

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

(21) BR 10 2014 006252-1 A2



(22) Data de Depósito: 17/03/2014

(43) Data da Publicação: 16/12/2014
(RPI 2293)

(54) Título: BALANCEAMENTO DE PÁ

(51) Int.Cl.: F03D11/00

(30) Prioridade Unionista: 15/03/2013 US 13/837,313

(73) Titular(es): FRONTIER WIND, LLC

(72) Inventor(es): EDWARD A. MAYDA, ERICK J.
RICKARDS, JONATHON P. BAKER

(57) Resumo: ABSTRACT

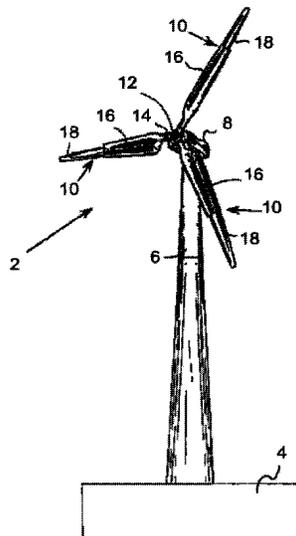
A system and method for pressure based load measurement are provided. The system and method measure at least one pressure differential on an airfoil and determine at least one aerodynamic load associated with the at least one pressure differential. The determined at least one load is used to modify characteristics of the airfoil to increase efficiency and/or avoid damage. The determined at least one aerodynamic load may be further utilized to balance and/or optimize loads at the airfoil, estimate a load distribution along the airfoil used to derive other metrics about the airfoil, and/or used in a distributed control system to increase efficiency and/or reduce damage to, e.g., one or more wind turbines.

Tradução do Resumo

RESUMO

Patente de Invenção: "BALANCEAMENTO DE PÁ".

Trata-se de um sistema e um método para a medição de carga com base na pressão. O sistema e o método medem pelo menos um diferencial de pressão em um aerofólio e determinam pelo menos uma carga aerodinâmica associada com pelo menos um diferencial de pressão. Pelo menos uma...



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"BALANCEAMENTO DE PÁ"**.

Campo Técnico

[001] Os aspectos referem-se ao balanceamento de pás em uma turbina eólica.

ANTECEDENTES

[002] A medição da carga em dispositivos mecânicos e eletrônicos é frequentemente usada para otimizar o desempenho. As cargas excessivas podem tensionar o sistema e resultar em danos ou uma menor eficiência. No campo da aerodinâmica, por exemplo, as pás ou as asas podem ser suscetíveis a cargas adicionais devido à direção e à magnitude do fluxo de ar. Similarmente, na hidrodinâmica, as cargas sustentadas do fluxo da água também podem afetar a eficiência e aumentar o potencial para danos. Para medir as cargas, vários tipos de sensores podem ser usados, incluindo calibres de pressão, calibres de tensão, sensores de força (por exemplo, transdutores) e outros ainda. Em alguns exemplos, a colocação de vários sensores pode afetar a precisão das medições da carga.

SUMÁRIO

[003] Esta descrição resumida é provida para introduzir uma seleção de conceitos em uma forma simplificada que são descritos mais adiante na Descrição Detalhada. A Descrição Resumida não se presta a identificar as características chaves ou características essenciais do objeto reivindicado, nem se presta a ser usada para limitar o âmbito do objeto reivindicado.

[004] Os aspectos aqui descritos referem-se à determinação ou à estimativa da carga em um dispositivo com base em várias colocações dos sensores no dispositivo. Em um exemplo, a determinação da carga aerodinâmica em uma pá da turbina ou asa do avião pode envolver a identificação da pressão barométrica (isto é, do ar ambiente), a tem-

peratura do ar ambiente, a velocidade do rotor, o ângulo do passo da pá, a localização radial dos sensores, e o ângulo de torção da pá. Ao usar esses fatores, uma carga aerodinâmica pode ser calculada ao usar um número predeterminado de sensores incluídos na pá. Por exemplo, dois sensores de pressão podem ser usados para determinar um diferencial de pressão. Com base no diferencial de pressão dos dois sensores e em um ou mais dos fatores observados acima, a carga aerodinâmica na pá pode ser determinada.

[005] De acordo com alguns aspectos da invenção, a determinação ou a estimativa de uma carga aerodinâmica em um membro de sustentação de carga aerodinâmica deve requerer somente a colocação de dois sensores de pressão no membro de sustentação de carga aerodinâmica. Outras entradas de dados usadas para calcular a carga aerodinâmica podem ser determinadas a partir dos sensores de pressão ou de outros sensores que não são montados sobre ou então não são incluídos na pá. Por exemplo, a temperatura do ar ambiente pode ser calculada ao usar um medidor de temperatura montado no rotor, na nacela, ou na torre.

[006] De acordo com outros aspectos da invenção, a determinação ou a estimativa de uma carga aerodinâmica pode ser usada para balancear as cargas nas pás de uma turbina eólica. Por exemplo, dois orifícios de detecção de pressão podem ser providos em cada pá de uma turbina eólica para determinar um diferencial de pressão. Ao usar o diferencial de pressão e outros fatores listados acima, uma carga pode ser estimada em cada pá. As cargas em cada pá podem ser comparadas para determinar se as cargas estão balanceadas entre as pás e/ou se as cargas em cada pá estão dentro de uma faixa ideal.

[007] De acordo com outros aspectos da invenção, a determinação ou a estimativa de uma carga aerodinâmica em um membro de sustentação de carga aerodinâmica podem se usada para determinar

ou estimar uma distribuição de carga ao longo do membro. A determinação de uma distribuição de carga ao longo do membro de sustentação de carga aerodinâmica pode ser usada para determinar outras métricas associadas com o membro incluindo, por exemplo, o deslocamento do membro de sustentação de carga, a velocidade do membro de sustentação de carga, a aceleração do membro de sustentação de carga, e um momento que age no membro de sustentação de carga.

[008] De acordo com outros aspectos da invenção, os sistemas de controle distribuídos podem ser usados dentro de uma turbina eólica ou entre múltiplas turbinas eólicas. Esses sistemas de controle distribuídos podem modificar uma ou mais características de cada turbina eólica em resposta à estimativa das cargas associadas com uma ou mais turbinas eólicas. Em uma modalidade, múltiplos controladores executam modificações desejadas de maneira tal que cada controlador pode agir como uma substituição ou reposição no evento da falha de um outro controlador. Em uma outra modalidade, um controlador pode modificar as características em resposta a um controlador em uma turbina eólica relacionada ao estimar uma carga na turbina eólica relacionada.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[009] A descrição resumida acima da invenção, bem como a descrição detalhada das modalidades ilustrativas a seguir, é mais bem compreendida quando lida conjuntamente com os desenhos anexos, os que são incluídos a título de exemplo, e não a título de limitação, no que diz respeito à invenção reivindicada.

[010] A FIG. 1 ilustra uma vista em perspectiva de uma turbina eólica de acordo com uma modalidade da invenção.

[011] A FIG. 2 ilustra uma seção transversal de um aerofólio que compreende um sistema de medição de carga baseado na pressão de

acordo com uma modalidade da invenção.

[012] A FIG. 3A ilustra um gráfico que ilustra um coeficiente de força normal versus um coeficiente de diferencial de pressão de acordo com uma modalidade da invenção.

[013] A FIG. 3B ilustra um gráfico que ilustra um coeficiente de força tangencial versus um coeficiente de diferencial de pressão de acordo com uma modalidade da invenção.

[014] A FIG. 4 ilustra as forças exemplificadoras que agem em um membro de sustentação de carga aerodinâmica de acordo com uma modalidade da invenção.

[015] A FIG. 5 ilustra um fluxograma de um método para determinar uma relação entre um coeficiente de força e um coeficiente de diferencial de pressão, bem como uma relação entre uma velocidade do rotor e/ou o ângulo de passo da pá e a velocidade do vento de acordo com uma modalidade da invenção.

[016] A FIG. 6 ilustra um fluxograma de um método para controlar uma ou mais características do aerofólio em resposta à determinação das cargas que agem no aerofólio de acordo com uma modalidade da invenção.

[017] A FIG. 7 ilustra a modificação de uma ou mais características de uma pá de turbina eólica de acordo com uma modalidade da invenção.

[018] A FIG. 8 ilustra um fluxograma para um método para balancear pás e/ou otimizar as cargas em uma turbina eólica de acordo com uma modalidade da invenção.

[019] A FIG. 9 ilustra um sistema de controle que determina uma distribuição de carga em um aerofólio de acordo com uma modalidade da invenção.

[020] A FIG. 10A ilustra uma distribuição de carga exemplificadora em uma pá de turbina eólica de acordo com uma modalidade da

invenção.

[021] A FIG. 10B ilustra uma outra distribuição de carga exemplificadora em uma pá de turbina eólica de acordo com uma modalidade da invenção.

[022] A FIG. 11 ilustra uma turbina eólica exemplificadora que compreende múltiplos controladores de acordo com uma modalidade da invenção.

[023] A FIG. 12 ilustra um sistema exemplificador de múltiplas turbinas eólicas com múltiplos controladores de acordo com uma modalidade da invenção.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[024] Na descrição de várias modalidades ilustrativas a seguir, é feita referência aos desenhos anexos, que fazem uma parte da mesma, e nos quais são mostradas, a título de ilustração, várias modalidades nas quais a invenção pode ser praticada. Deve ser compreendido que outras modalidades podem ser utilizadas e que as modificações estruturais e funcionais podem ser feitas sem que se desvie do âmbito da presente invenção.

[025] A Figura 1 ilustra uma turbina eólica 2 em uma fundação 4 com uma torre 6 que suporta uma nacela 8. Uma ou mais pás 10 são unidas a um cubo 12 através de um flange de parafuso 14. O cubo 12 é conectado a um trem de impulsão (não mostrado) dentro da nacela 8. Em um arranjo, as pás 10 podem ser pás de rotor de comprimento fixo que têm a parte da base 16 e a parte da ponta 18. Em um outro arranjo, as pás 10 podem ser pás de comprimento variável que têm uma parte da base 16 e uma parte da ponta 18. As pás de comprimento variável podem ser configuradas para se estender e retrair sob determinadas condições. Vários modos para controlar uma pá de comprimento variável podem ser usados para otimizar ou então aumentar a eficácia de tais pás e/ou de uma turbina tal como a turbina eólica 2 à

qual as pás são unidas. Qualquer sistema de impulsão desejável, tal como uma impulsão de rosca, um pistão/cilindro, ou um arranjo de polia/cábrea pode ser usado para mover a parte da ponta 18 com respeito à parte da base 16. Tais sistemas de impulsão são descritos na Patente U.S. nº. 6.902.370, intitulada "Turbina Eólica Telescópica" e depositada em 04 de junho de 2002, a qual é aqui incorporada a título de referência. A turbina eólica 2 também inclui um impulsor de guinada e um motor de guinada, e pode incluir um sistema de controle do passo, não mostrado. Além disso, ou alternativamente, as pás 10 podem incluir uma mistura de pás de rotor de comprimento variável e de comprimento fixo.

[026] De acordo ainda com outros aspectos, as pás 10 podem incluir um ou mais defletores de ar desdobráveis configurados para modificar o fluxo de ar ao se estenderem de uma superfície das pás 10. Em outras modalidades, características e/ou métodos adicionais (não mostrado) podem ser usados para modificar o fluxo de ar ao longo de uma pá. Por exemplo, o passo da pá pode ser modificado, um ou mais acionadores de plasma podem ser acionados, uma turbina eólica pode utilizar sucção ativa/sopro, uma ou mais aletas dispostas em uma pá podem ser ativadas, etc., a fim de modificar o fluxo de ar. A modificação do fluxo de ar pode resultar em aumento da elevação e/ou em diminuição na carga. Um controlador pode desse modo modificar a saída de potência, a eficiência, a carga e outros ainda ao usar os defletores de ar desdobráveis. Os exemplos de defletores de ar desdobráveis são descritos no Pedido de Patente U.S. nº. 12/122.584, intitulado "Turbina Eólica com Defletor de Ar de Compensação de Rajada" e depositado em 16 de maio de 2008, o qual é aqui incorporado a título de referência.

[027] A Figura 2 ilustra uma seção transversal exemplificadora de um aerofólio, tal como de uma asa de avião, uma pá de turbina eólica,

etc., tal como usado em conjunto com a presente invenção. O aerofólio inclui uma borda anterior 22, uma borda posterior 24, uma superfície superior 26, e uma superfície inferior 28. Uma linha da corda, c , pode ser definida como uma linha entre a borda anterior 22 e a borda posterior 24 do aerofólio 20. O aerofólio 20 mostrado na Figura 2 é meramente um desenho em seção transversal ilustrativo e deve ser reconhecido que infinitas variações na seção transversal podem ser usadas como a parte da presente invenção. O aerofólio 20 pode ser feito de qualquer construção e materiais apropriados, tais como fibra de vidro e/ou fibra de carbono.

[028] Com referência ainda à Figura 2, a pá 20 inclui orifícios em dois locais de detecção de pressão, P1 e P2. O orifício P1 fica localizado na superfície inferior 28 da pá 20 e P2 fica localizado na superfície superior 26 da pá 20. Um transdutor de pressão, 30, é provido para medir o diferencial de pressão entre os dois locais de detecção de pressão. Os locais 30a, 30b indicam lados opostos do diafragma do transdutor de pressão para determinar o diferencial de pressão entre cada ponto P1 e P2. Em um arranjo alternativo, múltiplos transdutores de pressão podem ser usados. A localização de P1 e P2 mostrada na Figura 2 é meramente ilustrativa de uma localização exemplificadora de cada orifício. A localização de P1 e P2 pode em geral ser dependente da pá 20 ou da geometria em seção transversal da asa. Em um exemplo, a localização dos sensores de pressão e portas pode corresponder a $0,125c$ e $0,150c$ nas superfícies da pressão e da sucção, respectivamente, onde c representa o comprimento da corda. Essa faixa pode, em alguns exemplos, ser preferível para reduzir o erro até dentro de um limite específico (por exemplo, 7%). Em algumas modalidades, P1 e P2 podem ser dispostos, por exemplo, entre 5% e 70% do comprimento da corda c , e, em algumas modalidades, ser dispostos, por exemplo, entre 10% e 60% do comprimento da corda c .

[029] Ao usar o diferencial de pressão entre P1 e P2, um controlador pode determinar várias cargas de uma pá incluindo uma carga de elevação, uma carga de força normal, uma carga de força tangencial, uma carga no plano (produtora de energia), e uma carga normal do rotor. Mais especificamente, as forças aerodinâmicas e os momentos gerados ao longo da extensão de uma pá são proporcionais a uma diferença em uma pressão entre dois pontos em uma superfície do aerofólio. Ao usar uma pressão dinâmica local determinada e o diferencial de pressão medido (isto é, a diferença nas pressões entre P1 e P2), as cargas que agem sobre uma pá podem ser determinadas de imediato. De modo geral, a pressão dinâmica local (ou o valor estimado da mesma) pode ser determinada ao usar a seguinte equação:

$$q_{est} \equiv \frac{1}{2} \rho_{\infty} v_{est}^2 \quad (1)$$

[030] onde ρ_{∞} corresponde à densidade do ar ambiente e v_{est} corresponde à velocidade do ar local estimada nos sensores de pressão. Para uma turbina eólica, uma estimativa da velocidade do ar do vento pode ser obtida ao usar a velocidade do rotor e a velocidade do vento, tal como definido na equação 2:

$$v_{est} \equiv \sqrt{\omega_{rotor}^2 r_{sensor}^2 + v_{wind, est}^2} \quad (2)$$

[031] Isto é, um valor estimado da velocidade do ar local na vizinhança dos sensores de pressão (v_{est}) pode ser calculado ao usar a velocidade do rotor (ω_{rotor}) conhecida, a posição radial dos sensores de pressão (r_{sensor}), e a velocidade do vento ($v_{wind, est}$). Em alguns exemplos, a velocidade do vento pode não ser diretamente mensurável (por exemplo, os sensores podem não ser usados ou incluídos na pá ou na turbina para medir a velocidade do vento). Em tais exemplos, a velocidade do vento pode ser determinada empiricamente ao usar a turbina eólica como um anemômetro. O seguinte jogo de equações estima a velocidade do vento com base na velocidade do rotor dependendo do

ângulo do passo da pá (β):

$$v_{\text{wind, est}} \approx \begin{cases} \kappa_{\omega 1} \omega_{\text{rotor}} + \kappa_{\omega 0} & \text{for } \beta = \beta_{\text{min}} \text{ (Region II)} \\ \kappa_{p 2} \beta^2 + \kappa_{p 1} \beta + \kappa_{p 0} & \text{for } \beta > \beta_{\text{min}} \text{ (Region III)} \end{cases} \quad (3)$$

[032] onde $\kappa_{\omega\#}$ e $\kappa_{p\#}$ representam os coeficientes empiricamente determinados e β representa o passo da pá que tem um mínimo de β_{min} . As regiões diferentes podem ter perfis de carga diferentes e desse modo requerem algoritmos ou fórmulas diferentes para determinar a carga estimada segundo as várias entradas de dados. Como um exemplo particular em que simulações foram feitas para 750 uma turbina ZOND™ de 750 kW com um rotor de 48 m que compreende três pás EUROS™, os seguintes coeficientes da Região II e da Região III foram determinados:

Region II	Region III
$\kappa_{\omega 1} = 2.913 \text{ m/rad}$ $\kappa_{\omega 0} = -0.094 \text{ m/s}$	$\kappa_{p 2} = 68.739 \text{ m/(s}\cdot\text{rad}^2)$ $\kappa_{p 1} = 14.307 \text{ m/(s}\cdot\text{rad)}$ $\kappa_{p 0} = 10.331 \text{ m/s}$

[033] Uma vez que a pressão dinâmica local tenha sido calculada, ela é usada para não dimensionalizar o diferencial de pressão medido, resultando em um coeficiente de diferencial de pressão ($C_{\Delta P}$) tal como detalhado na equação 4:

$$C_{\Delta P} \equiv \frac{\Delta p}{q_{\text{est}}}, \quad (4)$$

[034] Esse coeficiente de diferencial de pressão, junto com as constantes empiricamente determinadas, pode ser usado para estimar cada carga associada com a pá. Especificamente, em uma modalidade, a fim de calcular qualquer uma das cargas indicadas acima (por exemplo, a carga de elevação, a carga da força normal, a carga da força tangencial, a carga no plano) baseadas no diferencial de pressão medido, um coeficiente para cada força que corresponde a cada carga

é calculado ao usar o coeficiente do diferencial de pressão determinado. As equações 5, 6, e 7 são fórmulas exemplificadoras para calcular o coeficiente da força de elevação ($C_{t,est}$), o coeficiente da força normal ($C_{n,est}$), e o coeficiente da força tangencial ($C_{t,est}$), respectivamente. Em alguns arranjos, esses coeficientes podem representar coeficientes ou valores estimados e não o valor real.

$$C_{t,est} \equiv K_{t1} C_{\Delta p} + K_{t0}, \quad (5)$$

$$C_{n,est} \equiv K_{n1} C_{\Delta p} + K_{n0}, \quad (6)$$

$$C_{t,est} \equiv K_{t2} C_{\Delta p}^2 + K_{t1} C_{\Delta p} + K_{t0}, \quad (7)$$

[035] Nas equações 5, 6 e 7, cada um de $K_{t\#}$, $K_{n\#}$ e $K_{t\#}$ representa os coeficientes empíricos que podem depender da geometria da seção da pá local e das localizações de instalação do orifício de pressão. Tal como mostrado pelas equações 5, 6, e 7, o coeficiente de diferencial de pressão tem uma relação linear com o cada um dentre o coeficiente de força de elevação e o coeficiente de força normal, e tem uma relação quadrática com o coeficiente de força tangencial. Para determinar cada um dos coeficientes empíricos, a relação linear ou quadrática pode ser apropriada para os dados empíricos ou calculados coletados para o tipo de pá (por exemplo, geometria da seção da pá) e/ou localizações de instalação do sensor de pressão.

[036] A Figura 3A ilustra um ajuste linear exemplificador entre o coeficiente de diferencial de pressão ($C_{\square P}$) e o coeficiente de força normal (C_n) com base em dados empíricos para um tipo particular de localização de instalação da pá e do sensor. Por exemplo, as simulações e/ou os testes podem ser realizados em uma pá do tipo particular e ter os sensores de pressão localizados nas localizações de instalação do sensor. Os resultados dos testes e/ou da simulação podem então ser analisados para identificar uma relação linear entre $C_{\square P}$ e C_n . Em alguns arranjos, os algoritmos mais bem apropriados (por exemplo, menores quadrados) podem ser usados para computar a relação

entre o coeficiente de diferencial de pressão e cada um dos outros coeficientes.

[037] Similarmente, a Figura 3B ilustra uma relação quadrática exemplificadora entre o coeficiente de diferencial de pressão (C_{DP}) e o coeficiente de força tangencial (C_t). Outra vez, os dados coletados através de estudos empíricos e as análises podem ser usados para derivar a relação quadrática para um tipo particular de localização de instalação da pá e/ou do sensor de pressão.

[038] A Figura 4 é um diagrama que ilustra as forças exemplificadoras que agem sobre uma pá de rotor 401 junto com um vetor do vento 403 exemplificador. As forças ilustradas incluem a força resultante (R), a força de elevação (f_l), a força de arrasto (f_d), a força normal (f_n), a força tangencial (f_t), a força normal ao rotor (F_N), e a força tangencial ao rotor (F_T). Por exemplo, a força normal F_N é perpendicular ao plano 407 do rotor, ao passo que a força normal f_n é normal à linha de corda 405 da pá de rotor 401. As forças normais ao plano 407 do rotor podem ser usadas para determinar os momentos de flexão da base, o que contribui para a tensão na pá. Por conseguinte, controles podem ser implementados para minimizar os momentos de flexão da base ou para otimizar a saída de potência. Em um exemplo, a otimização da saída de potência pode incluir o balanceamento do momento de flexão da base enquanto são maximizadas as cargas produtoras de energia no plano. A modificação de momentos de flexão, cargas normais, cargas produtoras de energia e outras forças pode ser controlada em uma variedade de maneiras incluindo a alteração do passo ou guinada da pá, o desdobramento de defletores de ar, a extensão/retração de pás expansíveis e retráteis, e outros ainda, tal como descrito em mais detalhes a seguir.

[039] Ao usar os coeficientes de força de elevação, de força normal e de força tangencial estimados (tal como determinado, por exem-

plo, pelas equações 5, 6 e 7, respectivamente), e a pressão dinâmica local estimada (tal como determinado, por exemplo, pela equação 1), a carga de elevação (\mathcal{L}), a carga de força normal (η) e a carga de força tangencial (τ) podem ser estimadas com base nas seguintes equações:

$$\mathcal{L} \equiv q_{est} C_{l,est} \quad (8)$$

$$\eta \equiv q_{est} C_{n,est} \quad (9)$$

$$\tau \equiv q_{est} C_{t,est} \quad (10)$$

[040] As equações 8, 9 e 10 estimam as cargas aerodinâmicas no quadro de referência de corda fixa local. De modo geral, essas cargas podem ser traduzidas em outros quadros de referência se os ângulos de transformação apropriados forem conhecidos. Por exemplo, a carga normal ao plano do rotor pode ser calculada ao usar as cargas de força normal e de força tangencial determinadas do quadro de referência de corda fixa local com base na seguinte equação:

$$L_N \equiv \eta \cos(\theta_{sensor} + \beta) + \tau \sin(\theta_{sensor} + \beta) \quad (11)$$

[041] onde θ_{sensor} corresponde ao ângulo de torção da pá na localização do sensor e β corresponde ao ângulo de passo de pá (tal como discutido). De modo geral, os sensores superior e inferior ficarão localizados em posições radiais correspondentes em uma superfície superior e em uma superfície inferior da pá. Por conseguinte, o ângulo de torção da pá será o mesmo. Para calcular a carga normal no quadro de referência de corda fixa local, β é ajustado em zero.

[042] Similarmente, as cargas tangenciais relativas a vários quadros de referência podem ser calculadas com base nas cargas de força normal e de força tangencial determinadas (em relação ao quadro de referência de corda fixa local). Por exemplo, a equação de carga tangencial abaixo pode ser aplicada:

$$L_T \equiv \eta \sin(\theta_{sensor} + \beta) - \tau \cos(\theta_{sensor} + \beta) \quad (12)$$

[043] Outra vez, a carga tangencial no quadro de referência de corda fixa local pode ser calculada ao ajustar o ângulo de passo da pá β em zero.

[044] A Figura 5 ilustra um fluxograma de um método exemplificador para determinar empiricamente a relação entre cada coeficiente de carga e o coeficiente de diferencial de pressão, assim como para determinar empiricamente a relação entre a velocidade do rotor e/ou o ângulo de passo da pá e a velocidade do vento. Essas relações determinadas empiricamente podem ser usadas posteriormente quando forem determinadas as cargas em uma pá de turbina eólica ao usar um único diferencial de pressão tal como discutido de maneira mais ampla a seguir.

[045] Na etapa 500, um sistema de computação pode coletar, receber ou então determinar a informação da carga gerada com base nos testes empíricos e nas análises (por exemplo, simulações, testes de campo, dados para as turbinas em operação, etc.). O sistema de computação pode compreender um controlador para modificar ou então ajustar as características de uma turbina eólica, um aerofólio, dispositivos em ou sobre um aerofólio, jogos de turbinas eólicas e outros ainda e/ou as suas combinações. O sistema de computação pode corresponder a um controlador para um dispositivo defletor de ar em um ou mais exemplos. Além disso, ou alternativamente, o sistema de computação pode corresponder a um controlador para uma pá inteira. Em ainda outros exemplos, o sistema de computação pode ser configurado para controlar todos ou um subconjunto de dispositivos dentro de uma turbina eólica. Em ainda um outro exemplo, o sistema de computação pode ser configurado para controlar múltiplas turbinas eólicas. Ao usar os dados de carga coletados, os coeficientes de força de elevação (C_l), de força normal (C_n), de força tangencial (C_t), e de diferencial de pressão ($C_{\square P}$) podem ser calculados ou então determinados na

etapa 505. Por exemplo, o coeficiente de diferencial de pressão pode ser calculado a partir da informação de carga recebida com base na equação:

$$C_{dp} = \frac{p - p_{\infty}}{q_{\infty}} \quad (13)$$

[046] onde p é a pressão local medida na superfície da pá, p_{∞} é a pressão barométrica (isto é, a pressão do ar ambiente), e q_{∞} é a pressão dinâmica. A pressão dinâmica pode ser calculada ao usar a seguinte equação:

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho_{\infty} v_{\infty}^2 \quad (14)$$

[047] onde ρ_{∞} é a densidade do ar ambiente e v_{∞} é a velocidade do ar ambiente. A densidade do ar ambiente pode ser determinada de acordo com a lei de gás perfeito ao usar a temperatura do ar ambiente (T_{∞}) e a constante de gás para o ar seco (R_{air} , que tem um valor de 287 J/(kg K)), de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_{\infty} = \frac{p_{\infty}}{R_{\text{air}} T_{\infty}} \quad (15)$$

[048] Um coeficiente para cada força pode ser calculado a partir da informação da carga recebida e da pressão dinâmica determinada com base na equação:

$$C_F = \frac{F}{A q_{\infty}} \quad (16)$$

[049] onde F é a força associada com o coeficiente que está sendo calculado (por exemplo, de elevação, normal, tangencial, etc.), e A é a área nominal sobre a qual a força está agindo (definida como Π vezes o diâmetro nominal ao quadrado, todos divididos por quatro). Por exemplo, com respeito à elevação, a área nominal sobre a qual a força de elevação está agindo pode ser, por exemplo, a área planifor-

me da pá.

[050] Com a determinação de cada um desses coeficientes, as relações podem ser derivadas ou então determinadas entre o coeficiente de diferencial de pressão e cada um dentre o coeficiente de elevação, o coeficiente de força normal e o coeficiente de força tangencial na etapa 510. Tal como discutido acima e ilustrado na Figura 3A e na Figura 3B, a relação pode ser, por exemplo, uma relação linear ou uma relação quadrática e pode ser determinada ao usar algoritmos mais bem apropriados tais como os menores quadrados e outros ainda. Em um exemplo, os coeficientes de elevação e de força normal podem ter uma relação linear com o coeficiente de diferencial de pressão, ao passo que o coeficiente de força tangencial pode ter uma relação quadrática com o coeficiente de diferencial de pressão. Na etapa 515, as constantes (por exemplo, $K_{\#}$, $K_{n\#}$, e $K_{t\#}$) resultantes das relações determinadas podem ser extraídas e armazenadas. Por exemplo, as constantes podem ser armazenadas em um dispositivo de armazenamento em um aerofólio, em uma turbina, ou em um controlador central configurado para controlar múltiplas turbinas.

[051] Na etapa 520, o sistema também pode coletar (por exemplo, receber) ou então determinar dados da velocidade do vento medida (V_{wind}), informações da velocidade do rotor detectada (ω_{rotor}), e o ângulo de passo da pá (β). Essas informações podem ser medidas, em alguns exemplos, durante os testes empíricos e/ou as simulações. Ao usar os dados coletados, o sistema pode, na etapa 525, determinar (por exemplo, calcular) as relações entre os dados da velocidade do vento e um ou mais dentre a velocidade do rotor e o ângulo de passo da pá. Por exemplo, uma primeira relação pode ser definida para um ângulo de passo de pá mínimo (β_{min}) da pá do rotor, ao passo que uma segunda relação pode ser determinada para ângulos de passo da pá acima do ângulo de passo de pá mínimo. Os exemplos das várias re-

lações são mostrados no jogo de equações 3. Essas relações (entre a velocidade do vento e a velocidade do rotor e/ou o ângulo de passo da pá), tal como com as relações do coeficiente de diferencial de pressão, podem ser determinadas ao usar dados empíricos algoritmos mais bem apropriados tais como os menores quadrados. Uma vez que as relações tenham sido determinadas, as constantes para as relações da velocidade do vento podem então ser extraídas e armazenadas na etapa 530 para o uso subsequente.

[052] Com a identificação das várias relações entre coeficientes de carga e coeficientes de diferencial de pressão, e entre a velocidade do rotor e os ângulos de passo da pá e a velocidade do vento, um sistema de controle da turbina pode modificar apropriadamente modificar as características da pá e da turbina em resposta à compensação ou então o enfoque em várias cargas e condições de carga. Em um exemplo, um sistema de controle da turbina pode modificar características da pá ou da turbina tais como o desdobramento/a retração de defletores de ar em uma pá, a extensão/a retração de uma parte da ponta de uma pá, a modificação dos ângulos de passo e/ou de guinada, e outros ainda. Em alguns exemplos, o sistema de controle da turbina pode modificar as características da pá para otimizar a razão entre a elevação e o arrasto, tal como descrito em mais detalhes a seguir.

[053] A Figura 6 ilustra um método exemplificador para controlar uma ou mais características da pá e da turbina com base nas determinações da carga, tais como aquelas feitas de acordo com os aspectos aqui descritos (por exemplo, ao usar um único diferencial de pressão). Um ou mais sistemas de controle podem ser usados para controlar as características da pá e/ou da turbina. O(s) sistema(s) de controle pode(m) ficar localizado(s) na pá, na turbina, ou em uma sala de controle distante da turbina. O sistema de controle também pode ser configurado para controlar um único dispositivo (por exemplo, um único defletor

de ar, uma única pá do rotor, uma única turbina) ou múltiplos dispositivos (por exemplo, múltiplos defletores de ar, múltiplas pás do rotor, múltiplas turbinas). Na etapa 600, o sistema de controle pode receber ou determinar dados do sensor de pressão de um par de orifícios de pressão em uma pá enquanto a turbina estiver na operação. Em um exemplo, os dados podem ser fornecidos sem fio ou através de conexões de fios e/ou ao usar uma ou mais redes públicas ou privadas. Na etapa 605, o sistema de controle pode determinar o diferencial de pressão (Δp) entre as leituras do sensor de pressão dos dois orifícios de detecção de pressão (por exemplo, P1 e P2 em figura 2), uma velocidade do rotor (ω_{rotor}), a pressão barométrica (isto é, a pressão do ar ambiente) (p_{∞}), a temperatura do ar ambiente (T_{∞}), e um ângulo de passo da pá (por exemplo, positivo rumo à pena, β). Em vários arranjos, o sistema de controle pode determinar pelo menos dois dentre a velocidade do rotor (ω_{rotor}), a pressão barométrica (isto é, a pressão do ar ambiente) (p_{∞}), a temperatura do ar ambiente (T_{∞}), e um ângulo de passo da pá (por exemplo, positivo rumo à pena, β). Em outros exemplos, o sistema de controle só pode determinar uma das características acima mencionadas.

[054] Na etapa 610, o sistema de controle pode determinar a velocidade do ar local (v_{est}). A velocidade do ar local, tal como mostrado na equação 2, pode ser determinada com base em uma ou mais dentre a velocidade do vento estimada ($v_{\text{wind.est}}$), a velocidade do rotor e a localização radial dos sensores (r_{sensor}), e/ou as suas combinações. Em alguns arranjos, a localização do sensor pode ser previamente definida e previamente armazenada (por exemplo, determinada no momento de instalação na pá). A velocidade do vento estimada, por sua vez, pode ser calculada com base na velocidade do rotor e/ou no ângulo de passo da pá tal como mostrado no jogo de equações 3. Em um exemplo particular, o sistema de controle pode determinar se o ângulo de

passo da pá está acima de um ângulo de passo de pá mínimo previamente definido (β_{\min}), tal como observado acima. Em caso positivo, um primeiro algoritmo de determinação ou fórmula pode ser usado para gerar a velocidade do vento estimada. Se, no entanto, o ângulo de passo da pá for igual ao ângulo mínimo, o sistema de controle pode aplicar um segundo algoritmo ou fórmula para gerar a velocidade do vento estimada.

[055] Ao usar a velocidade do ar local, o sistema de controle pode determinar a pressão dinâmica local na etapa 615 de acordo com, por exemplo, a equação 1 mostrada acima. A densidade do ar ambiente (ρ_{∞}) pode ser calculada com base na lei de gás perfeito ao usar a pressão barométrica (isto é, a pressão do ar ambiente) (p_{∞}), a constante de gás para o ar seco (R_{air}) e a temperatura do ar ambiente (T_{∞}) de acordo com a equação 15. Ao usar o diferencial de pressão recebido na etapa 600 e a pressão dinâmica local determinada na etapa 615, o coeficiente de diferencial de pressão pode então ser calculado pelo sistema de controle na etapa 620. Por exemplo, um coeficiente de diferencial de pressão estimado pode ser determinado ao usar a equação 4. Nas etapas 625-635, o coeficiente de diferencial de pressão determinado pode então ser usado para determinar as cargas desejadas. Especificamente, na etapa 625 o sistema de controle pode recuperar as constantes determinadas para cada uma das várias relações entre o coeficiente de carga e o coeficiente de diferencial de pressão determinadas, extraídas e armazenadas na etapa 515 do fluxograma na Figura 5. Ao usar as constantes recuperadas e o tipo de relação de coeficiente para coeficiente, na etapa 630 o sistema de controle podem então estimar cada um dos coeficientes de carga de elevação, normal e tangencial com base, por exemplo, nas equações 5, 6 e 7, respectivamente. As cargas podem então ser derivadas com base em cada um dos coeficientes e na pressão dinâmica local na etapa 635.

Por exemplo, a carga de elevação (\mathcal{L}) pode ser calculada ao multiplicar a pressão dinâmica local com o coeficiente da carga de elevação tal como apresentado na equação 8. Similarmente, a carga de força normal (η) e a carga de força tangencial (τ) podem ser determinadas ao multiplicar a pressão dinâmica local com o coeficiente de carga de força normal e de carga de força tangencial, respectivamente, tal como apresentado nas equações 9 e 10. A carga normal ao rotor (L_N) e a carga tangente ao rotor (L_T) também podem ser calculadas ao usar, por exemplo, as equações 11 e 12, respectivamente.

[056] Uma vez que as cargas tenham sido determinadas, o sistema de controle pode comparar uma ou mais das cargas aos limites de cargas especificados para determinar se as cargas excederem, coincidem, ou caem abaixo dos limites na etapa 640. Dependendo dos resultados da comparação, o sistema de controle pode modificar uma ou mais das características da pá ou da turbina na etapa 645. Por exemplo, se a carga normal ao rotor exceder um limite especificado, o sistema de controle pode desdobrar um ou mais defletores de ar na pá para reduzir a solicitação e a tensão na pá. Em um outro exemplo, se a carga tangente ao rotor cair abaixo de um limite especificado, o sistema de controle pode modificar um passo da pá para aumentar a carga tangente ao rotor (por exemplo, para aumentar a produção de energia). Em outros exemplos, os controles podem ser baseados em uma combinação de cargas tais como a carga normal ao rotor e a carga tangente ao rotor. Em particular, o sistema de controle pode modificar as características da pá e da turbina para otimizar a relação entre a carga tangente ao rotor e a carga normal ao rotor.

[057] De acordo com alguns arranjos, o perfil da carga e os vários coeficientes estimados usados para determinar uma carga com base em uma única leitura do diferencial de pressão (por exemplo, os coeficientes de força normal, tangencial e de elevação descritos aci-

ma), podem mudar dependendo das características da pá ou da turbina. Por exemplo, coeficientes diferentes e/ou correlações lineares ou quadráticas diferentes podem ser definidos para jogos diferentes de características da pá ou da turbina. Em um exemplo particular, uma primeira correlação/relação pode ser definida e usada para determinar a carga se um primeiro jogo de um ou mais defletores de ar for desdobrado, ao passo que uma segunda correlação/relação pode ser definida e usada se um segundo jogo de um ou mais defletores de ar for desdobrado (ou se nenhum defletor de ar for desdobrado). Similarmente, passos ou guinadas diferentes (ou as suas combinações) também podem afetar a correlação/relação definida e usada para determinar a carga. Por conseguinte, um sistema de controle pode armazenar uma variedade de equações/relações de determinação de carga diferentes e selecionar automaticamente a relação apropriada dependendo das características atualmente existentes da pá e/ou da turbina quando a carga deve ser determinada.

[058] A seleção da equação/relação a ser usada na determinação da carga pode ser feita com base na minimização de uma quantidade estimada de erro. Por exemplo, se uma equação ou uma relação não for definida para um jogo atual de parâmetros da turbina (por exemplo, o(s) defletor(es) particular(es) ativado(s), o ângulo do passo ou de guinada, e/ou as suas combinações), um sistema de controle pode selecionar uma relação para um outro jogo de parâmetros da turbina que deve resultar na menor quantidade estimada de erro para o jogo atual de parâmetros da turbina. O erro ao usar uma relação definido para um primeiro jogo de parâmetros da turbina para calcular a carga para um segundo jogo de parâmetros da turbina pode ser estimado ao usar uma variedade de métodos, incluindo testes empíricos.

[059] Ao usar técnicas de determinação de carga tais como aquelas aqui descritas, um sistema de controle da turbina também pode

executar o balanceamento e/ou a otimização da pá. Em um exemplo, uma ou mais pás da turbina podem ser ajustada para balancear as cargas detectadas entre todas as pás. Por conseguinte, se uma pá estiver experimentando cargas mais elevadas do que outras pás, uma ou mais características da uma pá podem ser ajustadas para baixar a carga até o nível detectado pelas outras pás. Por exemplo, um passo ou uma guinada da pá de carga mais elevada pode ser ajustado e/ou defletores de ar na pá de carga elevada podem ser desdobrados. Em outros exemplos, se a pá for uma pá de comprimento variável, uma parte da ponta pode ser estendida ou retraída para modificar as cargas eficazes. Pás individuais ou grupos de pás (por exemplo, menos de todas as pás, subgrupos predefinidos de pás, etc.) podem ser controladas separadamente das outras pás.

[060] As cargas determinadas também podem ser usadas para otimizar várias características da operação da turbina. Por exemplo, a razão entre elevação e arrasto de uma ou mais pás pode ser otimizada para maximizar a geração de energia. Desse modo, em um exemplo particular, o passo de uma pá pode ser modificado para aumentar a razão entre elevação e arrasto, aumentando desse modo a geração de energia. Outra vez, tal como com o balanceamento da pá, cada pá individual pode ser controlada separadamente das outras pás. Além disso, ou alternativamente, subgrupos de pás podem ser definidos e controlados em conjunto separadamente de outras pás ou subgrupos de pás. O controle da turbina também pode incluir a avaliação das fatias da trajetória da pá. Por conseguinte, se for determinado que uma fatia da trajetória da pá for deve experimentar uma carga mais elevada do que outras partes da trajetória da pá, um sistema de controle pode modificar, por exemplo, a guinada da turbina para compensar e equalizar as cargas.

[061] O balanceamento e a otimização da operação da turbina

podem ser executados durante a operação ou durante um estado de paralisação da turbina. Por conseguinte, uma turbina pode ser controlada continuamente, em momentos predefinidos, ou com a detecção de uma condição (por exemplo, a razão elevação-arrasto está abaixo de um limite especificado) durante a operação para assegurar que a geração de energia seja maximizada e/ou outros objetivos sejam atingidos. A capacidade de balancear e modificar as características da pá depois da instalação elimina a necessidade de remover as pás ou de desmontar outras partes da turbina a fim de balancear o desempenho e outros ajustes.

[062] A Figura 7 ilustra uma modalidade em que um sistema de controle da turbina executa o balanceamento e/ou a otimização da pá. Especificamente, a Figura 7 ilustra a turbina eólica 700 que compreende três pás, 702a, 702b e 702c. As pás 702a, 702b e 702c compreendem os sensores de pressão 704a, 704b e 704c, respectivamente. Cada sensor de pressão 704 pode compreender dois orifícios (P1 e P2) e o transdutor 30 tal como ilustrado na Figura 2. Um diferencial de pressão pode desse modo ser medido em cada pá 702 por cada sensor de pressão 704. Cada pá 702 também pode compreender vários controles, sistemas, e outros ainda que podem variar características diferentes da pá 702 a fim de colocar as cargas que agem em cada pá em um nível desejado. Por exemplo, cada pá pode compreender um defletor de ar 706, que pode ser desdobrado ou retraído, ou a parte da ponta 708, que pode ser estendida ou retraída. Além disso, cada pá 702 pode ser configurada de maneira tal que o passo e/ou a guinada da pá podem ser ajustados em resposta às cargas detectadas.

[063] Na modalidade ilustrada na Figura 7, a pá 702c é ajustada em resposta à detecção pelo sistema de controle da turbina 714 que as cargas agindo na pá 702c estão fora do balanço com aquelas que agem em cada uma de outras duas pás, 702a e 702b, e/ou não estão

dentro de uma faixa predeterminada de cargas aceitáveis. Especificamente, o sistema de controle da turbina 714 recebe leituras de diferencial de pressão de cada um dos sensores de pressão 704a, 704b e 704c. Ao usar, por exemplo, qualquer uma das técnicas de determinação de carga tal como descrito acima, o sistema de controle da turbina 714 determina que a pá 702c necessita de um ajuste a fim de colocar as cargas em faixas aceitáveis da carga e/ou balancear as cargas com aquelas associadas com as pás 702a e 702b. Por conseguinte, o sistema de controle da turbina 714 pode ajustar uma ou mais característica da pá 702c. Por exemplo, o sistema de controle da turbina 714 pode desdobrar o defletor de ar 706c, tal como ilustrado pela seta 710. Além disso, ou alternativamente, o sistema de controle da turbina 714 pode estender ou retrair a parte da ponta 708c tal como mostrado e ilustrado pela seta 712, e/ou o sistema de controle da turbina 714 pode alterar o passo ou a guinada da pá 702c tal como ilustrado pelas setas 714.

[064] Ao receber uma leitura do diferencial de pressão de cada pá 702 de uma turbina eólica 700, o sistema de controle da turbina 714 pode desse modo determinar as cargas associadas com cada pá e fazer ajustes nas características de cada pá caso necessário para colocar as cargas eficazes dentro de uma faixa aceitável predeterminada e/ou balancear as cargas entre cada pá. Na modalidade ilustrada na Figura 7, somente a pá 702c é mostrada como estando recebendo um ajuste, no entanto, tal como será bem compreendido, devido ao benefício da presente invenção, mais de uma pá e/ou mais de uma característica de cada pá podem ajustadas a fim de balancear e/ou otimizar as cargas entre cada pá. Por exemplo, em uma outra modalidade, em resposta ao recebimento das leituras de diferencial de pressão de cada pá, o sistema de controle da turbina 714 pode desdobrar o defletor de ar 706c da pá 702c, ajustar o passo da pá 702a, e estender ou re-

trair a parte da ponta 708b da pá 702b. Qualquer outra combinação de ajuste de características entre cada pá para obter uma distribuição de carga desejada pode ser empregada de imediato sem que se desvie do âmbito da presente invenção.

[065] A Figura 8 ilustra um fluxograma de um método exemplificador para otimizar e/ou balancear as pás de uma turbina eólica. Na etapa 800, os dados do sensor de pressão são determinados por um sistema de controle. Os dados do sensor de pressão podem ser determinados (por exemplo, recebidos, calculados, medidos, etc.) a partir de uma pluralidade de sensores de pressão em uma pluralidade de pás. Por exemplo, retornando à Figura 7, os dados do sensor de pressão podem ser recebidos dos sensores de pressão 704a, 704b e 704c nas pás 702a, 702b e 702c, respectivamente. Na etapa 805, os diferenciais de pressão podem ser determinados a partir dos dados recebidos do sensor de pressão. Por exemplo, cada sensor de pressão 704 pode incluir um orifício de pressão na superfície inferior de uma pá e um orifício de sensor de pressão em uma superfície superior de uma pá (tal como P1 e P2 na Figura 2). O sistema, na etapa 805, pode desse modo determinar uma diferença na pressão entre esses dois orifícios que, tal como apresentado acima, podem ser proporcionais às cargas que a pá está experimentando.

[066] Na etapa 810, essas cargas podem ser determinadas ao usar, por exemplo, qualquer um dos métodos acima mencionados. Em algumas modalidades, outras características além do diferencial de pressão podem ser usadas para determinar as cargas. Por exemplo, o sistema pode usar uma ou mais dentre a velocidade do rotor da turbina eólica, a pressão barométrica, isto é, a pressão do ar ambiente), a temperatura do ar ambiente, uma posição radial do sensor, um ângulo de torção da pá da turbina eólica, e/ou um ângulo de passo da pá da turbina eólica, na determinação das cargas que agem na pá. Na etapa

815, o sistema pode determinar se as cargas estão fora de balanço. Por exemplo, em uma modalidade as cargas experimentadas por uma primeira das pás de turbina eólica podem ser comparadas às cargas experimentadas por outras pás de turbina eólica. Se as cargas experimentadas pela primeira pá estiverem fora de balanço com as cargas experimentadas por outras pás, o método pode prosseguir para a etapa 820. Se, no entanto, as cargas não estiverem fora de balanço, o sistema pode prosseguir para a etapa 825. Na etapa 820, as características da pá são modificadas a fim de colocar a carga que age em uma primeira pá de volta no balanço. Por exemplo, se a pá for equipada com um defletor de ar desdobrável, o método pode desdobrar o defletor de ar. Além disso, ou alternativamente, o método pode mudar o ângulo de passo da pá ou o ângulo de guinada da turbina e/ou da pá para balancear as cargas. Ou o método pode estender ou retrair uma parte da ponta da pá. Qualquer modificação nessa etapa pode ser feita "em tempo real", isto é, enquanto a turbina eólica estiver girando ou durante um estado de paralisação da turbina. Por conseguinte, o método pode colocar as pás em balanço enquanto a turbina eólica estiver operando para evitar, por exemplo, tempo de paralisação e produtividade perdida.

[067] O sistema também pode determinar se as cargas determinadas estão dentro de uma faixa aceitável na etapa 825. Por exemplo, o sistema pode determinar que as cargas que agem em uma pá são demasiadamente elevadas e, por conseguinte modificar, por exemplo, qualquer uma das características acima mencionadas em resposta na etapa 830 a fim de evitar danos à pá. Além disso, ou alternativamente, o sistema pode determinar que, por exemplo, a razão entre elevação e arrasto é demasiadamente baixa e modificar qualquer uma das características acima mencionadas na etapa 830 a fim de aumentar a geração de energia. Outra vez, qualquer modificação na etapa 830 pode

ser feita "em tempo real" para evitar, por exemplo, tempo de paralisação e produtividade perdida, ou durante um estado de paralisação da turbina.

[068] Em algumas modalidades da invenção, ao usar qualquer uma das técnicas de estimativa da carga tal como descrito acima, um perfil da carga podem ser determinado ou estimado ao longo do comprimento de um aerofólio ou de uma pá. Por exemplo, as técnicas de estimativa da carga tal como descrito acima podem ser usadas para determinar, por exemplo, cargas normais ao rotor e/ou tangentes ao rotor em múltiplos locais ao longo de um aerofólio ou de uma pá. Ao usar as cargas estimadas em múltiplos locais, uma distribuição de carga pode ser determinada. Essa distribuição de carga pode ser usada quando são derivadas métricas adicionais sobre o aerofólio ou a pá. Por exemplo, uma distribuição de carga pode ser usada para determinar um momento de flexão da base que age em um aerofólio ou em uma pá. Se o momento de flexão da base for demasiadamente elevado, um sistema de controle pode alterar uma ou mais características para reduzir o momento e evitar desse modo danos ao rotor e/ou às pás. Por outro lado, se o momento de flexão da base for demasiadamente baixo, um sistema de controle pode alterar uma ou mais características para aumentar o momento a fim de, por exemplo, aumentar a geração de energia. Alternativamente, uma distribuição de carga pode ser usada para derivar o deslocamento (por exemplo, a flexão ou a torção) de um aerofólio ou de uma pá. Ou uma distribuição de carga pode ser usada para determinar as velocidades e as acelerações associadas com um aerofólio ou uma pá. Por conseguinte, ao usar, por exemplo, qualquer uma das técnicas acima mencionadas, um sistema de controle para uma turbina eólica pode derivar muitas métricas úteis usadas no controle da turbina eólica meramente ao estimar as cargas associadas com pelo menos uma pá da turbina.

[069] A Figura 9 ilustra um exemplo do sistema de controle 906 que determina uma distribuição de carga na pá 902c de uma turbina eólica. Na Figura 9, a turbina eólica 900 compreende um cubo 908 e três pás, 902a, 902b e 902c. A pá 902c é equipada com uma pluralidade de sensores de pressão 904. Na modalidade ilustrada, somente a pá 902c é mostrada contendo os sensores de pressão 904 para fins de simplificação, no entanto, em algumas modalidades mais de uma pá podem compreender um ou mais sensores de pressão. Os sensores de pressão 904 podem compreender, por exemplo, dois orifícios de detecção de pressão (P1 e P2) e um transdutor 30 tal como ilustrado na Figura 2. Por conseguinte, o sistema de controle 906 pode receber os dados que correspondem a múltiplos diferenciais de pressão ao longo do comprimento da pá 902c. Especificamente, cada sensor de pressão 904_n pode determinar uma pressão em P_{1,n} (isto é, uma superfície inferior da pá 902c) e uma pressão em P_{2,n} (isto é, uma superfície superior da pá 902c) e determinar um diferencial de pressão entre as duas localizações. Desse modo, para cada localização radial ao longo da pá 902c onde cada sensor de pressão 904_n se encontra, o sistema de controle 906 pode receber os dados a respeito de uma diferença na pressão no alto da pá 902c e na base da pá 902c. O sistema de controle 906 pode então usar o diferencial de pressão recebido em cada localização para estimar uma distribuição de carga ao longo da pá 902c ao usar, por exemplo, qualquer uma das técnicas de estimativa de carga aqui descritas.

[070] Por exemplo, tal como ilustrado na Figura 9, o sistema de controle 906 é descrito como estimando a carga normal ao rotor (L_N) e a carga tangencial (L_T) em cada localização radial. Em outras modalidades, o sistema de controle 906 pode estimar, por exemplo, a carga de elevação (\mathcal{L}), a carga normal (η), a carga tangencial (τ), e/ou quaisquer outras cargas desejadas. Uma vez que todas as cargas deseja-

das são determinadas, o sistema de controle 906 determina uma distribuição de carga ao longo da pá 902c e também pode usar a distribuição de carga para determinar outra métrica associada com a turbina eólica 900. Por exemplo, o sistema de controle 906 pode usar a distribuição de carga para determinar um deslocamento da pá 902c, incluindo uma proporção de flexão ou torção da pá 902c. Alternativamente, o sistema de controle 906 pode determinar uma aceleração ou uma velocidade da pá 902c e/ou da turbina eólica 900 de acordo com a distribuição de carga. Ao medir os diferenciais de pressão ao longo do comprimento radial da pá 902c, um sistema de controle 906 pode desse modo estimar por conseguinte uma distribuição de carga e derivar outra métrica relevante.

[071] A magnitude de cada carga estimada $L_{N,n}$ e $L_{T,n}$ tal como ilustrado na Figura 9 é apenas para finalidades ilustrativas. Em outras modalidades, as forças estimadas em cada posição ao longo da pá 902c podem ter, por exemplo, uma relação linear ou quadrática. Por exemplo, em uma modalidade, a carga normal ao rotor pode ser linearmente proporcional à distância radial do sensor de pressão 904_n do cubo 908. Desse modo, a carga normal ao rotor pode aumentar proporcionalmente ao comprimento radial do cubo 908, e por conseguinte a distribuição de carga deve parecer mais uniforme do que aquelas indicadas na Figura 9. Alternativamente, o sistema de controle 906 pode, por exemplo, se empenhar para obter uma relação linear e/ou quadrática entre as cargas ao longo do comprimento da pá 902c. Desse modo, com a estimativa das cargas ao longo do comprimento da pá 902c, o controlador 906 pode determinar que as cargas não são proporcionais à distância radial do sensor de pressão 904_n correspondente do cubo 908 (isto é, as cargas estão fora do balanço). Por conseguinte, o controlador 906 pode ajustar uma ou mais características da pá 902c tal como aqui discutido a fim de colocar as cargas de volta no

balanço.

[072] As Figuras 10A e 10B ilustram duas modalidades exemplificadoras de uma distribuição de carga equilibrada ao longo de uma pá de turbina eólica. Na Figura 10A, a turbina eólica 1000 compreende três pás 1002a, 1002b e 1002c. Para fins de simplificação, as pás 1002a e 1002b não foram ilustradas completamente. A pá 1002c pode ser equipada com sensores de pressão ao longo de seu comprimento (não mostrado) tal como o sensor de pressão descrito acima com respeito à Figura 2 e/ou os sensores de pressão 904 descritos acima com respeito à Figura 9. Cada sensor de pressão ao longo do comprimento da pá 1002c mede um diferencial de pressão em sua localização, em que o diferencial de pressão corresponde a uma diferença na pressão entre uma superfície superior da pá 1002c e uma superfície inferior da pá 1002c. Ao usar, por exemplo, qualquer uma das técnicas de distribuição de carga aqui discutidas, um sistema de controle (não mostrado) pode estimar as cargas ao longo do comprimento da pá 1002c. Por exemplo, tal como ilustrado, um sistema de controle pode calcular a carga normal ao rotor (L_N) em cada localização. Além disso, ou alternativamente, um sistema de controle pode estimar qualquer carga aqui discutida. Nesta modalidade, o rotor - a distribuição de carga normal é linear. Desse modo, o controlador pode determinar que a pá está no balanço. Além disso ou alternativamente, o sistema de controle pode usar a distribuição linear para calcular outras métricas que correspondem à pá 1002c, tais como, por exemplo, o deslocamento, a aceleração, a velocidade e/ou o momento. Ao usar essas métricas, o controlador pode controlar com mais eficiência a turbina eólica, por exemplo, ao modificar as características da pá 1002c da turbina eólica a fim de colocar as cargas em uma faixa desejada e/ou balancear as cargas com as cargas que agem em outras pás (por exemplo, 1002a e/ou 1002b).

[073] A Figura 10B representa uma distribuição de carga alternativa que pode ser estimada pelo sistema de controle e/ou que o sistema de controle pode ajustar características da pá a fim de obter a mesma. Na modalidade ilustrada na Figura 10 B, a distribuição de carga não é mais linear, mas, ao invés disto, pode ter, por exemplo, uma equação quadrática ou uma outra relação não linear. A distribuição de carga pode variar dependendo, por exemplo, da configuração da turbina eólica, das condições ambientes e/ou de outros fatores. Independente das características reais da distribuição de carga, um sistema de controle pode usar a distribuição de carga na determinação de outras métricas da pá ou da turbina eólica e/ou para ajustar características da pá a fim de obter uma distribuição desejada.

[074] O valor da carga determinado em pontos distintos ao longo de uma pá de rotor, tal como ilustrado nas Figuras 10A e 10B, pode ser usado para calcular uma distribuição. Por exemplo, um ajuste linear ou quadrático pode ser determinado para gerar uma equação que corresponde à distribuição. Ao usar essa distribuição, os valores da carga em outros pontos (por exemplo, pontos em que um sensor da pressão ou um outro dispositivo de detecção não está localizado) podem ser calculados ou então determinados.

[075] Em outras modalidades da presente invenção, uma ou mais turbinas eólicas pode compreender um sistema de controle distributivo. Em uma modalidade do sistema de controle distribuído, uma turbina eólica pode compreender múltiplos controladores acoplados de maneira comunicativa. Por exemplo, uma turbina eólica pode ter um controlador de função específica para cada característica modificável de uma pá da turbina eólica. Uma turbina eólica pode desse modo compreender um controlador que controla uma parte extensível da ponta de uma pá da turbina eólica, um controlador que controla um passo da pá da turbina eólica, um controlador que controla uma guinada da turbina

eólica e/ou da pá de turbina eólica, um controlador que controla um defletor de ar na pá da turbina eólica, e/ou um ou mais controladores que controlam uma ou mais características adicional da pá da turbina eólica. Além disso, a turbina eólica pode compreender um controlador central que pode controlar uma ou mais das características acima mencionadas. Em tais modalidades, cada controlador de função específica pode agir como uma reposição ou substituto para o controlador central, e/ou o controlador central pode agir como uma reposição ou substituto para cada controlador de função específica. Por exemplo, com respeito a um defletor de ar, um controlador central, assim como um controlador de defletor de ar, pode ser configurado para controlar a operação do defletor de ar. Se, por exemplo, o controlador central falhar, o controlador do defletor de ar pode controlar o defletor de ar se e quando uma pá de turbina eólica precisar de ajuste. Alternativamente, se o controlador do defletor de ar falhar, o controlador central pode controlar o defletor de ar se e quando a pá da turbina eólica precisar de ajuste. Por conseguinte, uma turbina eólica pode evitar danos e/ou tempo de paralisação se um controlador falhar porque um outro controlador pode executar uma operação substitutiva.

[076] A Figura 11 ilustra uma modalidade de um sistema de controle distributivo ao usar múltiplos controladores. Na Figura 11, a turbina eólica 1100 compreende três pás, 1104a, 1104b e 1104c. Cada pá 1104 e/ou turbina eólica 1100 pode ser configurada de maneira tal que um número de características pode ser alterado em resposta, por exemplo, à detecção de cargas excessiva e/ou fora do balanço. Por exemplo, cada pá 1104 pode ter uma parte da ponta que é configurada para se estender ou retrair. Além disso, cada pá 1104 pode ter um defletor de ar que pode ser desdobrado ou retraído. Além disso, cada pá 1104 pode ser configurada de maneira tal que o passo ou a guinada de cada pá podem ser alterados a fim de modificar as cargas que a-

gem na pá 1104. A turbina eólica 1100 pode compreender um controlador unidade 1102 que é configurado para modificar uma ou mais características da turbina eólica 1100 e/ou das pás 1104. Por exemplo, o controlador central 1102 pode ser configurado para modificar um ou mais dentre o ângulo de passo e o ângulo de guinada para cada pá 1104, e/ou pode ser configurado para estender ou retrainir um ou mais de um defletor de ar e/ou uma parte da ponta de cada pá 1104.

[077] Além do controlador central 1102, a turbina eólica 1100 também pode compreender controladores de funções específicas configurados para modificar várias características da turbina eólica 1100 e/ou das pás 1104. Especificamente, cada pá pode compreender um controlador de passo e/ou guinada 1106, um controlador de defletor de ar 1108, e/ou um controlador de comprimento variável 1110. Por conseguinte, cada característica das pás 1104 pode ser modificada ao usar os controladores de funções específicas. Além disso, cada controlador de função específica pode ser redundante com, por exemplo, o controlador central 1102. Por exemplo, o controlador central 1102 bem como o controlador de comprimento variável 1110 pode ser configurado para modificar o comprimento de uma ou mais pás 1104 a fim de modificar as cargas e/ou colocar as cargas no balanço. Por conseguinte, quando é modificado o comprimento das pás 1104, o controlador central 1102 ou o controlador de comprimento variável 1110 pode ser usado. Se um dos controladores falhar, o outro controlador ainda pode executar a modificação desejada em resposta às cargas excessivas e/ou fora do balanço. Por conseguinte, cada controlador provê uma reposição, uma vez que as características da turbina eólica 1100 podem ser modificadas a fim de, por exemplo, evitar os danos mesmo se um ou mais controladores falharem.

[078] Em uma outra modalidade de um sistema de controle distribuído, múltiplos controladores entre múltiplas turbinas eólicas podem

ser acoplados de maneira comunicativa a fim de propiciar uma operação eficiente e/ou evitar os danos devidos às cargas excessivas. Por exemplo, em uma modalidade, múltiplas turbinas eólicas podem ser arranjadas próximas umas das outras. Cada turbina eólica pode compreender um ou mais controladores configurados para modificar uma ou mais características de cada turbina eólica. Por exemplo, cada turbina pode compreender um ou mais controladores que estendem ou retraem uma parte da ponta de suas pás, modificam um ângulo de passo de suas pás, modificam um ângulo de guinada da turbina eólica e/ou de suas pás, e/ou desdobram ou retraem os defletores de ar em suas pás. Os controladores podem, por conseguinte, se comunicar entre si e ajustar as características. A título de exemplo, um controlador em uma primeira turbina eólica pode detectar cargas excessivas na turbina ao usar, por exemplo, qualquer uma das técnicas acima mencionadas de estimativa de carga. A primeira turbina eólica pode então ajustar qualquer número de características a fim de impedir, por exemplo, danos à turbina causados pelas cargas excessivas. Além disso, um ou mais controladores na turbina eólica podem então se comunicar com um ou mais controladores localizados em outras turbinas eólicas. Por conseguinte, os controladores na outra turbina eólica podem ajustar uma ou mais características em resposta à determinação da carga da primeira turbina eólica. Desse modo, os danos podem ser reduzidos nas outras turbinas e/ou as outras turbinas podem ser operadas com mais eficiência.

[079] A Figura 12 ilustra uma modalidade na qual múltiplos controladores são acoplados de maneira comunicativa a fim de prover um sistema de controle distribuído entre múltiplas turbinas eólicas. Especificamente, a fazenda eólica 1200 compreende múltiplas turbinas eólicas 1202 acopladas de maneira comunicativa umas às outras através do sistema de controle 1208. Cada turbina eólica 1202 pode se comu-

nicar com as outras ao usar qualquer método bem conhecido, incluindo uma comunicação com fio ou sem fio. As características de cada turbina eólica 1202 (por exemplo, o passo, a guinada, o comprimento das pás, defletores de ar desdobrados ou não) são configuradas para ser modificadas em resposta, por exemplo, a uma determinação que as cargas que agem em cada turbina 1202 são excessivas e/ou fora do balanço. Os métodos para estimar cargas e/ou modificar uma ou mais características podem ser executados, por exemplo, por qualquer um dos métodos aqui providos. Cada turbina eólica 1202 também pode ser arranjada em grupos. Por exemplo, as turbinas eólicas 1202a-1202f podem ser arranjadas no grupo 1204, e as turbinas eólicas 1202g-1202k podem ser arranjadas no grupo 1206. Cada turbina eólica 1202 também pode compreender um ou mais controladores (não mostrado) para controlar uma ou mais características modificáveis de cada turbina eólica 1202.

[080] Um controlador em cada turbina eólica 1202 e/ou sistema de controle 1208 pode estimar cargas excessivas ao empregar, por exemplo, qualquer uma das técnicas de estimativa/determinação de carga aqui descritas. Por exemplo, a turbina eólica 1202g pode ser sujeita a uma rajada de vento repentina 1208. Dependendo, por exemplo, da configuração atual da turbina eólica 1202g, a rajada de vento 1208 pode causar cargas excessivas na turbina eólica 1202g. Em resposta, um ou mais controladores na turbina eólica 1202g podem modificar uma ou mais características. Por exemplo, um controlador pode modificar a guinada da turbina eólica 1202g de maneira tal que a turbina eólica fique voltada diretamente para a rajada de vento. Além disso ou alternativamente, um controlador pode ajustar o passo ou a guinada de um ou mais pás, pode desdobrar ou retrair um defletor de ar em um ou mais pás, e/ou pode estender ou retrair uma parte da ponta de uma ou mais pás. Além disso, a turbina eólica 1202g pode ser acopla-

da de maneira comunicativa a um ou mais dos controladores das outras turbinas eólicas 1202a-1202k através, por exemplo, do sistema de controle 1208. Por conseguinte, outras turbinas eólicas 1202 podem usar a estimativa ou a determinação de carga e/ou dados de modificação de características da turbina eólica 1202g a fim de modificar as características na preparação, por exemplo, para uma rajada de vento 1208. Por exemplo, se a turbina 1202g for sujeitada à rajada de vento 1208 que causa cargas excessivas, e a turbina eólica 1202g modifica desse modo um ângulo de guinada da turbina eólica 1202g em resposta, uma ou mais das outras turbinas eólicas 1202 podem ajustar o seu ângulo de guinada respectivo na preparação da rajada de vento 1208. Por conseguinte, as turbinas eólicas tais como, por exemplo, 1202h e 1202e, que podem ficar localizadas distantes a favor do vento da turbina eólica 1202g, podem compensar a rajada de vento 1208 antes que tal rajada possa alcançar cada turbina. Desse modo, nesta modalidade, os controladores distribuídos através de múltiplas turbinas eólicas podem ser usados para aumentar a eficiência e/ou reduzir as falhas das turbinas eólicas 1202 mediante o uso do feedback de uma ou mais turbinas.

[081] A fazenda eólica 1200 também pode compreender agrupamentos de turbinas eólicas tais como, por exemplo, os grupos 1204 e 1206. Por conseguinte, as características de cada turbina 1202 só podem ser modificadas quando, por exemplo, outras turbinas no mesmo grupo são modificadas. Por exemplo, pode ser determinado que as turbinas eólicas 1202a-1202f experimentam em geral as mesmas condições ambientes entre si devido, por exemplo, à sua localização em um cume, ao passo que as turbinas eólicas 1202g-1202k experimentam normalmente as mesmas condições ambientes entre si mas que são tipicamente distintas daquelas experimentadas pelas turbinas eólicas 1202a-1202f. Desse modo, as turbinas eólicas 1202a-1202f po-

dem ser agrupadas no grupo 1204, e as turbinas eólicas 1202g-1202k podem ser agrupadas no grupo 1206. Por conseguinte, quando a turbina eólica 1202g experimenta, por exemplo, a rajada de vento 1208, ela pode ajustar qualquer número de características tal como explicado acima, e as outras turbinas agrupadas com a turbina eólica 1202g no grupo 1206 (isto é, as turbinas eólicas 1202h-1202k) podem ajustar similarmente as características para compensar as cargas aumentadas previstas, ao passo que as turbinas eólicas no grupo 1204 (isto é, as turbinas eólicas 1202a-1202f) não podem modificar nenhuma das características em resposta. Por conseguinte, em alguns aspectos da presente invenção, um sistema de controle distribuído pode ser usado para aumentar a eficiência e diminuir a falha dos agrupamentos das turbinas eólicas 1202 que são expostas tipicamente a condições ambientes similares.

[082] Os métodos e as características aqui recitados também podem ser executados através de qualquer número de meios que podem ser lidos por computador que podem armazenar instruções que podem ser lidas por computador. Os exemplos dos meios que podem ser lidos por computador que podem ser usados incluem uma RAM, uma ROM, uma EEPROM, uma memória flash ou uma outra tecnologia de memória, um CD-ROM, um DVD ou um outro disco de armazenamento ótico, cassetes magnéticos, fitas magnéticas, armazenamento magnético, e outros ainda.

[083] Embora sejam mostrados sistemas e os métodos ilustrativos tal como aqui descrito incorporem vários aspectos da presente invenção, deve ser compreendido pelos elementos versados na técnica que a invenção não fica limitada a essas modalidades. Modificações podem ser feitas pelos elementos versados na técnica, em particular à luz dos ensinamentos acima. Por exemplo, cada um dos elementos das modalidades acima mencionadas pode ser utilizado sozinho ou

em combinação ou uma subcombinação com elementos das outras modalidades. Também deve ser apreciado e compreendido que modificações podem ser feitas sem que se desvie do verdadeiro caráter e âmbito da presente invenção. A descrição deve desse modo ser considerada como ilustrativa em vez de limitadora na presente invenção.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para balancear cargas aerodinâmicas, caracterizado pelo fato de que compreende:

a determinação, por um controlador, de uma pluralidade de diferenciais de pressão, em que cada diferencial da pluralidade de diferenciais de pressão corresponde a uma diferença na pressão entre uma primeira localização da pressão e uma segunda localização da pressão em cada pá de uma pluralidade de pás de turbina eólica;

a determinação, pelo controlador, de uma pluralidade de cargas aerodinâmicas com base na pluralidade de diferenciais de pressão, em que cada carga da pluralidade de cargas aerodinâmicas corresponde a cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica;

a determinação, pelo controlador, que uma primeira carga aerodinâmica da pluralidade de cargas aerodinâmicas está fora do equilíbrio; e

em resposta à determinação que a primeira carga aerodinâmica está fora do equilíbrio, a modificação, pelo controlador, de pelo menos uma característica de uma primeira pá de turbina eólica da pluralidade de pás de turbina eólica.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que também compreende:

a recepção de uma velocidade de rotação da turbina eólica, uma pressão do ar ambiente, uma temperatura do ar ambiente, e um ângulo do passo de cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica, em que a determinação da pluralidade de cargas aerodinâmicas também é baseada na velocidade de rotação da turbina eólica, na pressão do ar ambiente, na temperatura do ar ambiente, e no ângulo do passo de cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica.

3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da

primeira pá de turbina eólica compreende uma dentre: a modificação de um ângulo do passo da primeira pá de turbina eólica; a modificação de um ângulo de guinada da turbina eólica; e a modificando de um ângulo de guinada da primeira pá de turbina eólica.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica compreende uma dentre: a extensão de uma parte da ponta da primeira pá de turbina eólica; e a retração da parte da ponta da primeira pá de turbina eólica.

5. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica compreende uma dentre: a deposição de um defletor de ar na primeira pá de turbina eólica; e a retração do defletor de ar na primeira pá de turbina eólica.

6. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que também compreende:

a definição de um grupo de pás que compreende uma ou mais pás de turbina eólica que incluem a primeira pá de turbina eólica;

em resposta à modificação de pelo menos uma característica de pelo menos uma pá de turbina eólica, a modificação de pelo menos uma característica de cada pá no grupo definido.

7. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica é executada enquanto a pluralidade de pás de turbina eólica está girando.

8. Método para a otimização de cargas aerodinâmicas, caracterizado pelo fato de que compreende:

a determinação, por um controlador, de uma pluralidade de diferenciais de pressão, em que cada diferencial da pluralidade de diferenciais de pressão corresponde a uma diferença na pressão entre

uma primeira localização da pressão e uma segunda localização da pressão em cada uma pá da pluralidade de pás de turbina eólica;

a determinação, pelo controlador, de uma pluralidade de cargas aerodinâmicas com base na pluralidade de diferenciais de pressão, em que cada carga da pluralidade de cargas aerodinâmicas corresponde a cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica;

a determinação, pelo controlador, que uma primeira carga aerodinâmica da pluralidade de cargas aerodinâmicas não está dentro de uma faixa predeterminada de cargas aceitáveis; e

em resposta à determinação que a primeira carga aerodinâmica não está dentro da faixa predeterminada de cargas aceitáveis, a modificação, pelo controlador, de pelo menos uma característica de uma primeira pá de turbina eólica da pluralidade de pás de turbina eólica.

9. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que também compreende:

a recepção de uma velocidade de rotação da turbina eólica, uma pressão do ar ambiente, uma temperatura do ar ambiente, e um ângulo do passo de cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica, em que a determinação da pluralidade de cargas aerodinâmicas também é baseada na velocidade de rotação da turbina eólica, na pressão do ar ambiente, na temperatura do ar ambiente, e no ângulo do passo de cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica.

10. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica compreende uma dentre: a modificação de um ângulo do passo da primeira pá de turbina eólica; a modificação de um ângulo de guinada da turbina eólica; e a modificação de um ângulo de guinada da primeira pá de turbina eólica.

11. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado

pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica compreende uma dentre: a extensão de uma parte da ponta da primeira pá de turbina eólica; e a retração da parte da ponta da primeira pá de turbina eólica.

12. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica compreende uma dentre: a deposição de um defletor de ar na primeira pá de turbina eólica; e a retração do defletor de ar na primeira pá de turbina eólica.

13. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que também compreende:

a definição de um grupo de pás que compreende uma ou mais pás de turbina eólica da pluralidade de pás de turbina eólica incluindo a primeira pá de turbina eólica;

em resposta à modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica, a modificação de pelo menos uma característica de cada pá no grupo definido.

14. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a modificação de pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica é executada enquanto a pluralidade de pás de turbina eólica está girando.

15. Turbina eólica, caracterizada pelo fato de que compreende:

um cubo;

uma pluralidade de pás de turbina eólica conectadas a e arranjadas em torno do cubo, em que cada pá de turbina eólica da pluralidade de pás de turbina eólica compreende:

um primeiro orifício de detecção de pressão arranjado em uma superfície inferior da pá de turbina eólica; e

um segundo orifício de detecção de pressão arranjado em

uma superfície superior da pá de turbina eólica; e

pelo menos um controlador, em que pelo menos um controlador é configurado para determinar pelo menos uma força aerodinâmica associada com cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica com base em uma diferença na pressão entre uma localização do primeiro orifício de detecção de pressão e uma localização do segundo orifício de detecção de pressão em cada pá de turbina eólica, e em que o controlador também é configurado para modificar pelo menos uma característica de uma primeira pá de turbina eólica em resposta à determinação que uma primeira força aerodinâmica associada com a primeira pá de turbina eólica está fora do equilíbrio.

16. Turbina eólica de acordo com a reivindicação 15, caracterizada pelo fato de que pelo menos um controlador também é configurado para:

receber uma velocidade de rotação da turbina eólica, uma pressão do ar ambiente, uma temperatura do ar ambiente, e um ângulo do passo de cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica; e

determinar pelo menos uma força aerodinâmica associada com cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica também com base na velocidade de rotação da turbina eólica, na pressão do ar ambiente, na temperatura do ar ambiente, e no ângulo do passo de cada pá da pluralidade de pás de turbina eólica.

17. Turbina eólica de acordo com a reivindicação 15, caracterizada pelo fato de que pelo menos um controlador também é configurado para modificar, em resposta à determinação que a primeira força aerodinâmica está fora do equilíbrio, um dentre: um ângulo de passo da primeira pá de turbina eólica; um ângulo de guinada da turbina eólica; e um ângulo de guinada da primeira pá de turbina eólica.

18. Turbina eólica de acordo com a reivindicação 15, caracterizada pelo fato de que pelo menos um controlador também é confi-

gurado para executar, em resposta à determinação que a primeira força aerodinâmica está fora do equilíbrio, uma dentre: a extensão de uma parte da ponta da primeira pá de turbina eólica; e a retração da parte da ponta da primeira pá de turbina eólica.

19. Turbina eólica de acordo com a reivindicação 15, caracterizada pelo fato de que pelo menos um controlador também é configurado para executar, em resposta à determinação que a primeira força aerodinâmica está fora do equilíbrio, uma dentre: a deposição de um defletor de ar na primeira pá de turbina eólica; e a retração do defletor de ar na primeira pá de turbina eólica.

20. Turbina eólica de acordo com a reivindicação 15, caracterizada pelo fato de que pelo menos um controlador também é configurado para modificar pelo menos uma característica da primeira pá de turbina eólica enquanto a pluralidade de pás de turbina eólica está girando.

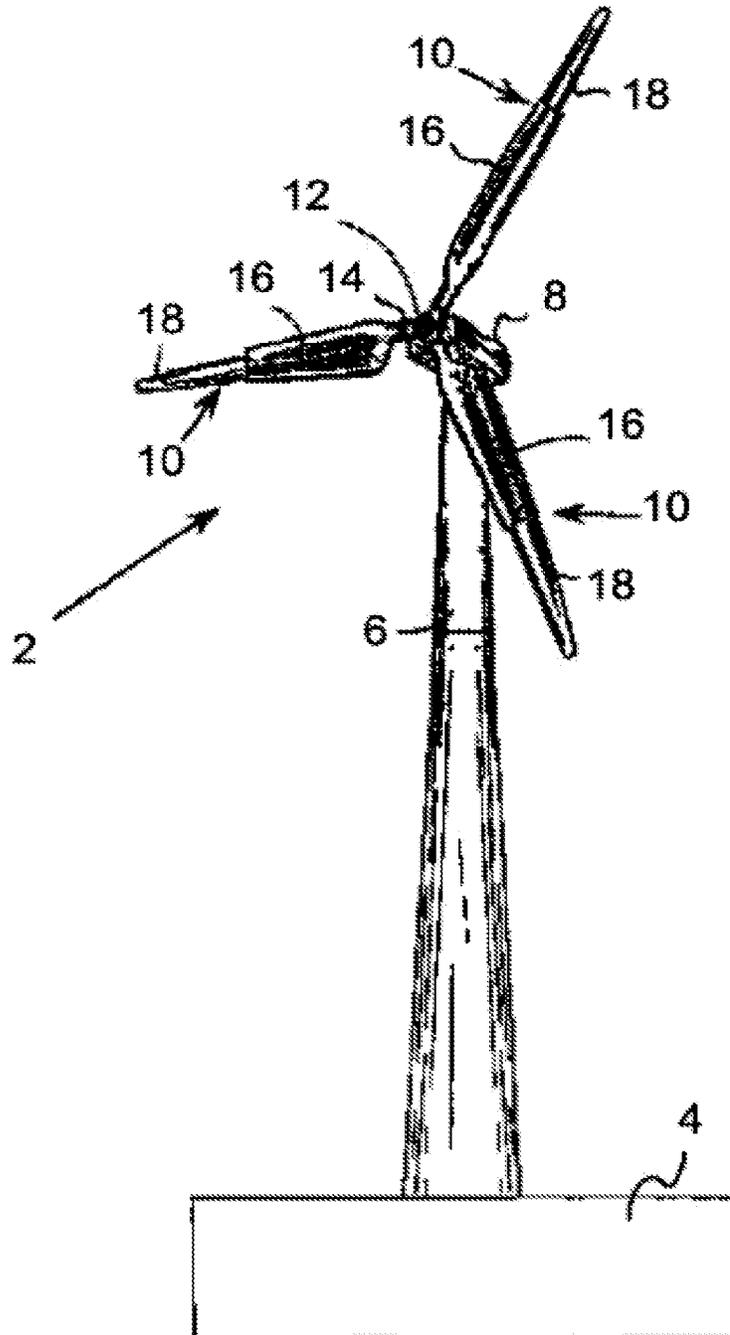


FIG. 1

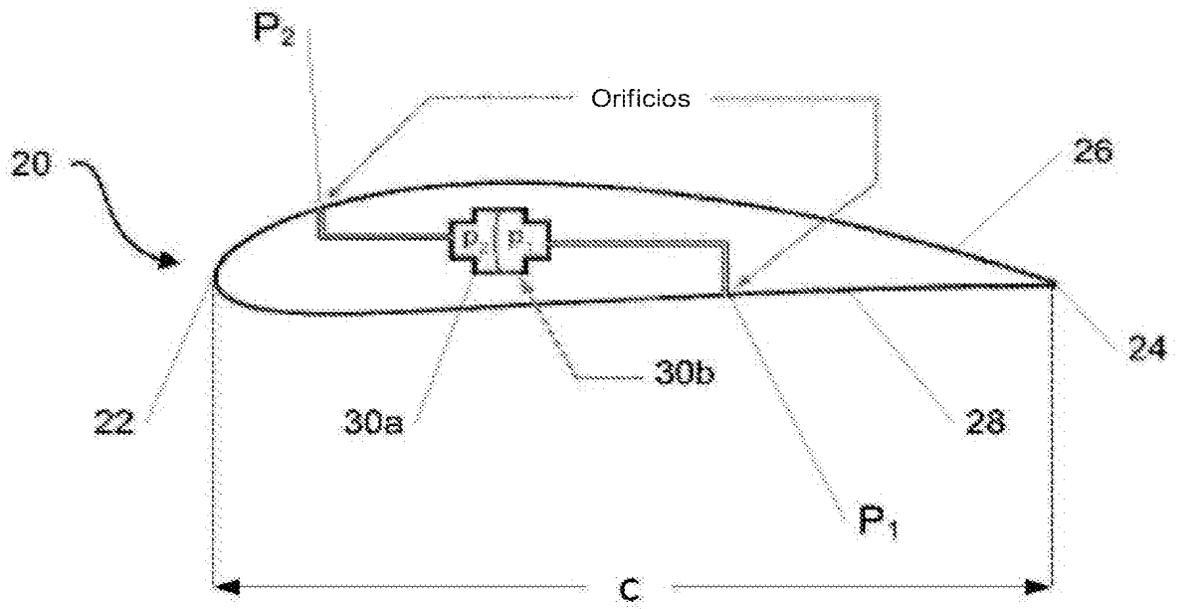


FIG. 2

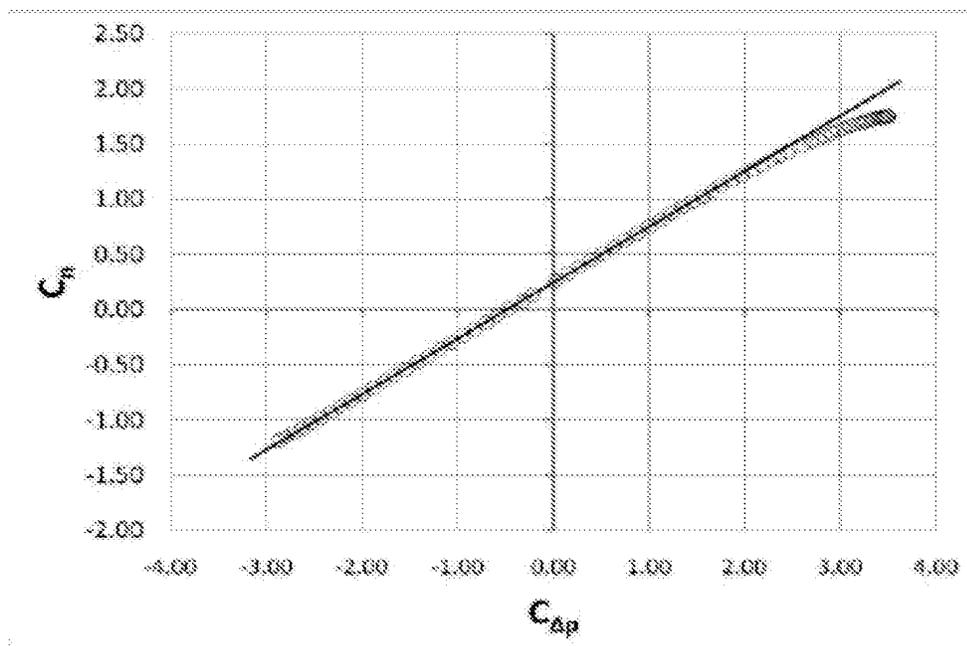


FIG. 3A

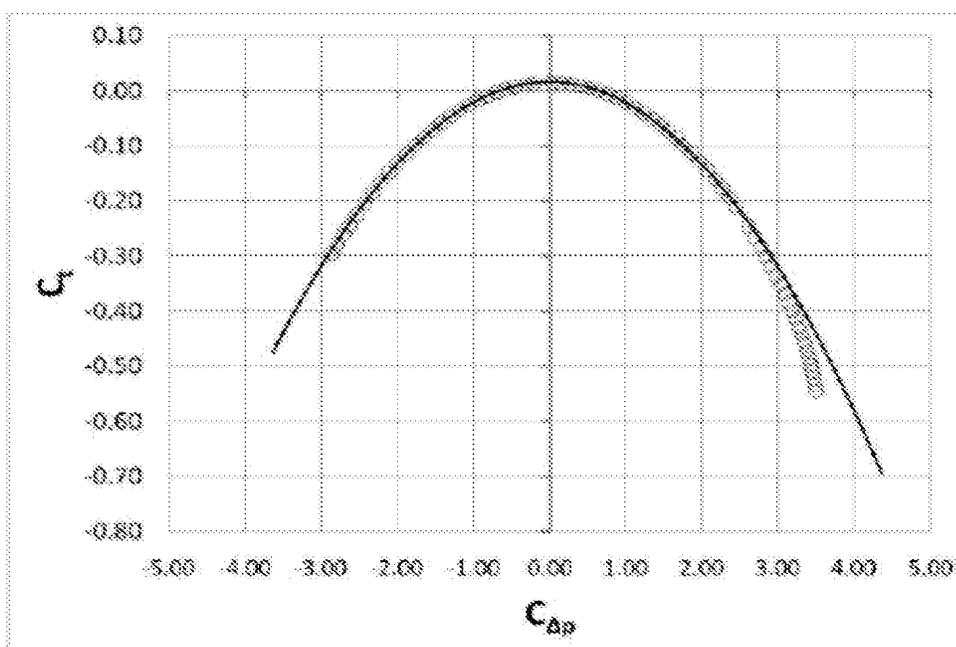
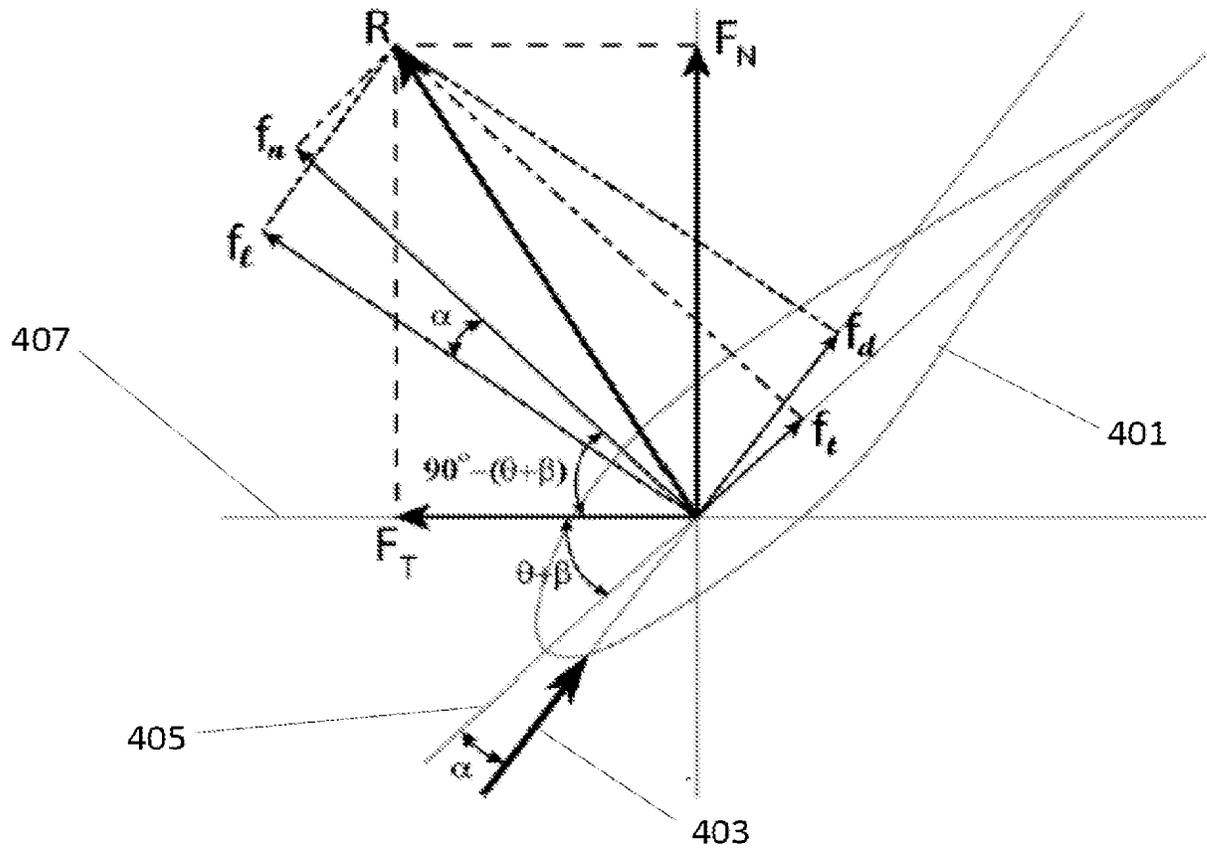
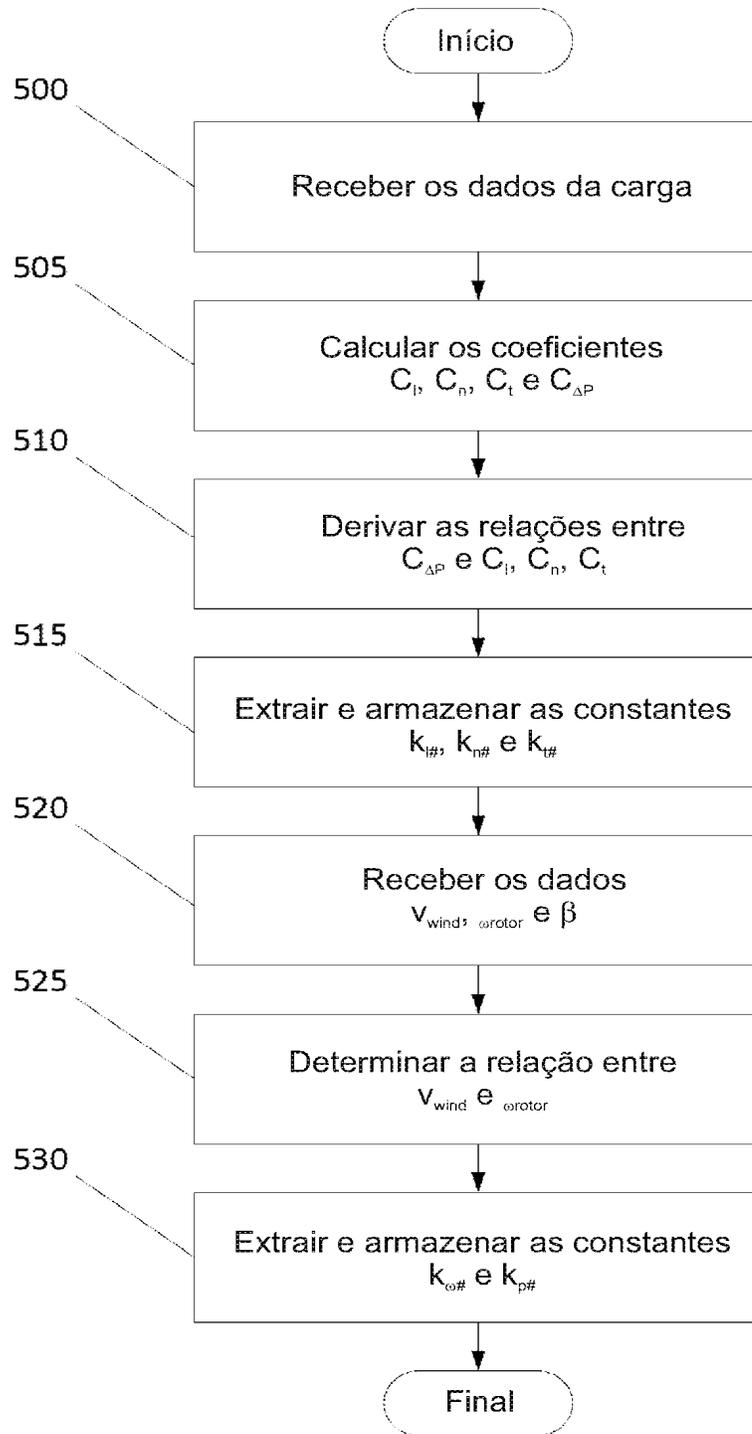


FIG. 3B

**FIG. 4**

**FIG. 5**

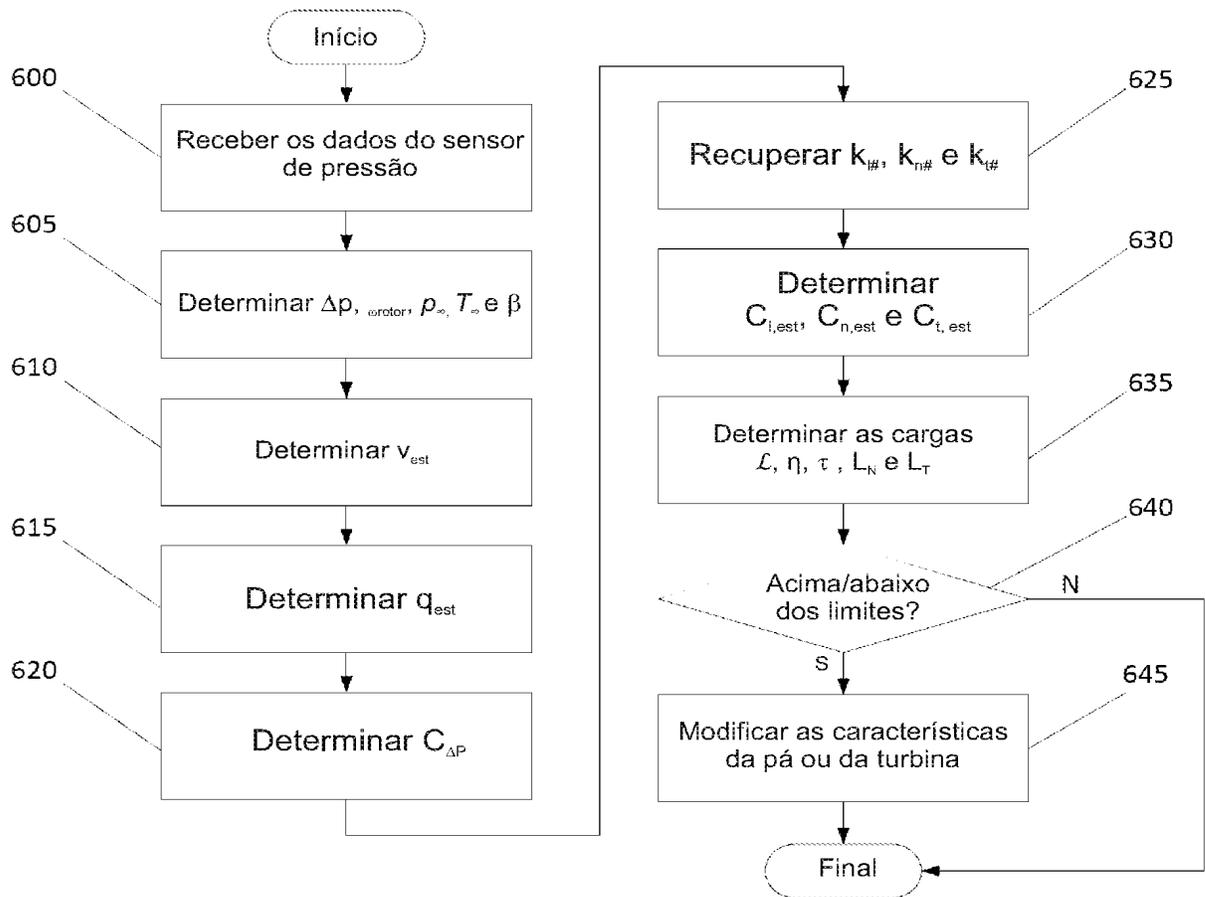


FIG. 6

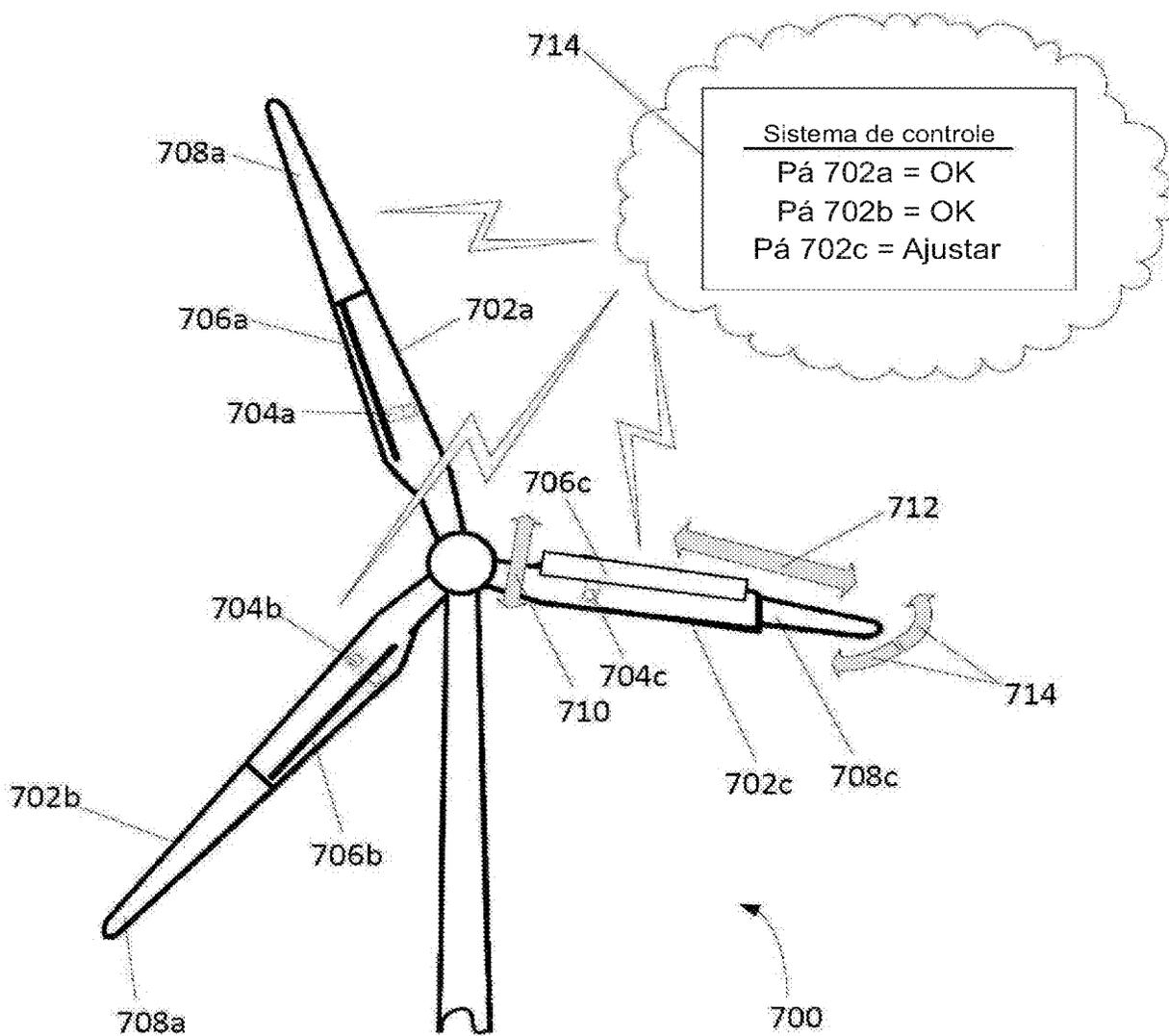


FIG. 7

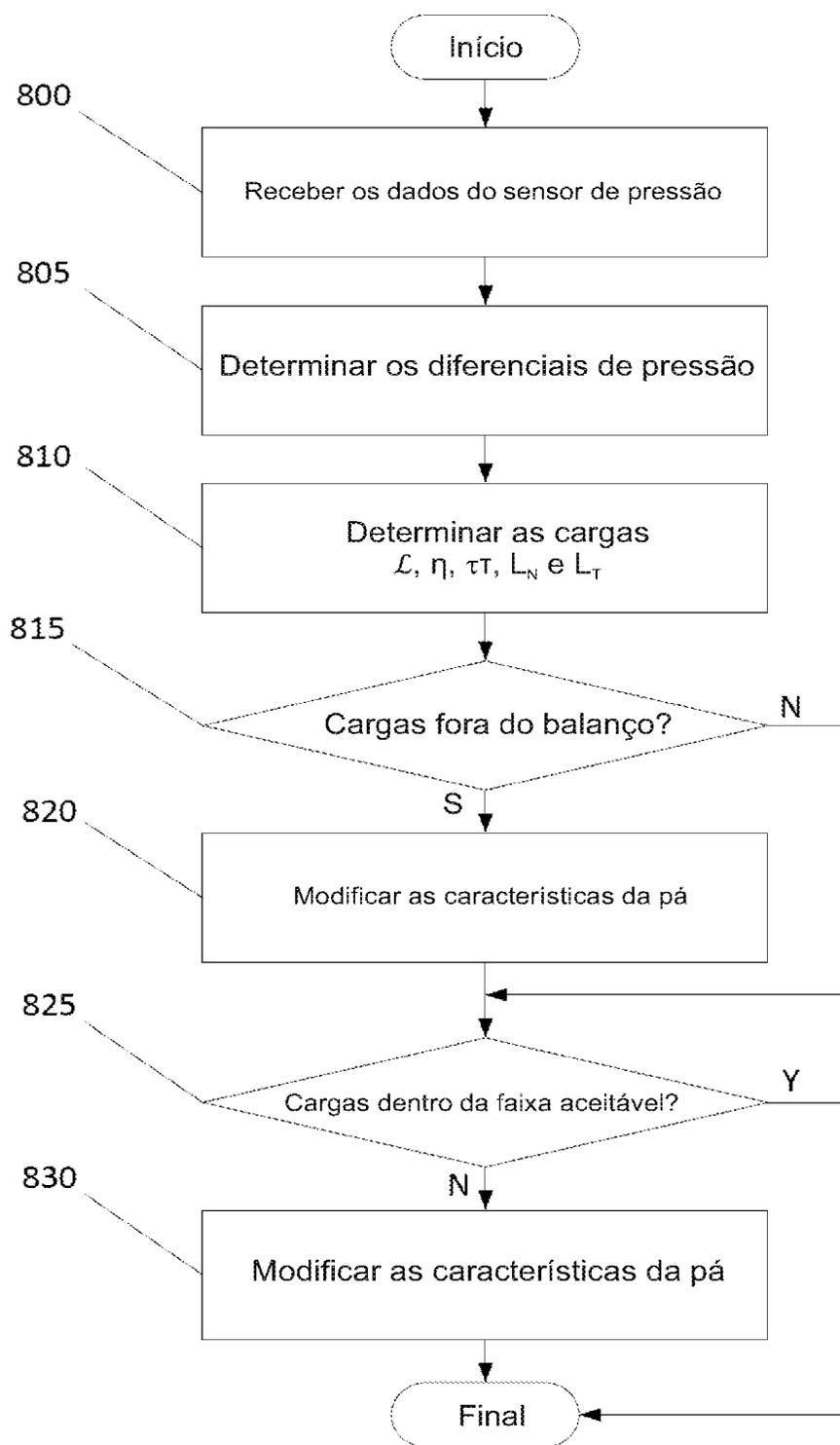


FIG. 8

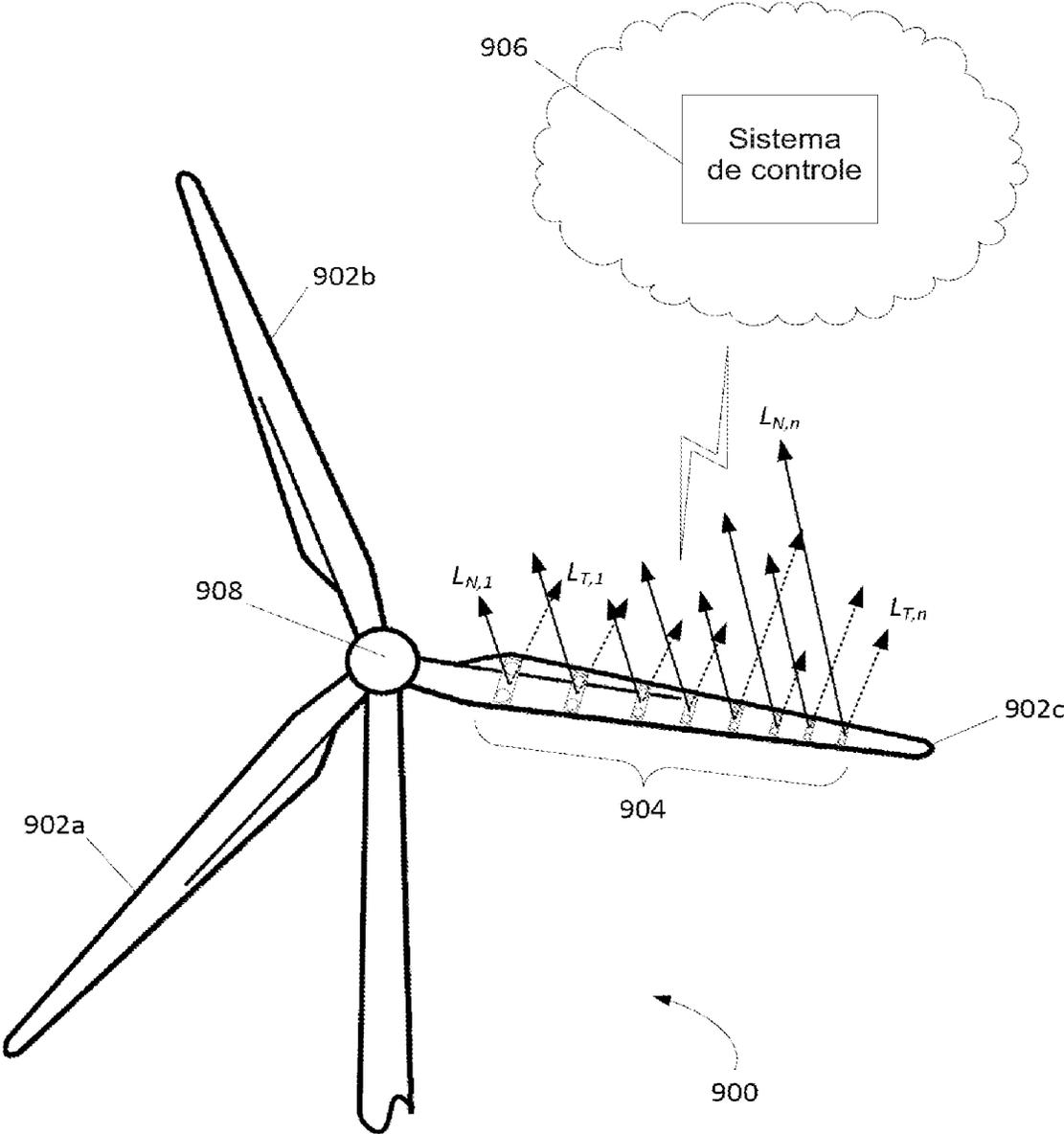


FIG. 9

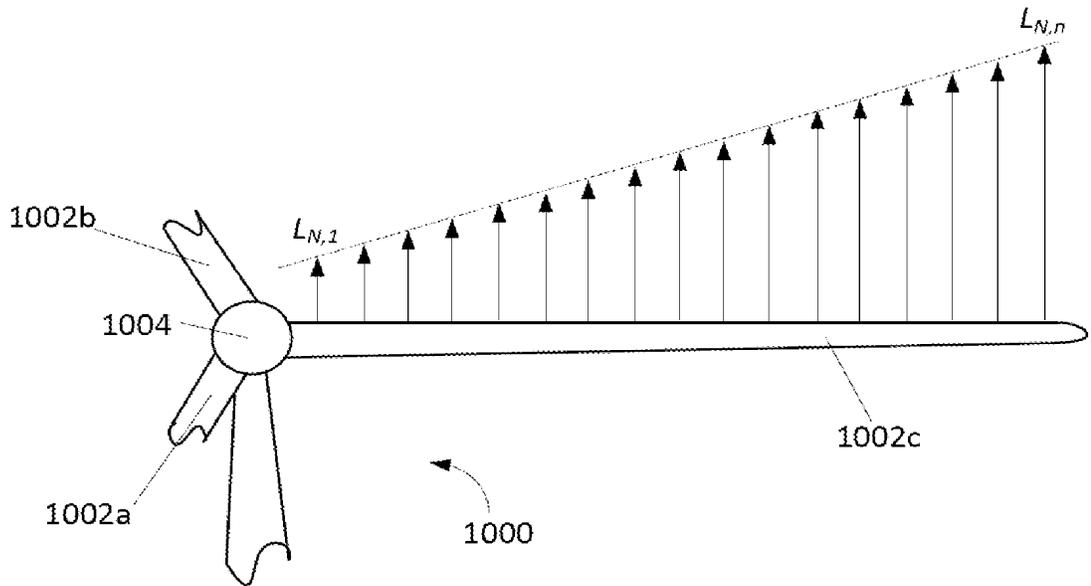


FIG. 10A

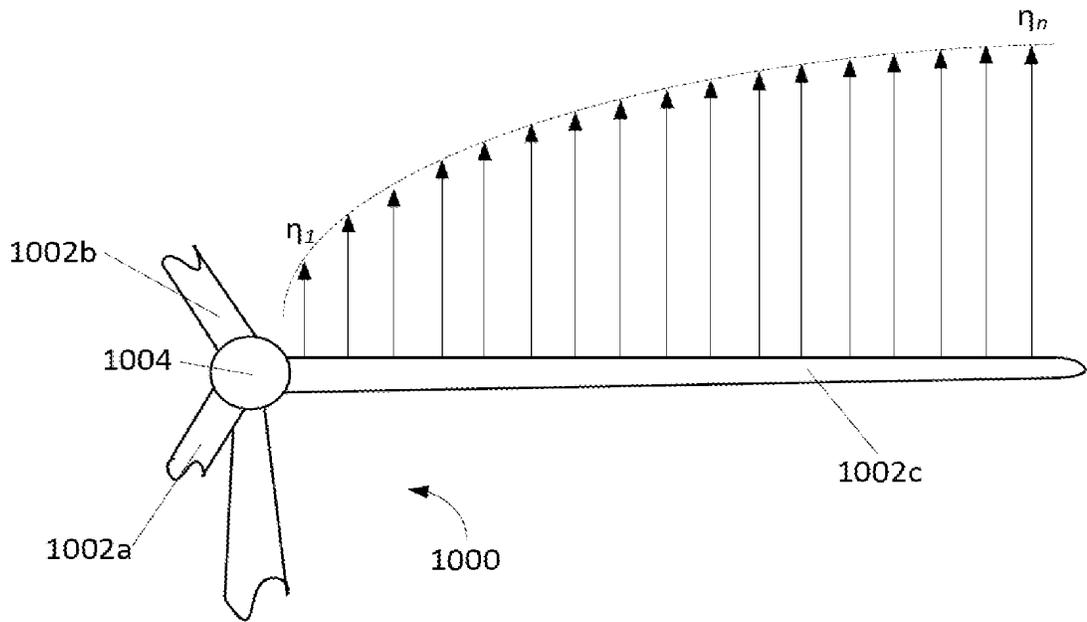


FIG. 10B

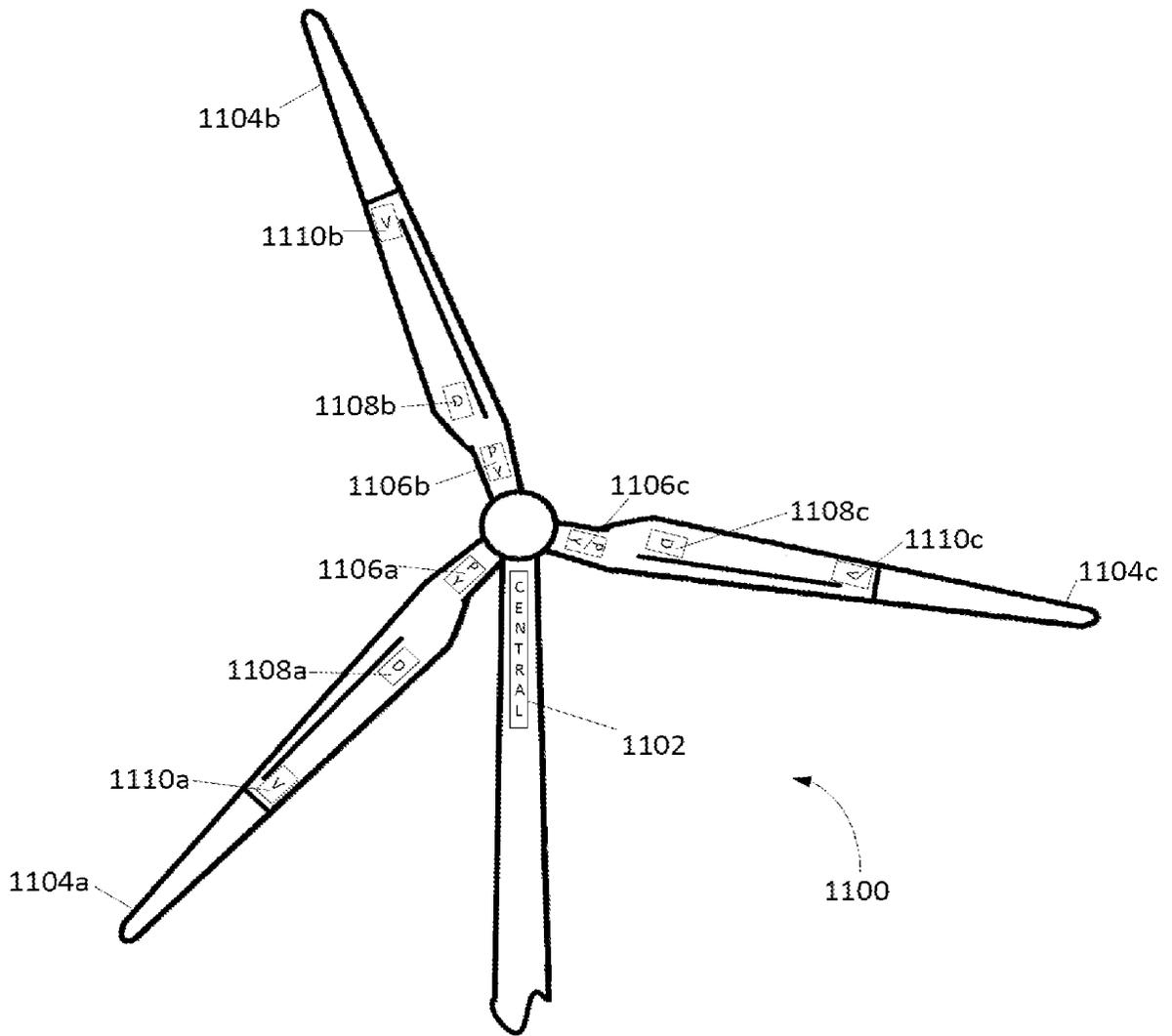
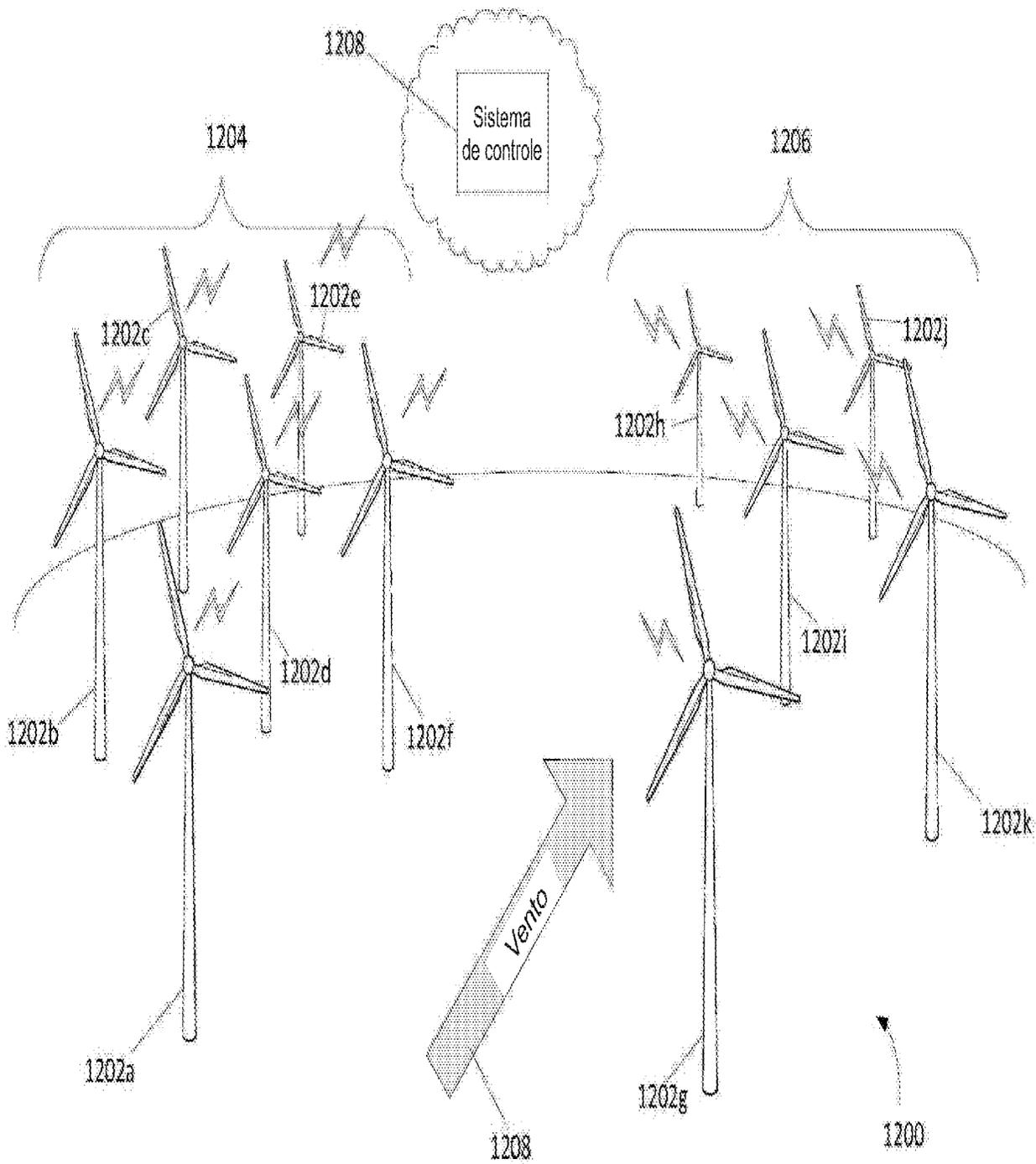


FIG. 11



12/12

FIG. 12

RESUMO

Patente de Invenção: "**BALANCEAMENTO DE PÁ**".

A presente invenção refere-se a um sistema e um método para a medição de carga com base na pressão. O sistema e o método medem pelo menos um diferencial de pressão em um aerofólio e determinam pelo menos uma carga aerodinâmica associada com pelo menos um diferencial de pressão. Pelo menos uma carga determinada é usada para modificar as características do aerofólio para aumentar a eficiência e/ou evitar danos. Pelo menos uma carga aerodinâmica determinada também pode ser utilizada para balancear e/ou otimizar cargas no aerofólio, estimar uma distribuição de carga ao longo do aerofólio usada para derivar outra métrica sobre o aerofólio, e/ou usada em um sistema de controle distribuído para aumentar a eficiência e/ou reduzir os danos, por exemplo, a uma ou mais turbinas eólicas.