o centro de gravidade é excêntrico ao eixo do passo. O pré-dobramento ou pré-encurvamento é que provoca que o centro de gravidade seja excêntrico ao eixo do passo. O pré-dobramento ou pré-encurvamento foi apenas recentemente imposto às pás maiores, para movimentar as pontas mais longe da torre. É concebível que novos materiais ou projetos possam atenuar a necessidade para essa solução, ou que o efeito de vergamento vá ser incluído no cubo, realinhando, desse modo, o eixo do passo com a pá, etc. Então, se o centro de gravidade da pá for no eixo do passo, então não há qualquer carga no motor oriunda da gravidade tentando torcer o passo e, por conseguinte, nenhum benefício se origina do passo cíclico.

Há várias circunstâncias nas quais a compensação de cisalhamento não oferece aperfeiçoamento e não deve ser usada. Como observado nas figuras 9 e 10, em baixas velocidades do vento, a relação entre ambos o passo e α e os outros parâmetros é uma linha vertical, significando que o passo e α não são estimados confiavelmente nessas condições. O resultado, refletido nas figuras 5 a 7, é o desempenho inferior em velocidades do vento abaixo de 10 m/s.

Sob condições de vento atípicas, é possível ter um α negativo, quando o cisalhamento vertical da velocidade do vento é revertido. A carga das pás se mantém aperfeiçoada, mas o torque do motor de passo é aumentado. O torque aumenta na medida em que as pás trabalham contra a gravidade, em vez de com ela.

Controle de Realimentação

O controle de realimentação é frequentemente preferível à pré-

alimentação. A figura 12 é um diagrama de blocos de um aparelho controlador à base de PID de realimentação, de acordo com a presente invenção. O aparelho mostrado na figura 12 compensa o desequilíbrio de momento em uma turbina de vento 300. O passo nominal das pás é controlado de uma
5 maneira convencional por um componente de comando 348, que usa a rpm real do gerador 338 para desenvolver um sinal de comando de passo de pás do rotor 354.

A modulação 345 do passo das pás é controlada pelo componente de lógica de compensação de momento 346. A lógica de conversão
10 346 é conectada às posições rotativas das pás 340, aos sensores de passo de pás 341, ao valor da velocidade do vento instantâneo 336, aos momentos de rotação, tombamento e das pás 342, e proporciona uma saída 345, que é um comando de modulação de passo calculada. A lógica de combinação 350, conectada ao comando de modulação de passo de pás calculada e ao
15 comando de passo coletivo 354, proporciona um comando de passo de pás combinado 356, capaz de comandar o passo das pás do rotor, que inclui a compensação para os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento.

A figura 13 é um diagrama de blocos de controlador à base de
20 espaço de estado de realimentação. O aparelho mostrado na figura 13 compensa o desequilíbrio de momento em uma turbina 500. Os sensores na turbina e na torre geram sinais no barramento 502, que incluem posições rotativas das pás 504, aceleração da torre 506, posição da torre 508, taxa do gerador 510, momentos de rotação, tombamento e das pás 509.

25 A lógica de estado estimado 516 usa as saídas dos sensores da turbina 500, que incluem a aceleração da torre 506, a posição da torre 507, a taxa do gerador 508 e o momento de tombamento 509, para estimar o estado 517.

Para definir os controles, a lógica 518 usa a entrada ajustada de
30 rpm 516 e o estado 517 para desenvolver o comando de modulação (vertical e horizontal) 505, o comando de passo coletivo 520 e o comando de torque 521.

As posições rotativas das pás 504 e o comando vertical 505 são introduzidos na lógica de conversão 507, que converte de componente fixo em cíclico, usando a transformada inversa de Coleman para desenvolver um comando de modulação de passo de pás 511.

5 A lógica de combinação 521, conectada ao comando de modulação de passo de pás 511 e ao comando de passo coletivo 520, proporciona um comando de passo de pás combinado 522 à turbina 500, que é capaz de comandar o passo das pás do rotor. O comando 522 inclui a compensação para desvios de momentos instantâneos da turbina de vento.

10 Ainda que a invenção tenha sido particularmente mostrada e descrita com referência às suas concretizações preferidas, aqueles versados na técnica vão entender que o que foi descrito acima e outras variações em forma e detalhes podem ser feitos na presente invenção, sem que se afaste do escopo da invenção.

REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho que compensa desequilíbrio de momento em uma turbina de vento, a turbina tendo um rotor com pelo menos duas pás de passos variáveis, o aparelho compreendendo:

5 uma lógica de comando de passo convencional (148), desenvolvendo um sinal de comando de passo de pás de rotor nominal (154);

 um sensor de momento (124, 125), sendo um ou mais de um sensor de momento de tombamento de nacela (124) e um sensor de momento de rotação (125), cuja saída é um sinal de momento (142, 143);

10 uma lógica de conversão (146) conectada ao dito sinal de momento (142, 143), uma saída da dita lógica de conversão sendo os comandos de modulação de passos individuais calculados (152) para cada uma das pás; e

 uma lógica de combinação (150) conectada para receber os di-
15 tos comandos de modulações de passos de pás calculadas (152) e para receber o dito comando de passo nominal (154), uma saída dos ditos comandos de passos de pás combinados individuais (156) para cada uma das pás, os comandos de passos de pás combinados individuais sendo gerados por modulação do sinal de comando nominal por um respectivo comando de
20 modulação de passo de pás, que inclui a compensação para desvios de momentos instantâneos da dita turbina de vento.

2. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, incluindo ainda pelo menos um sensor de deformação de pás, cuja saída é um sinal de componente de deformação, a lógica de conversão (146) sendo conectada
25 para receber o dito sinal de componente de deformação do dito pelo menos um sensor de deformação de pás.

3. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, no qual um armazenamento (144) armazena valores pré-calculados, todos os valores pré-calculados recebendo e sendo referidos por um ou mais conjuntos de sinais
30 recebidos pela lógica de combinação.

4. Aparelho de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, em que a dita lógica de conversão calcula os múltiplos comandos de

modulação de passo de pás individuais, um comando atribuído a cada uma das pás.

5 5. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, no qual a fonte do dito desequilíbrio de momento é um ou mais de cisalhamento eólico vertical, cisalhamento eólico horizontal, momento de pás e desalinhamento eólico.

6. Método de compensação de desequilíbrio de momento em uma turbina de vento, que usa um comando de passo nominal para controlar o passo de pás de rotor da dita turbina de vento, compreendendo as etapas de:

10 A. armazenar uma relação entre os vários valores de momentos instantâneos e uma modulação de passo que compensa os desvios do momento instantâneo de um valor de momento nominal;

B. monitorar um momento instantâneo da dita turbina de vento, resultando em um sinal de momento;

15 C. usar o dito sinal de momento para buscar um valor de momento instantâneo armazenado;

D. calcular uma modulação de passo de pás individuais para cada pá de rotor, para compensar o dito desequilíbrio de momento instantâneo, usando o dito valor de momento instantâneo;

20 E. combinar as ditas modulações de passos de pás calculadas com o dito comando de passo, resultando em um comando de passo combinado individual para cada uma das pás do rotor; e

25 F. usar os ditos comandos de passos combinados individuais para controlar o passo de cada uma das pás do rotor, para compensar os ditos desvios de momentos instantâneos da dita turbina de vento.

7. Método de acordo com a reivindicação 6, no qual a fonte do dito desequilíbrio de momento é um ou mais de cisalhamento eólico vertical, cisalhamento eólico horizontal, momento de pás e desalinhamento eólico.

FIG. 1

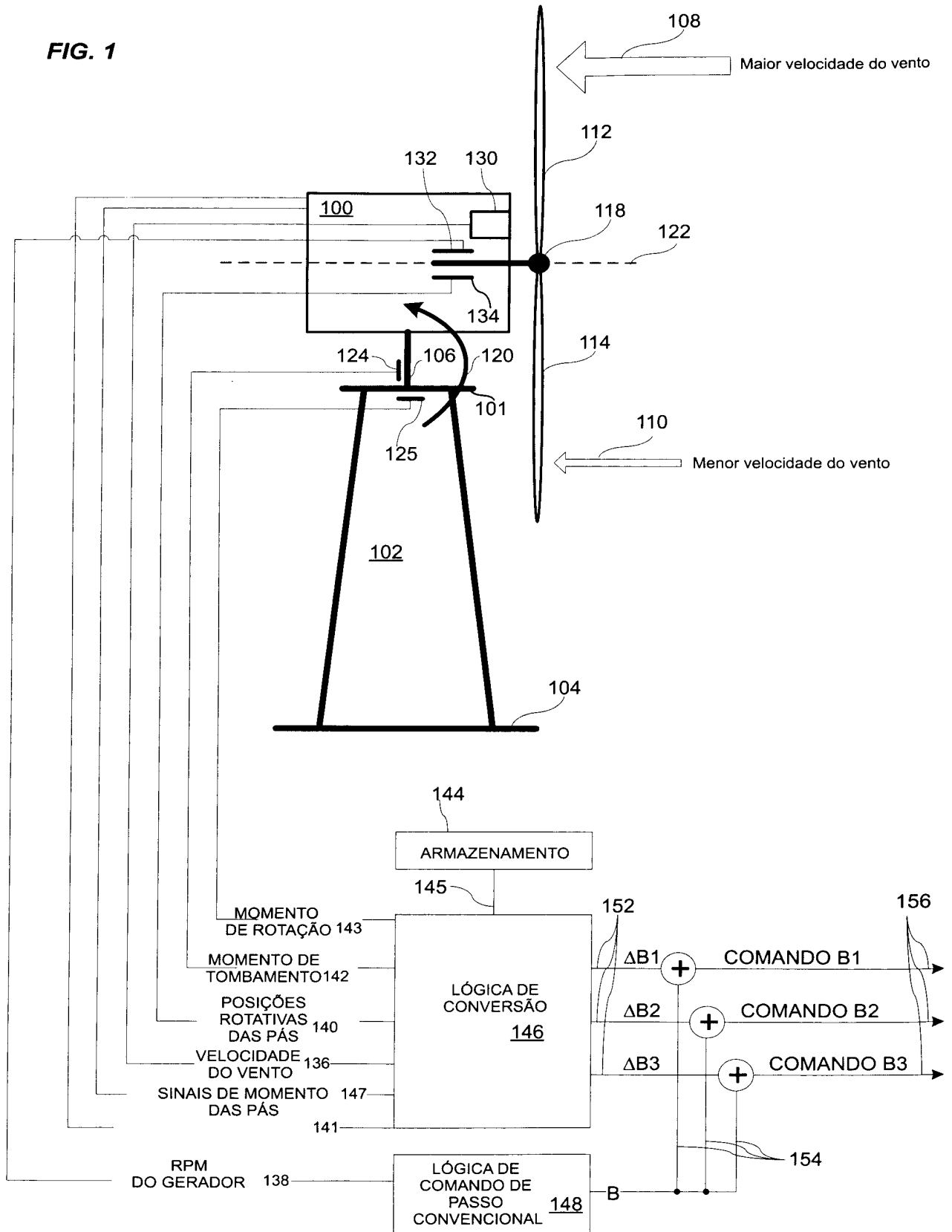


FIG. 2

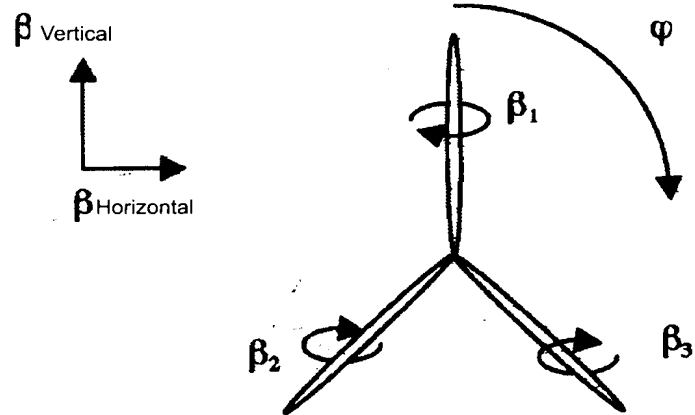


FIG. 3

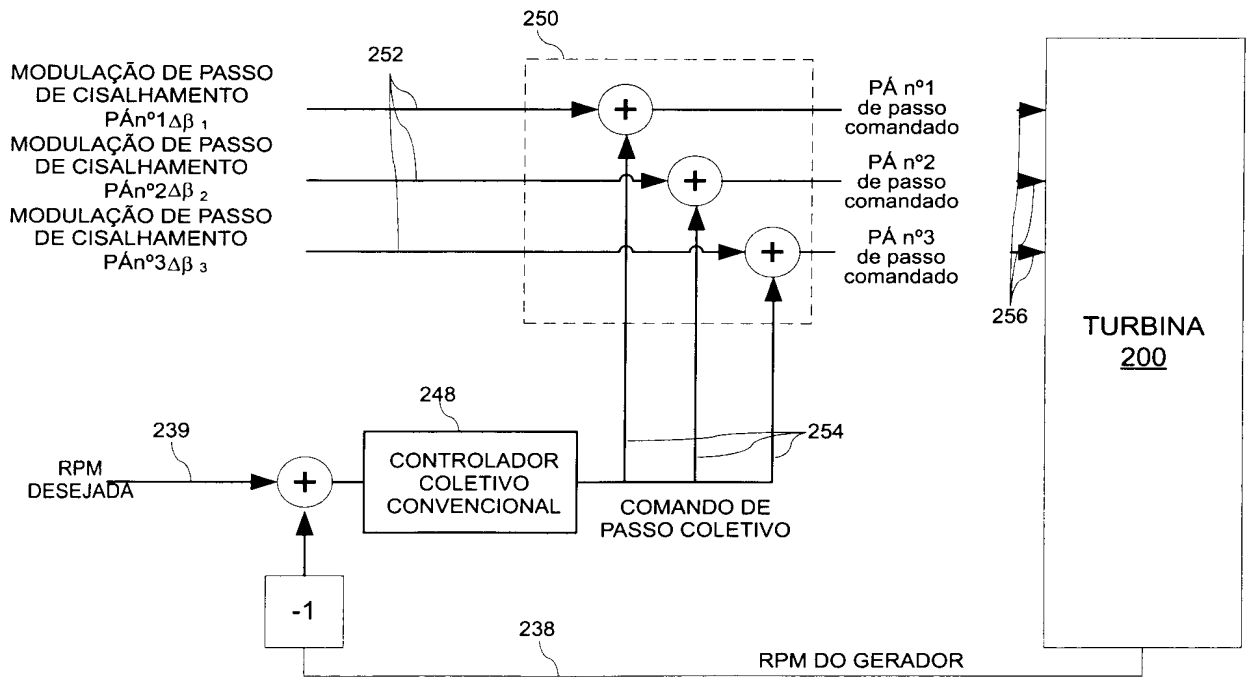


Fig. 4

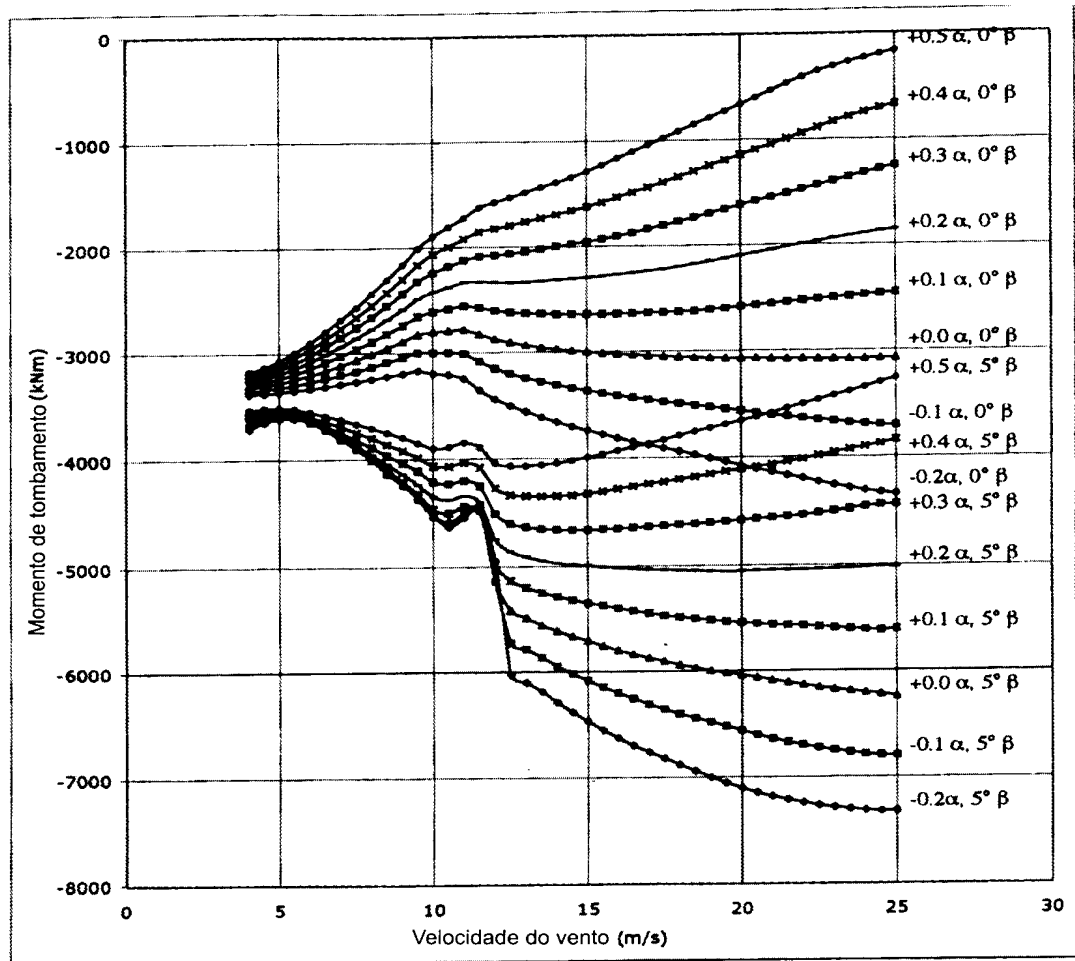


Fig. 5

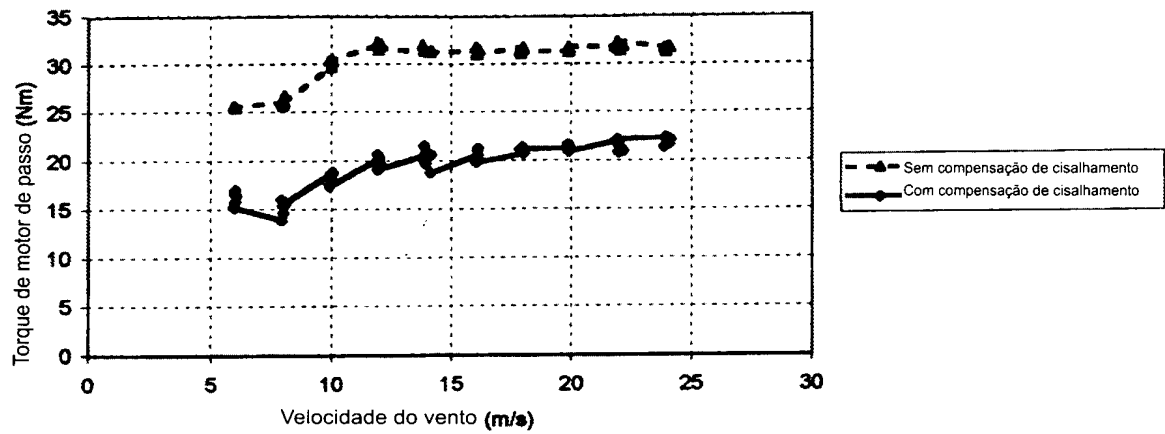


Fig. 6

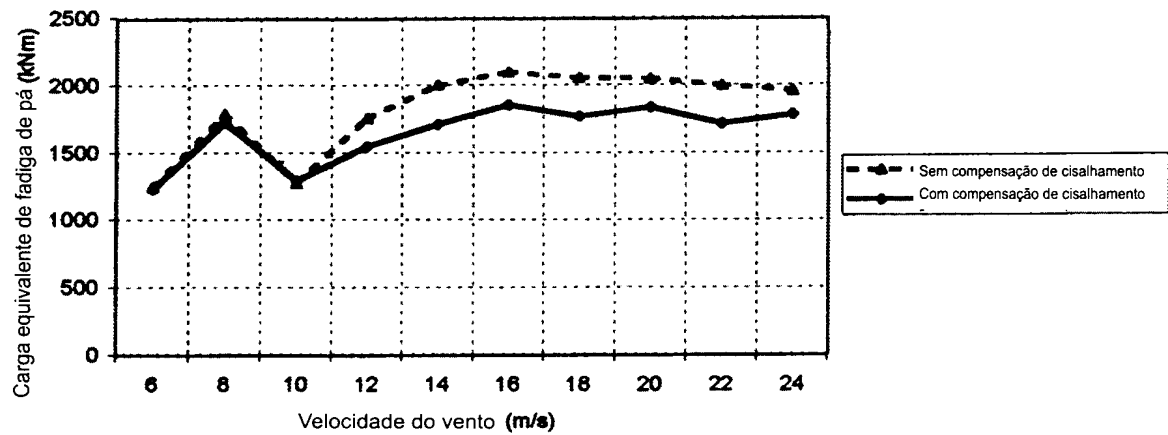


Fig. 7A

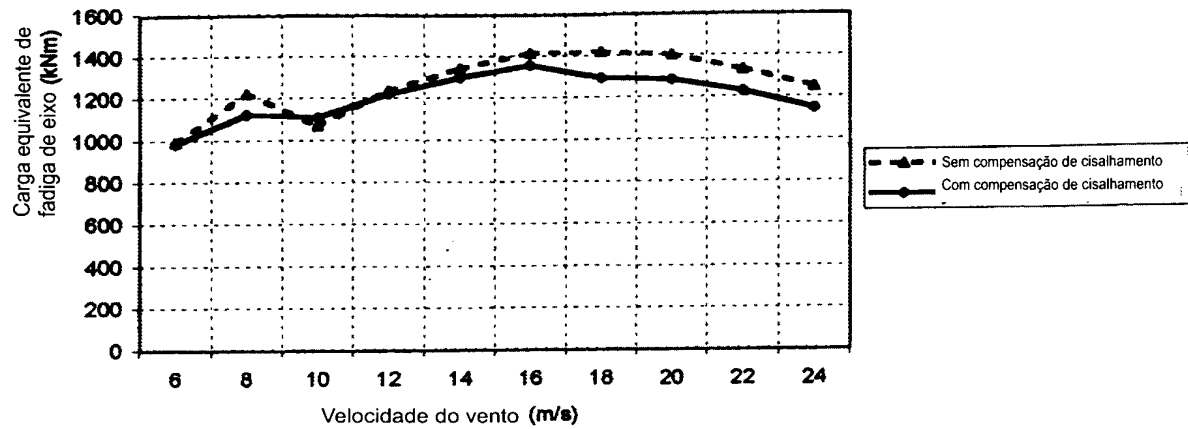


Fig. 7B

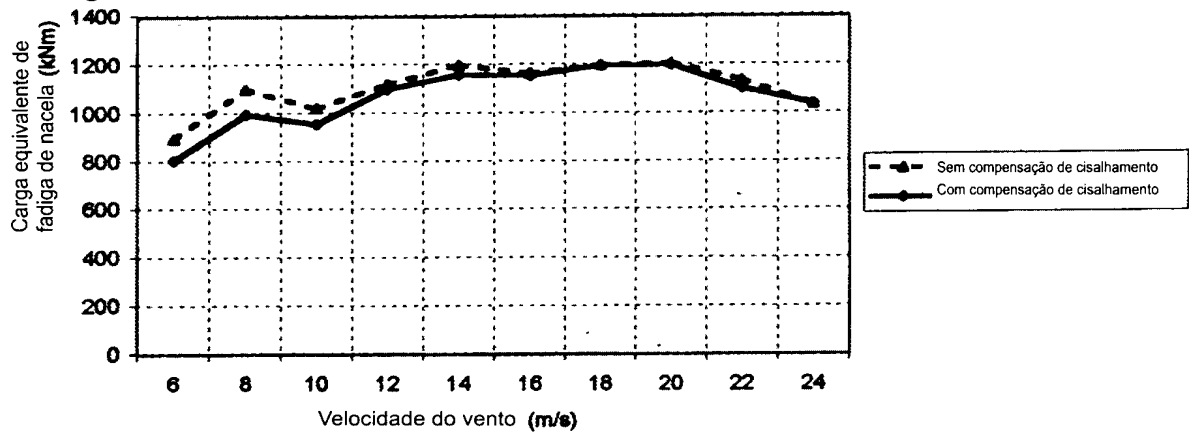


Fig. 7C

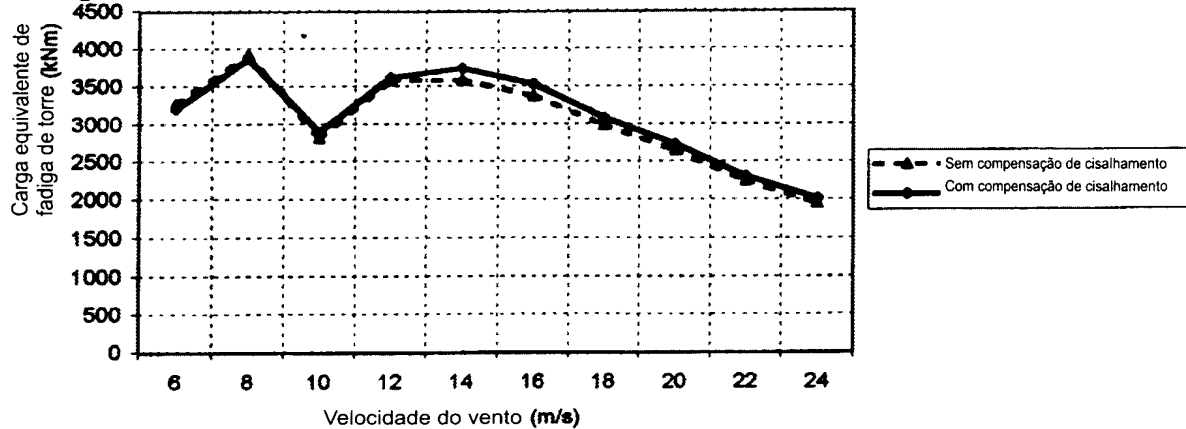


Fig. 8

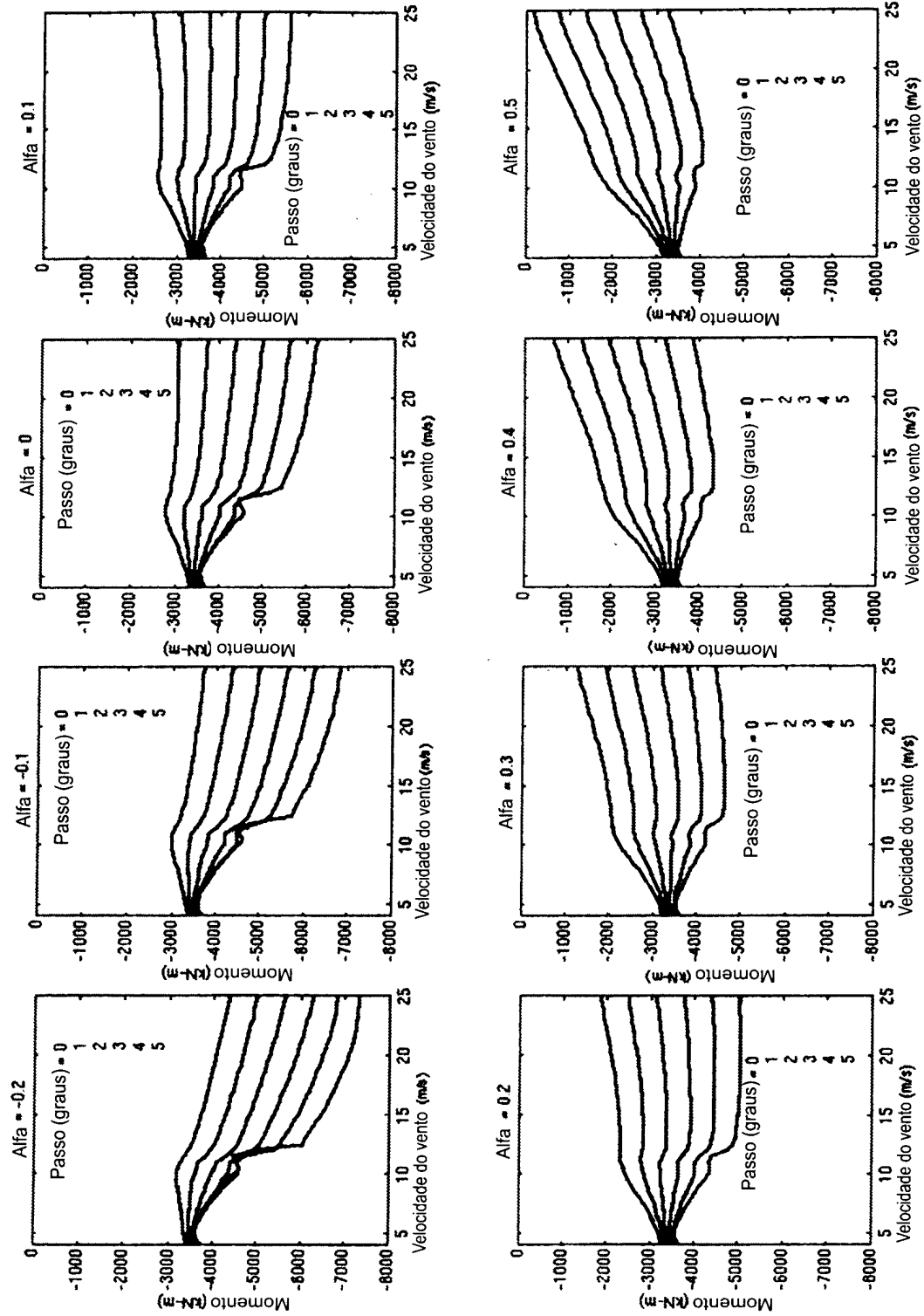


Fig. 9

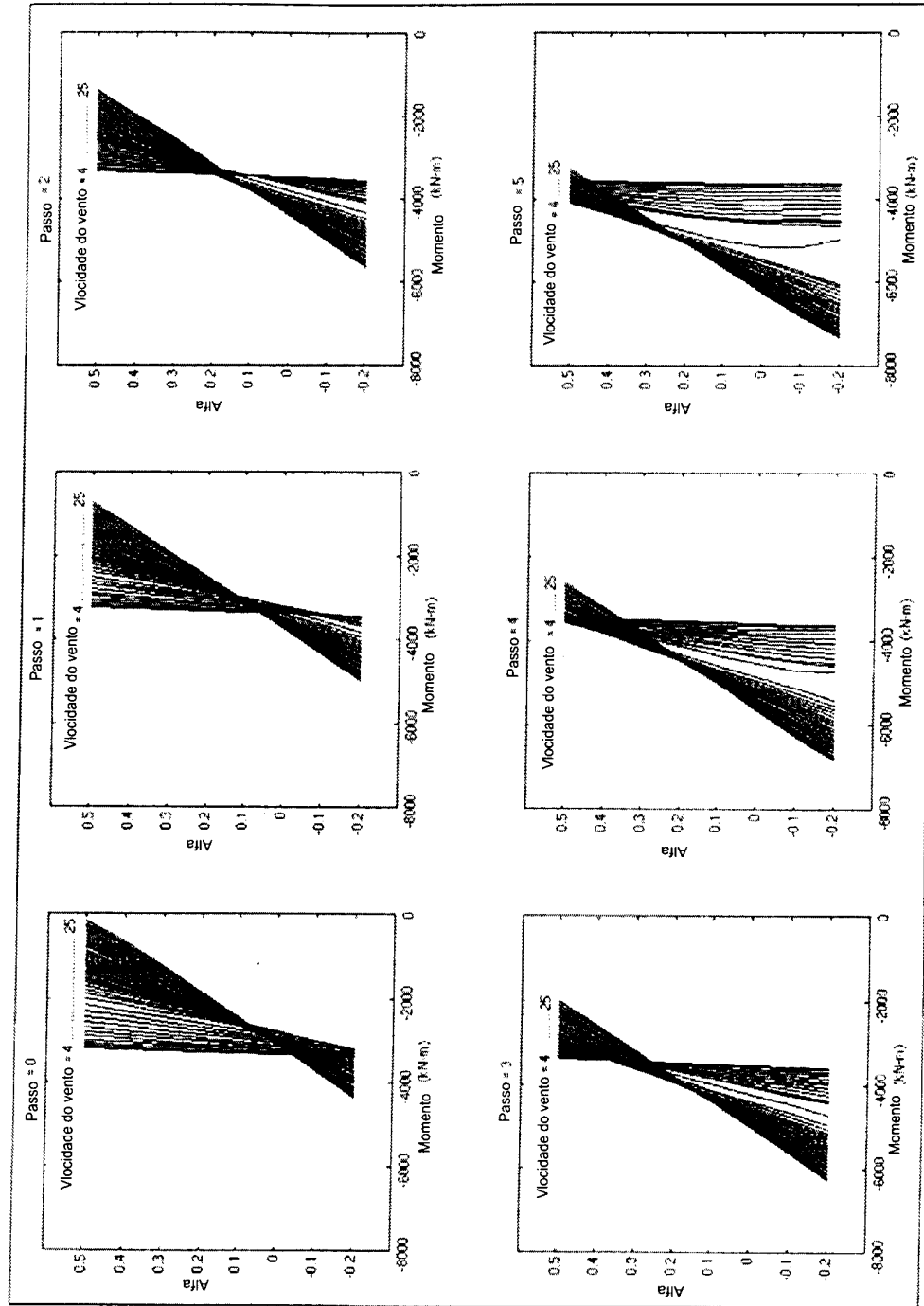


Fig. 10

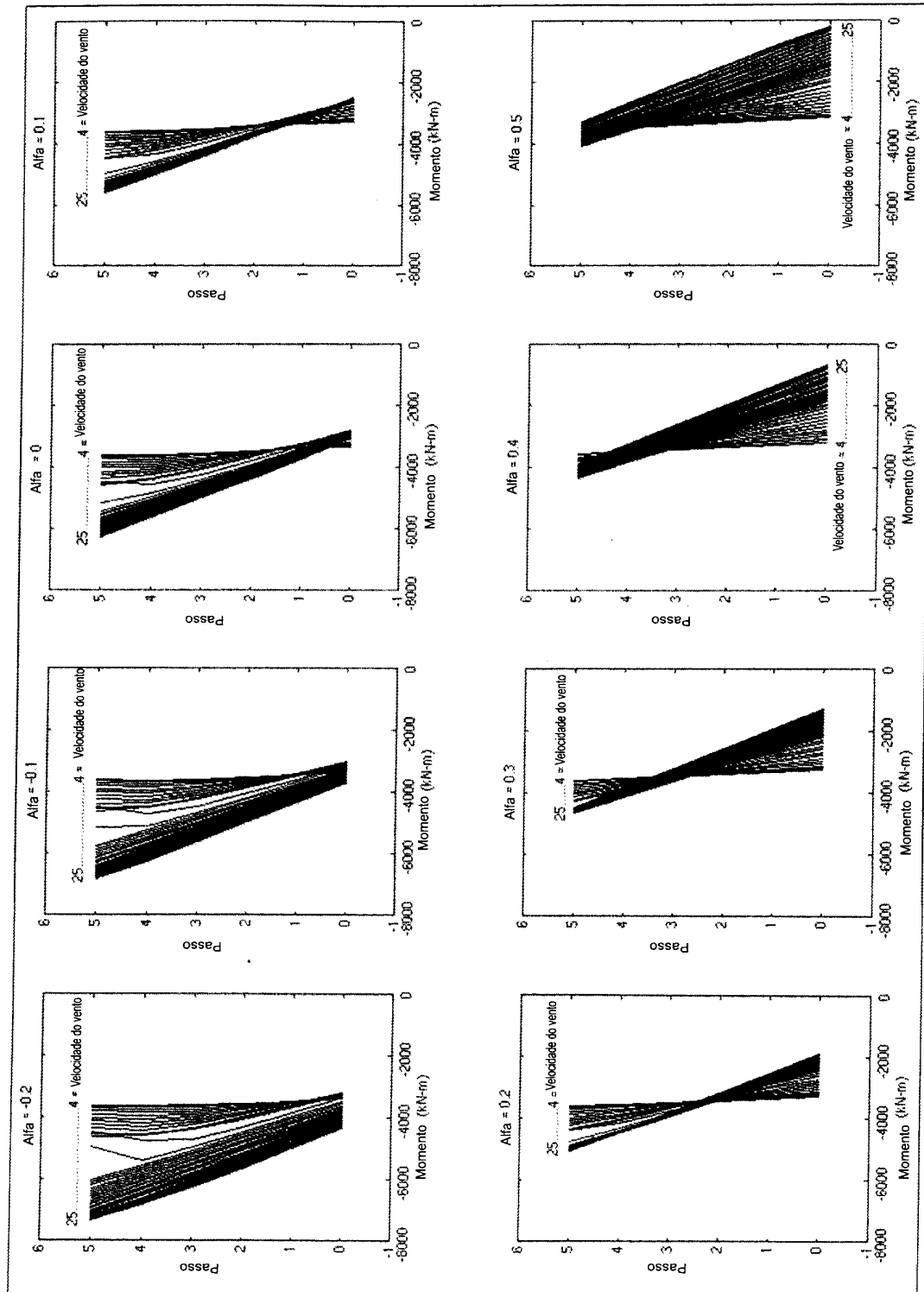


FIG. 11

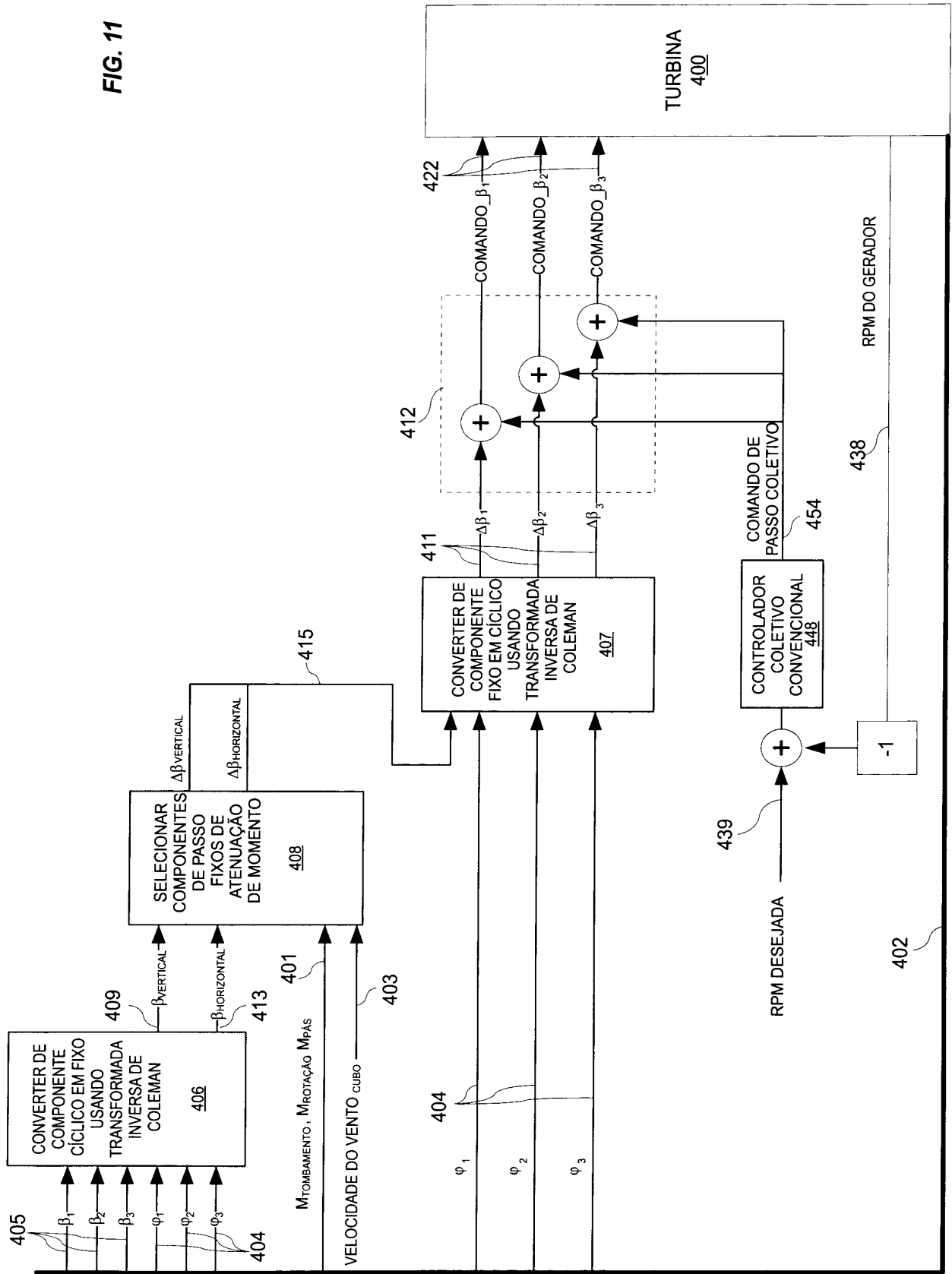


FIG. 12

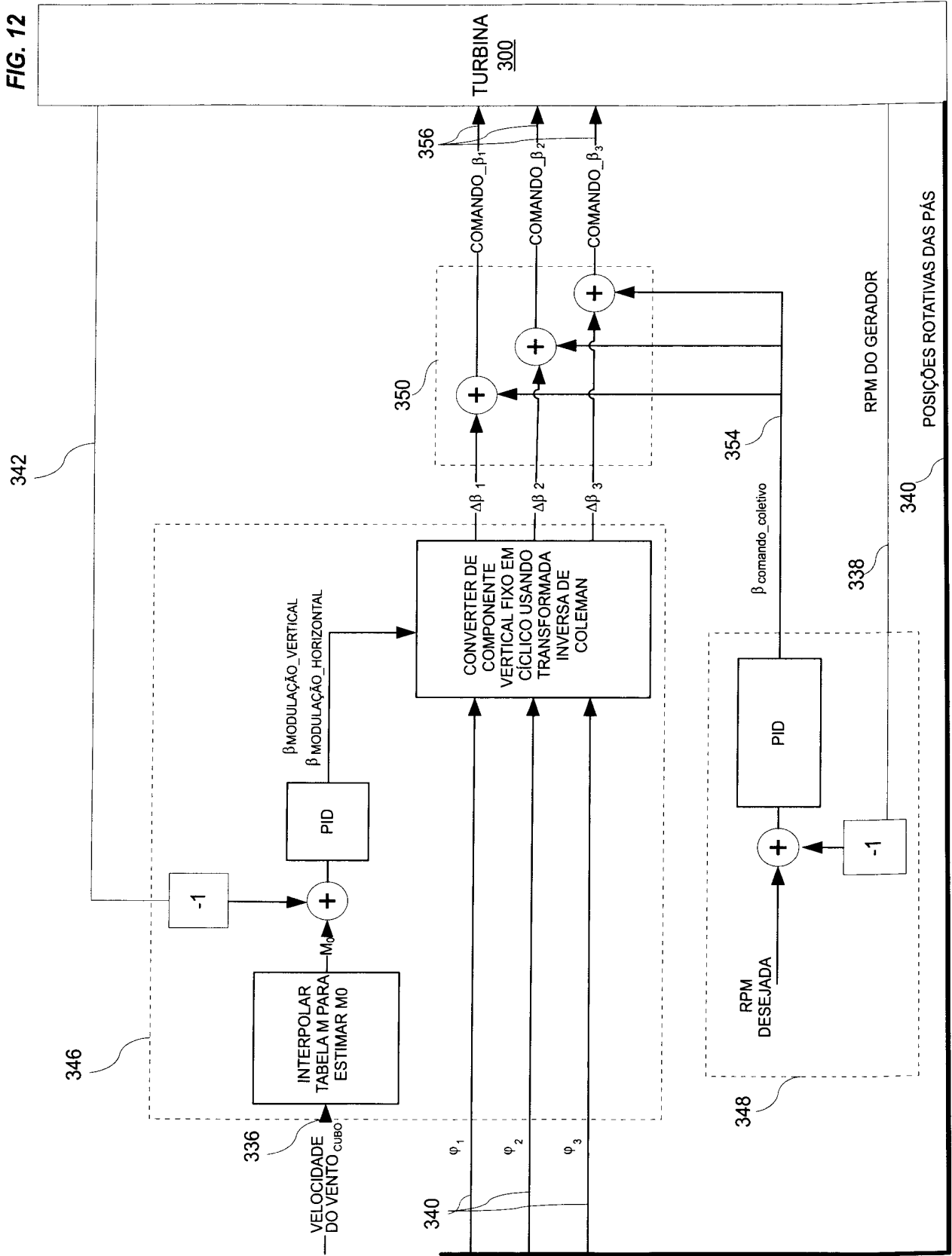
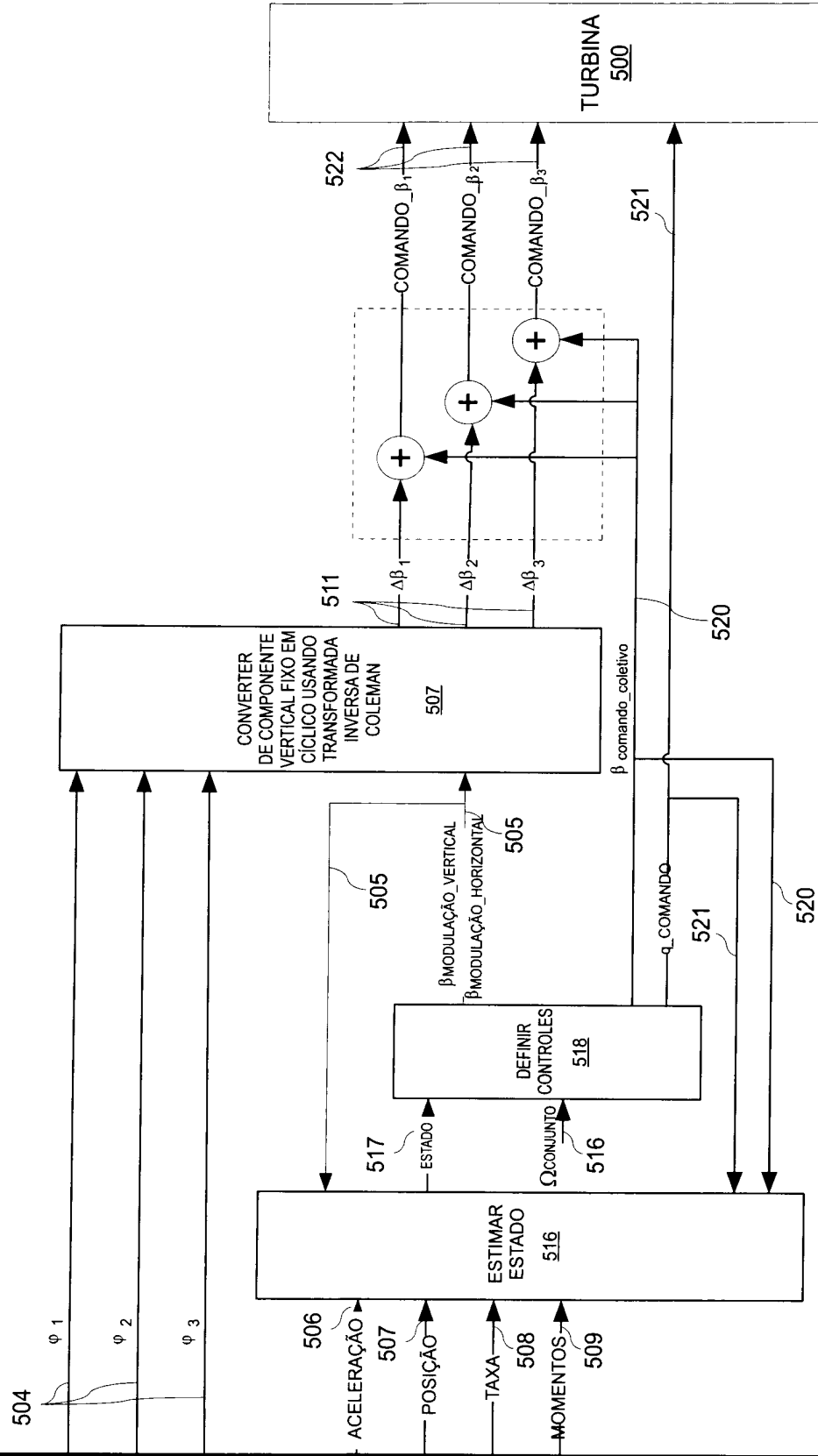


FIG. 13



502 POSIÇÕES ROTATIVAS DAS PÁS, ACELERAÇÃO DA TORRE, POSIÇÃO DA TORRE, TAXA DO GERADOR, MOMENTOS DE ROTAÇÃO, TOMBAMENTO E DAS PÁS

RESUMO

Patente de Invenção: **"TURBINA DE VENTO COM CONTROLE DE PASSO DE PÁ PARA COMPENSAR CISALHAMENTO EÓLICO E DESALINHAMENTO EÓLICO"**.

5 A presente invenção refere-se a um controle de carga de rotor de turbina de vento. O passo das pás é controlado de uma maneira convencional por um componente de comando, um sinal de comando de passo de pás de rotor. Um armazenamento contém valores armazenados de um conjunto de momentos para várias velocidades do vento. Um sensor de momento
10 proporciona uma saída de sinal de momento. Um indicador de velocidade de vento instantânea proporciona uma saída de valor de velocidade do vento instantânea. Uma lógica de conversão, conectada ao sinal de momento e ao valor de velocidade do vento instantânea, proporciona um comando de modulação de passo calculada. A lógica de combinação conectada ao comando
15 de modulação de passo de pás calculada e ao comando de passo coletivo, proporciona um comando de passo de pás combinado, que inclui a compensação para os desvios de momentos instantâneos da turbina de vento.