

(12) **FASCÍCULO DE PATENTE DE INVENÇÃO**

(22) Data de pedido: 2010.07.20	(73) Titular(es): LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA	
(30) Prioridade(s):	ESTRADA DA PORTELA, ZAMBUJAL 2720-866	
(43) Data de publicação do pedido: 2012.05.25	AMADORA	PT
(45) Data e BPI da concessão: 2013.02.07 30/2013	(72) Inventor(es): JOÃO CARLOS DE CAMPOS HENRIQUES ANA ISABEL LOPES ESTANQUEIRO	PT PT
	(74) Mandatário: LUÍS MANUEL DE ALMADA DA SILVA CARVALHO RUA VÍCTOR CORDON, 14 1249-103 LISBOA	PT

(54) Epígrafe: **PÁ PARA TURBINA EÓLICA COM BAIXA EMISSÃO DE RUÍDO EM AMBIENTE URBANO**

(57) Resumo:

O PRESENTE INVENTO DIZ RESPEITO A UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL (1), COM UMA RAIZ (7), UMA EXTREMIDADE (8), UM BORDO DE ATAQUE (9), UM BORDO DE FUGA (10), UM EXTRADORSO CONVEXO (11) E UM INTRADORSO (12) CÔNCAVO, CONVEXO OU EM FORMA DE FORMA DE 'S'. É CARACTERIZADA POR SER CONSTRUÍDA COM UM ÚNICO PERFIL COM MODIFICAÇÃO DA SUA LINHA MÉDIA DE MODO A SATISFAZER UMA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA DO PERFIL AO LONGO DA CORDA AXIAL DA PÁ, COM REDUÇÃO DO PICO DE PRESSÃO NA SECÇÃO DA PÁ PARA ELEVADOS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DO ESCOAMENTO E COM RECUPERAÇÃO DE PRESSÃO SUAVE ENTRE O PONTO DE SUCÇÃO MÁXIMA E O BORDO DE FUGA DO PERFIL, PERFIL ESSE QUE É CONSTITUÍDO PELAS SECÇÕES (17) AO LONGO DA ENVERGADURA, CONSTRUÍDAS A PARTIR DE UM CONJUNTO DE COORDENADAS ADIMENSIONAIS, COM UM COEFICIENTE DE PRESSÃO MÁXIMO DE 1,5 E REDUZIDA EMISSÃO DE RUÍDO DE ORIGEM AERODINÂMICA, EM QUE X/C E Y/C SÃO COORDENADAS ADIMENSIONAIS QUE CORRESPONDEM ÀS COORDENADAS E DIMENSÕES REAIS DO PERFIL DA SECÇÃO DA PÁ DIVIDIDOS PELO COMPRIMENTO DA CORDA DA MESMA 'C' USADAS PARA A CONSTRUÇÃO DE UM PERFIL AERODINÂMICO (17).

RESUMO

"PÁ PARA TURBINA EÓLICA COM BAIXA EMISSÃO DE RUÍDO EM AMBIENTE URBANO"

O presente invento diz respeito a uma turbina eólica de eixo horizontal, com uma raiz (7), uma extremidade (8), um bordo de ataque (9), um bordo de fuga (10), um extradorso convexo (11) e um intradorso (12) côncavo, convexo ou em forma de forma de "S". É caracterizada por ser construída com um único perfil com modificação da sua linha média de modo a satisfazer uma distribuição de carga do perfil ao longo da corda axial da pá, com redução do pico de pressão na secção da pá para elevados ângulos de incidência do escoamento e com recuperação de pressão suave entre o ponto de sucção máxima e o bordo de fuga do perfil, perfil esse que é constituído pelas secções (17) ao longo da envergadura, construídas a partir das coordenadas adimensionais da Tabela 1, com um coeficiente de pressão máximo de 1,5 e reduzida emissão de ruído de origem aerodinâmica, em que $\frac{x}{c}$ e $\frac{y}{c}$ são coordenadas adimensionais que correspondem às coordenadas e dimensões reais do perfil da secção da pá divididos pelo comprimento da corda da mesma "c" usadas para a construção de um perfil aerodinâmico (17).

DESCRIÇÃO

"PÁ PARA TURBINA EÓLICA COM BAIXA EMISSÃO DE RUÍDO EM AMBIENTE URBANO"

CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se a uma pá para uma turbina eólica de eixo horizontal que combina uma elevada extracção de energia do vento com baixa emissão de ruído.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

O aproveitamento da energia eólica constitui já uma importante contribuição para o desenvolvimento sustentado, sendo actualmente uma alternativa praticamente consensual à utilização dos combustíveis fósseis para produção de energia eléctrica.

São vários os factores que tornaram a energia eólica competitiva e deles se destaca a maturidade tecnológica alcançada por diversos fabricantes de turbinas e seus componentes, e o investimento de muitos dos países desenvolvidos em fontes de energia renováveis.

Até há pouco tempo, os sistemas de pequena potência eram tradicionalmente utilizados em situações

pontuais e bem definidas como, por exemplo, quintas isoladas, ilhas remotas, instalações em países ou regiões não electrificados entre outros. Recentemente, as dificuldades energéticas com que se debatem a maioria dos países e a necessidade de redução da dependência de combustíveis fósseis provenientes de regiões do globo onde as convoluções económicas, políticas e sociais são cada vez mais preocupantes, levaram à definição de um novo âmbito de aplicação destes conversores de energia renovável, ou seja, o contexto do "consumidor/produtor de energia" em ambiente construído ou urbano, bem como a construção de edifícios, urbanizações e cidades energeticamente sustentáveis.

Por razões económicas, e quase de imposição do mercado, a investigação e o desenvolvimento no domínio da energia eólica foram orientados para os sistemas de grande potência. Face ao elevado esforço posto em jogo pelas empresas no desenvolvimento de grandes turbinas, não é de estranhar que os sistemas de pequena potência não tenham sido objecto da mesma atenção. Em parte por isso, o desempenho destes últimos pouco evoluiu nas últimas décadas, verificando-se que o rendimento da maioria das pequenas turbinas é bastante inferior ao das turbinas de grande dimensão.

A maioria das soluções actualmente disponíveis no mercado das pequenas turbinas eólicas caracterizam-se por baixos rendimentos aerodinâmico e de conversão mecano-eléctrica. Tal deve-se, na maioria dos casos, ao recurso a metodologias simplificadas de projecto das pás, e à

utilização de perfis aerodinâmicos ultrapassados, cujas características estáticas e dinâmicas nem sempre se adequam da melhor forma às dos geradores eléctricos que accionam, ou à especificidade das condições do vento que actua sobre as turbinas.

O projecto das pás e a optimização do funcionamento dos rotores de turbinas eólicas de pequena dimensão, para ambiente urbano e construído, sofre de dificuldades acrescidas, quando comparado com o projecto de turbinas de grande dimensão, essencialmente por duas razões: a primeira, pela sua gama de funcionamento se situar numa banda de velocidades de vento relativamente baixas, a segunda, por operarem a velocidades de rotação muito mais elevadas - tipicamente da ordem de várias centenas de rotações por minuto - que as grandes turbinas eólicas disponíveis no mercado. Estes dois factores são os principais contribuintes para a acentuada emissão de ruído, característica da maioria das pequenas turbinas eólicas existentes no mercado, e para o seu reduzido rendimento aerodinâmico.

O desenvolvimento de secções de perfis aerodinâmicos para construção de pás de turbinas eólicas tem sido objecto de intensa actividade na última década. A maioria destas pás e perfis destinam-se à aplicação em turbinas eólicas de grande dimensão (tipicamente com envergadura de pá superior a 25 m), as quais são usualmente instaladas em regiões rurais ou montanhosas onde sopram ventos muito fortes e, naturalmente, distantes das

populações. As pás destas grandes turbinas atingiram um elevado ponto de maturidade do ponto de vista aerodinâmico e têm sido objecto de elevado número de pedidos de patente (e.g. US 2007/0036657 A1). No presente documento citam-se algumas das mais relevantes no contexto do presente registo de patente.

Embora exista preocupação dos projectistas e industriais do sector eólico de grandes turbinas com a emissão de ruído eventualmente nocivo - tal como demonstra a patente US 6,398,502 B1 - estes recorrem a invenções e alterações junto das extremidades das pás para redução destas emissões [W02004/061298A3 e W02008/031913A1]. O facto destas turbinas de grande dimensão serem caracterizadas por velocidades de rotação baixas (da ordem de uma ou duas dezenas de rotações por minuto) e de operarem normalmente em locais suficientemente distantes dos aglomerados populacionais, leva a que praticamente todas elas cumpram as normas internacionais em vigor para o sector eólico [IEC 61400-11:2002 (2nd ed.). Wind Turbine Generator Systems - Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques].

O desenvolvimento de secções de perfis aerodinâmicos para construção de pás de pequenas turbinas eólicas - cuja aplicação de excelência consiste na instalação nas coberturas ou espaços anexos a residências ou pequenas empresas, com grande proximidade a populações - tem registado pouca actividade que conduza à melhoria do desempenho destas pás, quer numa perspectiva de aumento do

seu desempenho aerodinâmico, quer na redução da emissão de ruído, sendo este último, actualmente um dos principais obstáculos à proliferação de pequenas turbinas eólicas.

Embora este nicho de instalações eólicas tenha verificado progressos e se identifique (pelo menos) um depósito de patente especificamente orientada para o sector (pedido de registo de patente WO2009/062159A1) no qual as preocupações expressas são comuns às da presente invenção, os seus resultados são de difícil aplicação devido ao elevado número de perfis desenvolvidos e apresentados, sendo que a sua aplicação ao sector das pequenas turbinas comporta uma complexidade de meios dificilmente comportável com os baixos custos produtivos que requer este nicho industrial. Por sua vez, a família de perfis propostos em WO2009/062159A1 não contém as características de distribuição de carga - definida como a diferença de pressão do extradorso e do intradorso ao longo da corda axial - da presente invenção, representadas na Figura 8, já que a distribuição de carga da presente invenção é muito mais suave do que as distribuições de carga dos perfis descritos na patente WO2009/062159A1.

Os métodos utilizados na presente invenção e publicados em [J.C.C. Henriques, F. Marques da Silva, A.I. Estanqueiro, L.M.C. Gato, 2009, *Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method*, Renewable Energy, Volume 34, Issue 12, Pages 2728-2734, ISSN 0960-1481] e em [Henriques, J. C. C., F. Marques da Silva, A. I. Estanqueiro e L. M. C. Gato. *A new urban wind*

turbine blade design using a pressure-load inverse method. Published at the Proceedings of the European Wind Energy Conference, Maio 2008, Brussels. pp 175-179] permitiram otimizar a distribuição de pressão ao longo da corda axial relativamente aos das secções apresentadas na patente WO2009/062159A1.

Assim, com a presente invenção foi possível obter coeficientes de sustentação consideravelmente mais elevados (valor máximo do coeficiente de sustentação de 1.5) com gradientes de pressão muito mais suaves ao longo da corda axial, enquanto a invenção descrita em WO2009/062159A1 não excede um coeficiente de sustentação de 1,1 para as dimensões comuns às testadas na presente invenção.

Importa igualmente salientar que a presente invenção se refere a uma pá que pode ser construída à custa de um único perfil descrito pelas coordenadas adimensionais da Tabela 1 (apresentada adiante), ou de este perfil em associação com outros perfis definidos por diferentes coordenadas adimensionais, enquanto a invenção descrita em WO2009/062159A1 requer a aplicação de toda uma família de perfis, no caso em número mínimo de 3.

Sem querer ficar limitados pela teoria, tudo indica que a propriedade de baixa emissão de ruído entretanto obtida para o presente invento, é devida à distribuição de pressões ilustrada nas Figuras 7 e 8, a qual foi introduzida no projecto do perfil com o objectivo primeiro de maximizar o coeficiente de sustentação e,

assim, a eficiência aerodinâmica da pá.

Essa distribuição suave de pressões, que constitui um parâmetro do projecto aerodinâmico, teve impacto na redução da emissão de ruído da secção da pá, objecto do corrente registo, comparativamente com os resultados da invenção descrita no pedido de patente WO2009/062159A1. Embora a designação do invento WO2009/062159A1 faça referência a perfis silenciosos, tal característica não é, na prática, reivindicada no seu registo.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

O objectivo da presente invenção consiste em proporcionar uma pá particularmente adequada à utilização em pequenas turbinas eólicas, para aplicações urbanas ou em ambiente construído, com eficiência elevada a baixas velocidades do vento. Para este efeito, utilizou-se uma metodologia de projecto directo que modifica a linha média do perfil de modo a satisfazer uma distribuição de carga do perfil especificada ao longo da corda axial da pá.

Os objectivos da presente invenção foram inteiramente alcançados, tendo-se proporcionado uma nova pá que, por um lado, atinge elevado desempenho aerodinâmico na gama de velocidades típica das pequenas turbinas e, por outro, apresenta baixos níveis de emissão de ruído na gama de velocidade de rotação elevada (da ordem de várias centenas de rotações por minuto) em que as pás operam.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A Figura 1 ilustra uma instalação de energia eólica, formada por uma turbina de eixo horizontal do estado da técnica e o esquema dos seus principais componentes. As pás (1) estão encastradas no cubo (16) através de uma longarina (15) e accionam, por interacção com o vento incidente, um veio de rotação (2) que está ligado directamente, ou indirectamente através de uma caixa de velocidades (3), a um gerador (4). Este gerador (4) está instalado na nacelle (5), que por sua vez está montada numa torre (6). As pás definidas por secções (14), iguais ou diferentes ao longo da envergadura, estão limitadas por uma raiz (7), uma extremidade (8), um bordo de ataque (9), um bordo de fuga (10).

A Figura 2 ilustra uma pá de uma turbina eólica de eixo horizontal definida usando ao longo da envergadura secções ou perfis (17) construídos com as coordenadas da Tabela 1 (apresentada adiante).

A Figura 3 representa uma secção da pá ou perfil aerodinâmico (17) construído com as coordenadas da Tabela 1 (apresentada adiante). A secção é definida por um extradorso (11), um intradorso (12) e uma corda (13) que liga em linha recta o bordo de ataque (9) ao bordo de fuga (10).

A Figura 4 ilustra o ângulo de torção (18) de uma pá, definido entre o plano perpendicular ao veio de rotação

(2) e a corda de cada secção que constitui a pá (1). Estão representadas diversas secções ao longo da envergadura. As cordas maiores correspondem a secções mais próximas da raiz da pá (1). O ângulo de torção 18 apresenta valores variáveis entre $[0^\circ, 90^\circ]$ ao longo da envergadura.

A Figura 5 apresenta o volume de controlo, Ω , usado para o balanço da quantidade de movimento segundo a direcção tangencial numa cascata de perfis.

A Figura 6 representa a distribuição da carga axial adimensional, em função da corda axial adimensional, utilizada no projecto da secção (17).

A Figura 7 apresenta a distribuição da componente normal da pressão, ao longo da superfície da secção (17), para um ângulo de 6° da velocidade relativa W à entrada da cascata.

A Figura 8 ilustra a distribuição do coeficiente de pressão ao longo da corda da secção (17), para um ângulo de 6° da velocidade relativa W à entrada da cascata.

DESCRIÇÃO PORMENORIZADA DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se a uma pá de uma turbina eólica que utiliza uma secção ou perfil que foi obtido com características tais, que a máxima sustentação aerodinâmica é obtida com uma entrada em perda tão suave quanto possível. Para além disso, a secção obtida permitiu

retardar o aparecimento da geração de bolhas de separação laminares e reduzir o ruído gerado pela interacção entre a camada limite e o bordo de fuga do perfil.

A figura 1 ilustra esquematicamente os principais componentes de um conversor eólico de eixo horizontal, correntemente designado por turbina eólica de eixo horizontal. As pás (1), detalhadamente representadas na figura 2, estão encastradas no cubo (16) através de uma longarina (15) e accionam, por interacção com o vento incidente, um veio de rotação (2) que está ligado directamente, ou indirectamente através de uma caixa de velocidades (3), a um gerador (4). Este gerador (4) está instalado na *nacelle* (5), que por sua vez está montada numa torre (6). As pás (1) da turbina eólica funcionam com velocidade de rotação constante ou variável, em função do sistema de controlo de potência que for instalado na turbina.

As pás de uma turbina eólica de eixo horizontal são caracterizadas por terem uma raiz (7), uma extremidade (8), um bordo de ataque (9), um bordo de fuga (10), um extradorso convexo (11) e um intradorso (12) côncavo, convexo ou em forma de forma de "S", e com uma corda (13) que une, em linha recta e em cada secção, o bordo de ataque (9) ao bordo de fuga (10) do perfil.

Metodologia de projecto do perfil da pá

Uma das fases fundamentais do projecto de

turbinas eólicas passa pelo projecto do perfil aerodinâmico das pás. No que respeita à concepção de pás e rotores, existem essencialmente duas metodologias de projecto. A primeira, usualmente conhecida como método directo ou de análise [e.g. Abbott I, von Doenhoff A. Theory of Wing Sections. Dover Publications Inc., New York, 1959], modifica a geometria da pá tendo por base os resultados numéricos ou experimentais obtidos para o escoamento através do rotor da turbina. Em oposição a estes métodos, existe uma segunda classe cujos métodos se designam por indirectos ou inversos, e que permitem determinar qual a geometria que satisfaz certas condições de escoamento especificadas como dados iniciais do problema [e.g. Filippone A. Airfoil inverse design and optimization by means of viscous-inviscid techniques. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 56(2-3):123-136, 1995].

O projecto aerodinâmico de secções de pás, descrito detalhadamente em [J.C.C. Henriques, F. Marques da Silva, A.I. Estanqueiro, L.M.C. Gato, 2009, *Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method*, Renewable Energy, Volume 34, Issue 12, Pages 2728-2734, ISSN 0960-1481] baseia-se na imposição da carga, definida como a diferença de pressão entre os dois lados da pá, ao longo da corda axial do perfil. A condição de projecto é a quantidade de movimento média na direcção tangencial, $\overline{M}_y$, definida como função da corda axial $\frac{x}{c}$. Partindo do balanço de quantidade de movimento segundo a

direcção tangencial, y , em escoamento invíscido e estacionário, tem-se

$$\int_{\partial\Omega} (\rho W_y \mathbf{W} \cdot \mathbf{n} + p n_y) dl = 0 ,$$

onde $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ é o vector unitário normal à fronteira do domínio, $\partial\Omega$, e $\mathbf{W} = (W_x, W_y)$ as componentes da velocidade segundo direcção axial e tangencial. Aplicando esta equação ao volume de controlo representado na figura 5 e assumindo escoamento incompressível, resulta em

$$\rho \int_{BC} W_y W_x dy - \rho \int_{DA} W_y W_x dy + \int_{CD} p dx - \int_{AB} p dx = 0 ,$$

onde $dx = n_y dl$ e $\mathbf{W} \cdot \mathbf{n} = 0$ na superfície do perfil. Considerando um pequeno Δx , temos

$$\rho \int_{BC} W_y W_x dy - \rho \int_{DA} W_y W_x dy = -(p_{(11)} - p_{(12)}) \Delta x ,$$

designando (11) e (12) o extradorso e intradorso da pá respectivamente, figura 3. Sabendo que o fluxo mássico é constante entre a entrada e a saída do volume de controlo Ω ,

$$\dot{m} = \rho \int_{BC} W_x dy = \rho \int_{DA} W_x dy ,$$

e fazendo $\Delta x \rightarrow 0$, obtemos

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\rho \int_{y(11)}^{y(12)} W_y W_x y}{\dot{m}} \right) = - \frac{\Delta p}{\dot{m}},$$

com $\Delta p = p_{(11)} - p_{(12)}$. Definindo a quantidade de movimento tangencial média por

$$\overline{M}_y = \frac{\rho \int_{y(11)}^{y(12)} W_y W_x dy}{\dot{m}},$$

obtemos finalmente

$$- \frac{\Delta p}{\dot{m}} = \frac{d\overline{M}_y}{dx}.$$

Relacionando o ângulo da linha média do perfil com o ângulo da velocidade tangencial média, podemos definir o seguinte esquema iterativo de modificação da linha média, lm , baseado na especificação da carga da pá

$$\left(\frac{dy_{lm}}{dx} - \overline{M}_y^{sp} \right)^{n+1} = \left(\frac{dy_{lm}}{dx} - \overline{M}_y \right)^n,$$

onde n designa o número da iteração e sp o valor especificado. Finalmente, a linha média pode ser obtida facilmente integrando $\frac{dy_{lm}}{dx}$ ao longo da corda axial.

Para o problema ficar completamente definido, é necessário especificar a distribuição de espessura ao longo da linha média e a carga do perfil ao longo da corda axial, $\frac{\Delta p}{\dot{m}}$. Para o cálculo do escoamento invíscido em torno da cascata de pás da figura 5 utilizou-se o método de painel descrito em [L.M.C. Gato, J.C.C. Henriques, 1996,

Optimization of symmetrical profiles for Wells turbine rotor blades. In: Proceedings of the ASME fluids eng. Division summer meeting, number 3, Pages 623-30].

Projecto da secção da pá

A forma construtiva do perfil da secção da pá, que constitui a presente invenção, está descrita na Tabela 1 em coordenadas adimensionais, $\frac{x}{c}$ e $\frac{y}{c}$, as quais correspondem às coordenadas e dimensões reais do perfil da secção da pá divididos pelo comprimento da corda (13) da mesma, c .

Tabela 1. Coordenadas adimensionais $\frac{x}{c}$ e $\frac{y}{c}$ usadas para a construção do perfil (17).

Extradorso	
x/c	y/c
0,000000	0,000000
0,000611	0,008880
0,004487	0,017095
0,009941	0,024570
0,016493	0,031719
0,024120	0,038859
0,032938	0,046191
0,043095	0,053833
0,054744	0,061842
0,068018	0,070217
0,083028	0,078910
0,099855	0,087824
0,118537	0,096830
0,139086	0,105736
0,161483	0,114302

Intradorso	
x/c	y/c
0,000000	0,000000
0,004461	-0,008195
0,011683	-0,014219
0,019953	-0,018835
0,028547	-0,022498
0,037043	-0,025447
0,045154	-0,027831
0,059426	-0,031279
0,070320	-0,033412
0,091257	-0,036567
0,105543	-0,038123
0,120966	-0,039316
0,136336	-0,040034
0,151340	-0,040294
0,166926	-0,040127

0,185646	0,122392
0,211502	0,129767
0,238987	0,136015
0,267963	0,140788
0,298215	0,143947
0,329493	0,145611
0,361566	0,145804
0,394205	0,144670
0,427190	0,142378
0,460300	0,139014
0,493316	0,134718
0,526014	0,129617
0,558168	0,123858
0,589567	0,117680
0,619986	0,111176
0,649222	0,104398
0,677123	0,097495
0,703538	0,090495
0,728419	0,083690
0,751731	0,077291
0,773374	0,071171
0,793310	0,065318
0,811557	0,059813
0,843243	0,050293
0,868942	0,042475
0,889560	0,035970
0,906379	0,030579
0,926817	0,023998
0,943595	0,018607

0,184930	-0,039402
0,206937	-0,037709
0,233894	-0,034372
0,266130	-0,028861
0,303448	-0,021066
0,345301	-0,010978
0,391060	0,001052
0,415220	0,007499
0,440134	0,014005
0,465733	0,020327
0,491917	0,026264
0,518567	0,031615
0,545539	0,036207
0,572646	0,039993
0,599693	0,042929
0,626474	0,044907
0,652761	0,045938
0,678333	0,046092
0,702995	0,045413
0,726595	0,044256
0,749011	0,042776
0,770135	0,040912
0,789888	0,038730
0,808228	0,036379
0,840662	0,031847
0,867525	0,027589
0,889259	0,023679
0,906713	0,020325
0,932904	0,015049

0,957797	0,014028
0,970023	0,010050
0,984906	0,005159
0,999975	0,000197

0,952420	0,010959
0,967998	0,007556
0,987275	0,003163
0,999975	0,000197

O perfil (17) obtido com as coordenadas da Tabela 1 está desenhado na figura 3. Este perfil foi desenhado aplicando ao método de projecto directo, descrito anteriormente, a distribuição de carga representada na figura 6.

Um outro objectivo do projecto da secção de pá correspondente à Tabela 1, consistiu na redução do pico de pressão na secção da pá para elevados ângulos de incidência do escoamento, ver figuras 7 e 8. Procurou-se também uma recuperação de pressão suave entre o ponto de sucção máxima e o bordo de fuga do perfil, figura 8.

A pá (1) construída com o perfil aerodinâmico (17) - ou por associação deste perfil com outros de diferentes coordenadas - que constitui a presente invenção, é particularmente adequada para aplicação na construção de turbinas eólicas para operação em ambiente urbano ou construído, embora possa ter igualmente aplicações na aeronáutica. Na elevada gama de velocidade de rotação típica de funcionamento de uma turbina eólica (da ordem de várias centenas de rotações por minuto), a pá (1), objecto da presente invenção, apresenta emissões de ruído reduzidas e claramente mais baixas que as existentes no mercado.

A distribuição otimizada de carga ao longo da corda axial utilizada no desenho do perfil (17), difere da distribuição apresentada em [J,C,C, Henriques, F, Marques da Silva, A,I, Estanqueiro, L,M,C, Gato, 2009, *Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method*, Renewable Energy, Volume 34, Issue 12, Pages 2728-2734, ISSN 0960-1481] e em [Henriques, J. C. C., F. Marques da Silva, A. I. Estanqueiro e L. M. C. Gato. *A new urban wind turbine blade design using a pressure-load inverse method*. Published at the Proceedings of the European Wind Energy Conference, Maio 2008, Brussels. pp 175-179], por não ser constante ao longo da corda axial. A actual distribuição, que teve na sua origem a necessidade de redução de custos de fabrico das pás, bem como limitações construtivas do bordo de ataque, aumenta suavemente desde o bordo de ataque do perfil até aos 49% da corda axial, e desce suavemente até perto de zero no bordo de fuga.

Definição geométrica da pá

A pá (1) é definida utilizando diversas secções (14), que têm um ângulo de torção (18), que é definido entre o plano perpendicular ao veio de rotação (2) e a corda de cada secção que constitui a pá, variável ao longo da envergadura e que apresenta valores entre $[0^\circ, 90^\circ]$ ao longo dessa envergadura.

As dimensões típicas da envergadura da pá (1) serão entre 0,2 m e 20 m, medidas entre a raiz (7) e a

extremidade (8) da pá, e uma corda (13) preferivelmente variável entre 0,03 m e 3 m, sendo usual a corda da raiz (7) ser maior que a corda na extremidade (8).

Pode construir-se uma pá de turbina eólica recorrendo unicamente a secções (14) definidas pelo perfil aerodinâmico obtido (17) a partir das coordenadas da Tabela 1, ou utilizando este perfil em conjunto com outros perfis aerodinâmicos conhecidos, caracterizados por outras coordenadas adimensionais, de forma a adequar a operação da turbina eólica aos objectivos do seu projecto.

O material de construção da pá não está particularmente limitado.

A construção de pás de turbinas eólicas faz parte do estado da técnica sendo, regra geral, efectuada à custa de moldes [Hau, Erich, Wind Turbines. Fundamentals, technologies, Application, Economics. Chapter 7 - Rotor Blades. Springer-Verlag, 2006, 2nd ed. pp774].

Lisboa, 8 de Outubro de 2012

REIVINDICAÇÕES

1. Pá (1) de uma turbina eólica de eixo horizontal, com uma raiz (7), uma extremidade (8), um bordo de ataque (9), um bordo de fuga (10), um extradorso convexo (11) e um intradorso (12) côncavo, convexo ou em forma de forma de "S" **caracterizada por** ser construída com um único perfil com modificação da sua linha média, com redução do pico de pressão na secção da pá para ângulos de incidência do escoamento entre 15 e 90° e com recuperação de pressão suave entre o ponto de sucção máxima e o bordo de fuga do perfil, perfil esse que é constituído, na sua totalidade ou em parte, pelas secções (17) ao longo da envergadura, construídas a partir das coordenadas adimensionais da tabela abaixo reproduzida, com um coeficiente de pressão máximo de 1,5, em que **x/c** e **y/c** são coordenadas adimensionais que correspondem às coordenadas e dimensões reais do perfil da secção da pá divididos pelo comprimento da corda (13) da mesma " **c** " usadas para a construção de um perfil aerodinâmico (17),

Extradorso	
x/c	
0,000000	0,000000
0,000611	0,008880
0,004487	0,017095
0,009941	0,024570
0,016493	0,031719
0,024120	0,038859
0,032938	0,046191
0,043095	0,053833
0,054744	0,061842
0,068018	0,070217
0,083028	0,078910

Intradorso	
x/c	y/c
0,000000	0,000000
0,004461	-0,008195
0,011683	-0,014219
0,019953	-0,018835
0,028547	-0,022498
0,037043	-0,025447
0,045154	-0,027831
0,059426	-0,031279
0,070320	-0,033412
0,091257	-0,036567
0,105543	-0,038123

0,099855	0,087824
0,118537	0,096830
0,139086	0,105736
0,161483	0,114302
0,185646	0,122392
0,211502	0,129767
0,238987	0,136015
0,267963	0,140788
0,298215	0,143947
0,329493	0,145611
0,361566	0,145804
0,394205	0,144670
0,427190	0,142378
0,460300	0,139014
0,493316	0,134718
0,526014	0,129617
0,558168	0,123858
0,589567	0,117680
0,619986	0,111176
0,649222	0,104398
0,677123	0,097495
0,703538	0,090495
0,728419	0,083690
0,751731	0,077291
0,773374	0,071171
0,793310	0,065318
0,811557	0,059813
0,843243	0,050293
0,868942	0,042475
0,889560	0,035970
0,906379	0,030579
0,926817	0,023998
0,943595	0,018607
0,957797	0,014028
0,970023	0,010050
0,984906	0,005159
0,999975	0,000197

.

0,120966	-0,039316
0,136336	-0,040034
0,151340	-0,040294
0,166926	-0,040127
0,184930	-0,039402
0,206937	-0,037709
0,233894	-0,034372
0,266130	-0,028861
0,303448	-0,021066
0,345301	-0,010978
0,391060	0,001052
0,415220	0,007499
0,440134	0,014005
0,465733	0,020327
0,491917	0,026264
0,518567	0,031615
0,545539	0,036207
0,572646	0,039993
0,599693	0,042929
0,626474	0,044907
0,652761	0,045938
0,678333	0,046092
0,702995	0,045413
0,726595	0,044256
0,749011	0,042776
0,770135	0,040912
0,789888	0,038730
0,808228	0,036379
0,840662	0,031847
0,867525	0,027589
0,889259	0,023679
0,906713	0,020325
0,932904	0,015049
0,952420	0,010959
0,967998	0,007556
0,987275	0,003163
0,999975	0,000197

2. Pá (1) de acordo com a reivindicação 1, caracterizada por o ângulo de torção (18) da pá, definido entre o plano perpendicular ao veio de rotação (2) e a corda (13) de cada secção que constitui a pá apresentar valores variáveis entre $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$ ao longo da envergadura.

3. Pá (1) de acordo com a reivindicação 1, caracterizada por a distribuição de carga ao longo da corda (13) axial aumentar desde o bordo de ataque do perfil até aos 49% da corda axial, e descer até perto de zero no bordo de fuga.

4. Pá (1) de acordo com a reivindicação 1, caracterizada por apresentar uma envergadura tipicamente entre 0,2 m e 20 m, medida entre a raiz (7) e a extremidade (8) da pá (1), e uma corda (13) preferencialmente variável entre 0,03 m e 3 m, sendo usual a corda (13) ser maior na raiz (7) do que na extremidade (8) da pá.

5. Pá (1) de acordo com qualquer das reivindicações anteriores, caracterizada por estar mecanicamente ligada a um veio de rotação (2) e por um sistema de potência instalado na turbina eólica controlar a velocidade do veio de rotação (2).

6. Rotor de uma turbina eólica de eixo horizontal constituído por uma ou mais pás (1) de acordo com

qualquer das reivindicações anteriores, caracterizado por a ligação entre as pás e o rotor ser feita por um cubo (16) solidário com um veio de rotação (2).

7. Rotor de acordo com a reivindicação anterior, caracterizado por ser constituído por três pás (1).

Lisboa, 8 de Outubro de 2012

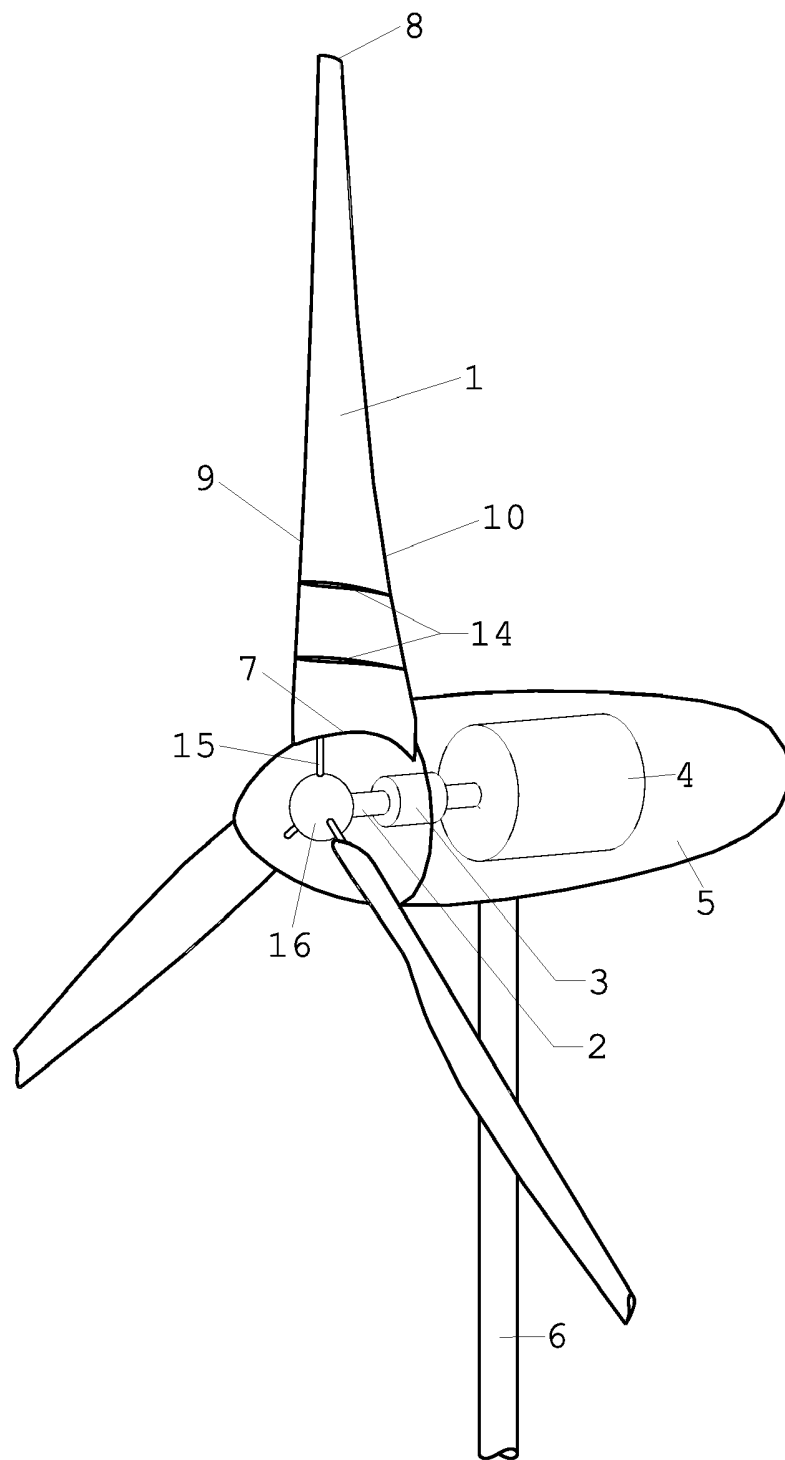


Figura 1

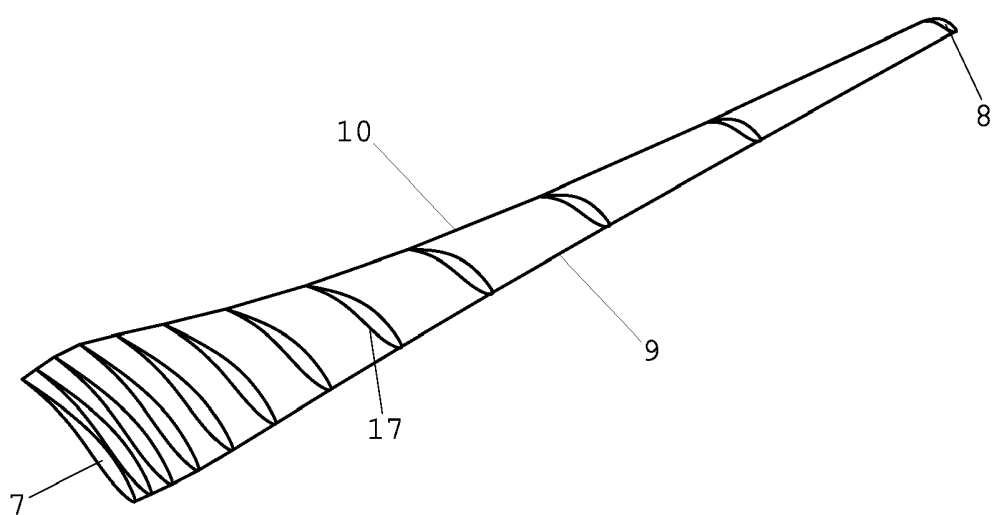


Figura 2

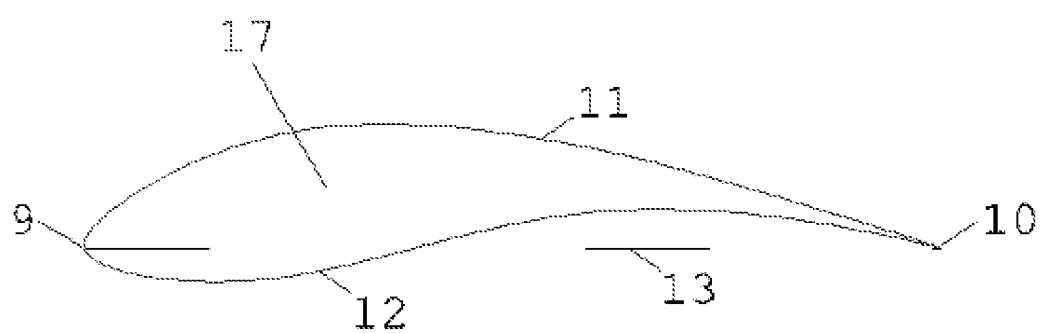


Figura 3

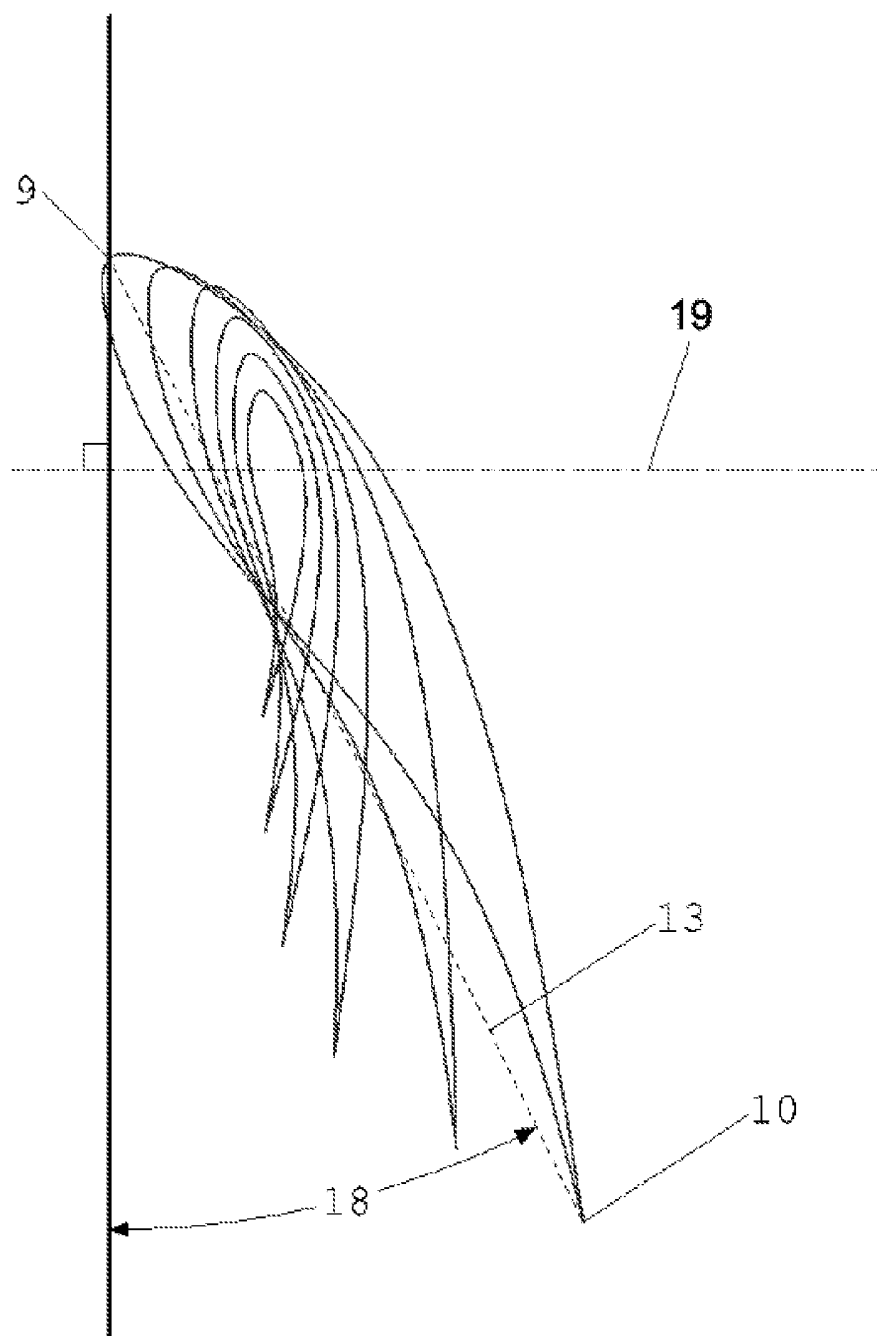


Figura 4

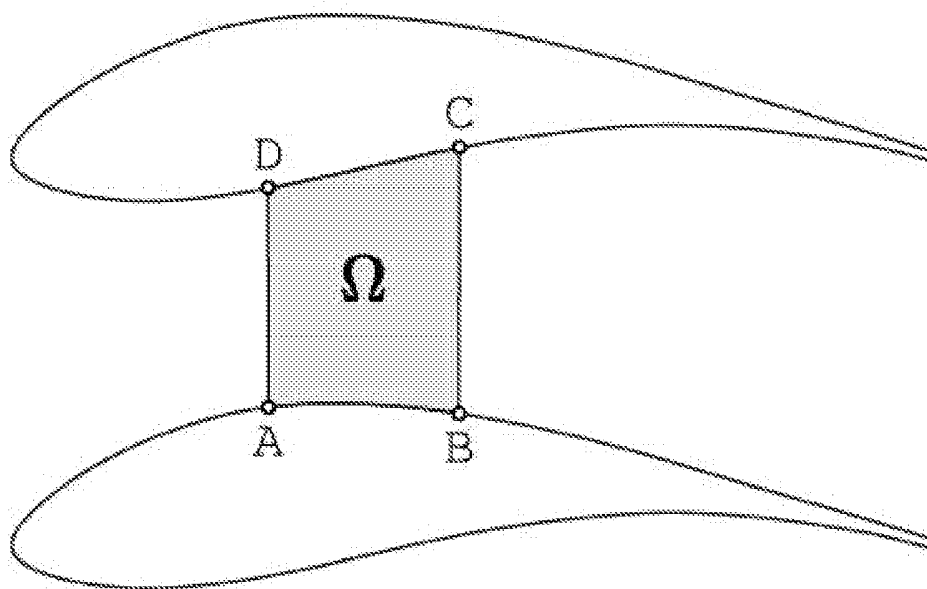


Figura 5

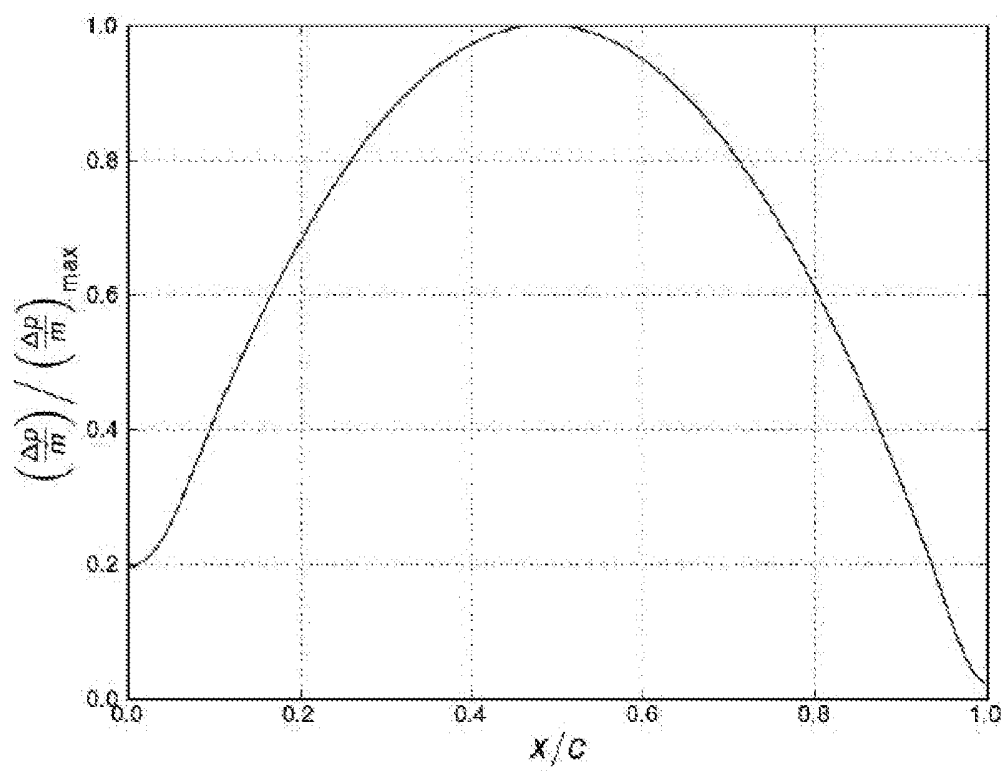


Figura 6

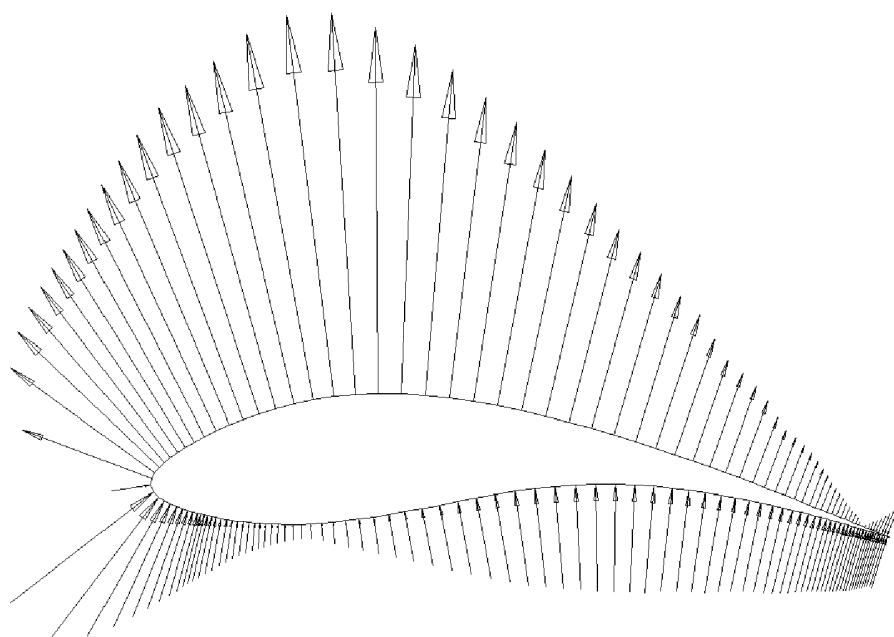


Figura 7

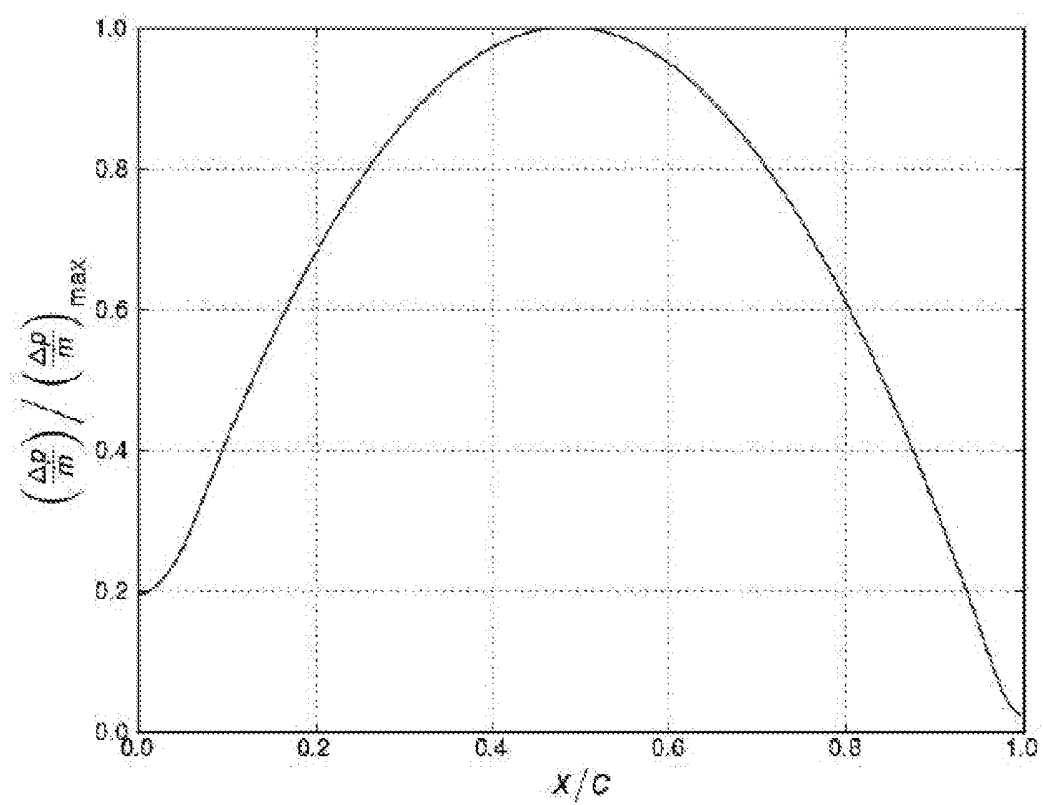


Figura 8