



ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE POTÊNCIA DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS BIOINSPIRADAS

Lohanna Paiva, lohanna.ufu@gmail.com¹
Odenir de Almeida, odenir.almeida@ufu.br¹

¹Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Av. João Naves de Ávila, 2121.

Resumo. A energia eólica é essencial para a geração de eletricidade de forma ambientalmente justa e eficientemente sustentável. Os países têm envidado esforços para implementar políticas específicas, indispensáveis à continuidade da sua representação na produção de energia. Conforme apontam os dados, a fonte eólica apresenta tendência de expansão do mercado, tanto no que se refere à geração quanto ao consumo de energia. Essa tendência ocorre especialmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil, cuja taxa de crescimento médio tem revelado um mercado pujante, com capacidade para alimentar a cadeia produtiva do setor anualmente. O ponto de partida deste trabalho é apresentar o estudo do desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte (HAWT) por meio de testes em túnel de vento de baixa velocidade, inspirado em sementes anemocóricas, ou seja, dispersas pelo vento, no caso a semente *Qualea multiflora* Mart. (Vochysiaceae) da vegetação do Cerrado brasileiro. Para avaliar e comparar o coeficiente de potência, C_p , um rotor convencional construído inteiramente baseado na Teoria do Elemento de Pá (BEM – *blade element method*) foi utilizado como referência (*baseline*). Ambos HAWT foram testados para baixas velocidades de vento comumente encontradas no interior do Brasil, como 4 a 6 m/s. Uma bancada de trabalho experimental foi projetada e construída para medir corretamente a velocidade de rotação, potência de saída e torque para o protótipo testado. A escolha de sementes dispersas pelo vento, como a *Q. multiflora*, mostrou potencial para insights futuros sobre o design inspirado na natureza.

Palavras chave: Energia eólica. Aerodinâmica. Túnel de vento. Experimental. Anemocórica

1. INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural) nas centrais termoelétricas geram grandes impactos ambientais devido à emissão de CO₂ e de gases poluentes, contrariamente ao que se passa com as fontes renováveis, como a energia eólica. Essa vem se apresentando, nos últimos anos, como uma das mais promissoras fontes de energia renovável, devido, principalmente, à sua natureza inesgotável e não poluidora, além da sua eficiência. Dessa forma, o estudo de aerogeradores vem ganhado espaço nas discussões acadêmicas e na produção científica.

Embora pareça nova, a energia eólica é usada há mais de 3 mil anos. Antigamente ela era utilizada por meio dos moinhos, que serviam para bombear ou drenar água, moer grãos e outras atividades que dependiam de força mecânica. Ao longo do tempo, passaram a utilizar a força dos ventos não só para gerar força mecânica, mas também energia elétrica. Com o avanço tecnológico, esses foram sendo substituídos por aerogeradores aptos a gerar uma quantidade maior de energia com os avanços em materiais e compreensão da aerodinâmica. Como o consumo de energia elétrica tem crescido nas últimas décadas nas áreas residenciais e industriais, os governos de todo o mundo se viram obrigados a estudar novas fontes de fornecimento de energia. É nesse contexto que fontes renováveis de energia vêm ganhando importância.

Assim, o potencial eólico global tem motivado projetos de turbinas eólicas para as diferentes faixas de aplicação. O Brasil, nesse cenário, apresenta um crescimento expressivo nos últimos anos aproveitando uma posição privilegiada na lista dos países com maior potencial de geração de energia eólica com perspectivas promissoras. Prova disso é que segundo estudos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Brasil tem potencial de 300 GW de geração eólica, o que corresponde a 2,2 vezes a matriz elétrica brasileira.

Dentre as possibilidades de formas de pesquisa, tem-se a interdisciplinaridade entre engenharia e biomimética, ciência inspirada pela natureza para projetar soluções inovadoras, a qual tem contribuído significativamente neste contexto, especialmente na mímesis de sementes e frutos dispersos pelo vento (anemocóricos). Seu princípio básico é ter a natureza como modelo, medida e mentor do processo de design (Queiroz, *et al.*, 2016). No campo da energia eólica, esta ciência holística fomentou um desenvolvimento tecnológico significativo.

Neste contexto, esta pesquisa, inspirada em sementes que permitem robusta produção de força aerodinâmica e vôo estável, propõe um modelo simplificado inicial de lâmina ou pá biomimética (protótipo) para a pá do rotor de uma turbina eólica de eixo horizontal (HAWT). Diante disso, tem-se como objetivo melhorar o desempenho de pás de turbinas eólicas de baixo custo, sem partes móveis, através da condução de estudos de desempenho das pás aerodinâmicas e dessa forma

avaliar o potencial de mimese do esquizocarpo de sementes de espécies anemocóricas do Cerrado e a obtenção de seu coeficiente de potência integral, C_p , em uma ampla faixa de razões de velocidade, avaliando sua robustez aerodinâmica.

A pesquisa e análise do estado da arte são de grande importância no projeto em questão, uma vez que se deseja ter um produto final viável e competitivo no mercado existente. Primeiramente, determina-se que a turbina a ser projetada será de eixo horizontal e de pequeno porte para uso doméstico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

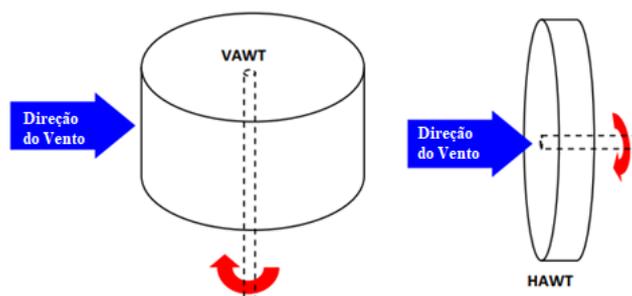
2.1. Princípio de Funcionamento

De maneira geral, aerogeradores, ou turbinas eólicas, são máquinas compostas pelo cubo do rotor ou “*hub*” e pás, que capturam energia cinética do vento e transforma em energia mecânica de rotação. Normalmente estas máquinas são utilizadas para a geração de energia elétrica através de acoplamento com geradores, mas também, aerogeradores podem ser utilizados em sistemas de bombeamento ou outros sistemas mecânicos. Esta, pode operar desde baixas rotações (ex. 36 RPM) a rotações mais altas (ex: 1.800 RPM).

2.2. Principais Classificações

Analisando sua forma construtiva, a orientação do eixo e eixo rotacional determina-se a primeira classificação do vento-turbina. Uma turbina com um eixo montado horizontalmente paralelo ao solo é conhecida como turbina eólica de eixo horizontal ou *horizontal axis wind turbine* - (HAWT). Uma turbina eólica de eixo vertical - *vertical axis wind turbine* (VAWT) tem seu eixo normal ao solo, como mostrado na Fig. 1.

Figura 1. Configurações para orientação do eixo e do rotor (Adaptado pela autora).



As duas configurações têm projetos de rotores instantaneamente distinguíveis, cada um com suas próprias características. A configuração tipo VAWT pode ser atribuída a uma baixa relação de velocidade da ponta e dificuldade em controlar a velocidade do rotor, entretanto, esta não requer nenhum mecanismo adicional para enfrentar o vento e equipamentos geradores pesados podem ser montado no chão, reduzindo assim as cargas da torre. A configuração HAWT tem como característica o aumento do controle do rotor através do controle de inclinação e guinada da pá. Quanto à sua potência nominal, classifica-se turbinas de Pequeno Porte (até 50 kW de potência), Médio Porte (potência de 50 a 1000kW), e Grande Porte (acima de 1MW de potência).

2.3. Máxima Eficiência Teórica

Para aumentar a extração de energia eólica dentro dos limites de produção possível deve-se aumentar a eficiência do rotor desejável. Energia (P) transportada pelo ar em movimento é expressa como uma soma de sua energia cinética Eq. (1):

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

onde, ρ (kg/m^3) é a densidade do ar e A (m^2) é a área do disco do rotor e v (m/s) é a velocidade do nominal do ar.

Segundo Burton (2011), a extração de energia é mantida em um processo de fluxo através da redução da energia cinética e velocidade subsequente do vento. A magnitude da energia aproveitada é uma função da redução na velocidade do ar sobre a turbina. Caso houvesse 100% de extração, consequentemente teria-se velocidade final zero e, assim, fluxo zero. Como esse cenário não pode ser alcançado, é amplamente aceito que o princípio que todos os ventos provindos da energia cinética não podem ser utilizados. Isso indica que a eficiência da turbina eólica não pode exceder 59,3%, sendo esse parâmetro amplamente conhecido como o coeficiente de potência, C_p , onde $\max C_p = 0,593$ referido como Limite de Betz. A teoria de Betz assume uma velocidade linear constante, ou seja, quaisquer forças rotacionais como a rotação

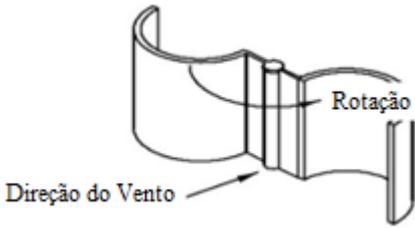
da esteira, a turbulência causada pelo arrasto ou queda do vórtice (perdas na ponta) reduzirá ainda mais a máxima eficiência. As perdas de eficiência são geralmente reduzidas por:

- Evitar taxas baixas de velocidade de ponta de pá que aumentam a rotação da esteira (*wake rotation*);
- Seleção de aerofólios com alta sustentação até a relação de resistência do material;
- Geometrias de pontas específicas;

2.4. Propulsão

Historicamente, o método de propulsão mais comumente utilizado foi o arrasto, esse afeta criticamente a máxima eficiência alcançável do motor. Portanto, a velocidade relativa do vento é reduzida à medida que a velocidade do rotor aumenta (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação dos dois mecanismos (Adaptado pela autora).

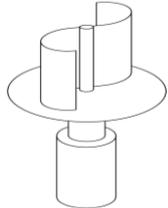
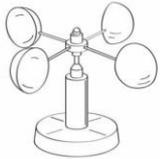
Propulsão	Arrasto	Sustentação
Diagrama		
Máxima Eficiência Teórica	16%*	50%**

* Gasch, 2002.

** Burton, 2011.

Os primeiros projetos, moinhos de vento persas, possuíam eixo vertical com velas dispostas em seu redor e utilizavam o arrasto como meio de propulsão – vide Tabela 2. Esses modelos são semelhantes à sua moderna contraparte, o rotor Savounius (N° 1). Também semelhante em princípio, tem-se o anemômetro de copo moderno (N° 2), muito utilizado para calcular a velocidade do ar devido à sua facilidade de calibração multidirecional. O moinho de vento americano (N° 3) se caracteriza por ser um rotor de alto torque com alto grau de solidez, sendo utilizado nos dias de hoje para bombeamento de água. O moinho de vento holandês (N° 4), também possui um *design* semelhante ao americano, utilizado para moer milho antigamente pode ser encontrado hoje como atração turística. Atualmente, os dois modelos mais comuns no mercado de turbina eólica são o modelo VAWT Darrieus (N° 5) e o HAWT (N° 6). Devido à eficiência e facilidade de controle, esse último tornou-se o *benchmark* da indústria de turbinas eólicas.

Tabela 2. Comparação dos dois mecanismos (Adaptado pela autora).

N°	Design	Orientação	Propulsão	Eficiência Máxima	Diagrama
1	Rotor Savounius	VAWT	Arrasto	16%	
2	Copo	VAWT	Arrasto	8%	

Continua na próxima página.

4	Moinho de Vento Holândes	HAWT	Sustentação	27%									
5	Rotor Darrieus	VAWT	Sustentação	40%									
6	Turbina Eólica Moderna	HAWT	Sustentação	<table border="1" data-bbox="901 761 1114 891"> <thead> <tr> <th>Pás</th> <th>Eficiência</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>43%</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>47%</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>50%</td> </tr> </tbody> </table>	Pás	Eficiência	1	43%	2	47%	3	50%	
Pás	Eficiência												
1	43%												
2	47%												
3	50%												

2.6. O cenário biomimético das turbinas eólicas

O Cerrado brasileiro, a savana de maior biodiversidade do planeta, ocupando cerca de 23,9% do território nacional (ICMBio, 2007), possui uma ampla coleção de propágulos anoméricos, frutos e sementes que são dispersos por anemocóricos com os mais diversos padrões aerodinâmicos, entre espécies com adaptações aladas, de penas e leves, capazes de alinhar-se com a entrada do escoamento de ar durante a sua descida e, posteriormente, girar ou rodar automaticamente durante a sua descida.

Como o maior achatamento das sementes anemocóricas, em geral, permite uma melhor estabilidade no ar, pode-se usar a biomimética, a aplicação do *design* de plantas e animais, que está sendo usada para resolver vários problemas de engenharia, física de materiais, medicina e outros conhecimentos, fornecendo modelos inovadores para produtos industriais.

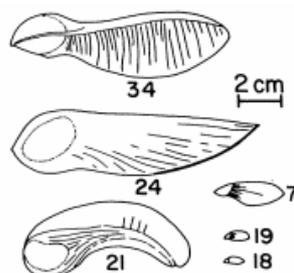
Assim, foi proposto que estas propriedades geométricas podem ser utilizadas no projeto de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal de pequeno porte (HAWT) biomimeticamente. Isso consistiria em três pás flexíveis que permitem o mecanismo de guinada e passivo durante sua operação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Modelagem da geometria de turbinas eólicas biomiméticas

Para essa pesquisa foram escolhidas sementes com morfologia autogirante, como mostrado na Fig. 2. Essas são caracterizadas por serem sementes aladas de um lado só, que fornece os meios para propulsão dinâmica: gira firmemente ao redor da semente no final do diásporo (Augspurger, 1986a).

Figura 2. Exemplos de sementes autogirantes (Augspurger, 1986b).



As coletas de frutos das quatro espécies foram realizadas na reserva do Clube Caça e Pesca Itororó de Uberlândia (CCPIU). Dentre a variedade de sementes encontradas foi escolhida a *Q. multiflora* a qual é popularmente conhecida como pau-terra, pau-terra-do-campo, pau-terra-da-folha-larga, ariavá, entre outros (Corrêa, 1978). É uma espécie arbórea nativa do cerrado brasileiro, que ocorre nas matas ciliares e no amplo cerrado, largamente distribuída desde a Amazônia Legal até São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso, sendo geralmente encontrada em áreas altas, secas e bem drenadas, e outros terrenos (Almeida et al., 1998; Lorenzi, 2000).

As sementes foram utilizadas para gerar os perfis geométricos da lâmina biomimética. Uma média dos pontos de contorno das sementes colhidas foi usada para gerar um perfil em diferentes ângulos de visão usando o *software SolidWorks®* e *Catia®*, fornecendo o bordo dianteiro, a curvatura e a borda posterior da lâmina proposta.

Figure 3. A árvore e a forma original da semente da espécie (Autoria Própria).

(a) Árvore *Q. multiflora*



(b) Vista lateral da semente

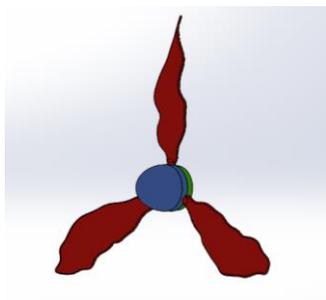


3.2. Prótipo final após modelagem

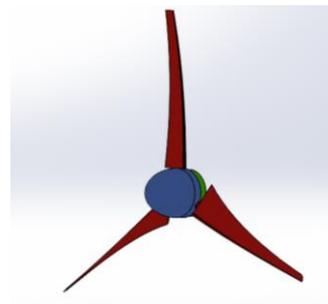
Como ilustrado na figura 4, foi utilizado uma referência (*baseline*) de um modelo de pá anexado a uma turbina eólica de três pás com um diâmetro de rotor 0,45 m. O design biomimético não teve quaisquer otimizações na análise durante a realização desse trabalho, por se tratar das primeiras análises nesse tipo de configuração. Foi convencionado uma espessura de 5 mm para a lâmina. Para fins de aplicação, a região da raiz da lâmina foi reforçada de modo a não quebrar devido às propriedades da folha. Infelizmente, por alguns erros procedimentais durante a execução da geometria os diâmetros dos rotores diferem um pouco, no entanto a diferença foi devidamente considerada nos cálculos.

Figure 4. Escala do modelo dos protótipos (Autoria Própria).

(a) Design biomimético



(b) Design convencional



3.3. Eficiência Prática

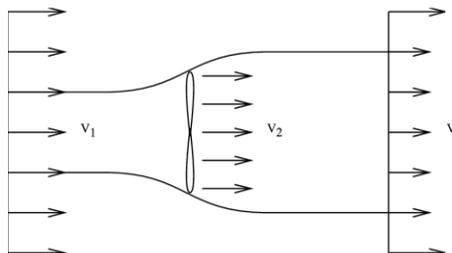
Apesar do que foi estipulado pelo projeto inicial do protótipo, sabe-se que os rotores sofrem com o acúmulo de pequenas perdas resultantes como de ponta e/ou perdas de eficiência do trem de acionamento (atrito de rolamentos etc), o que afeta sua eficiência na prática, impedindo alcançar a máxima eficiência teórica.

Para a determinação experimental da esteira aerodinâmica e consequentemente o coeficiente de potência, foi empregada uma modelagem semelhante à proposta por Betz, onde são consideradas três velocidades para a análise da potência disponível da turbina. Com o intuito de mensurar essas velocidades foi montado um experimento utilizando um anemometro de fio quente, medindo a velocidade a jusante e a montante das turbinas, variando concomitantemente do

centro até a parede superior do túnel de 5 cm em 5 cm verticalmente. Para a compração entre as esteiras geradas estabeleceu-se 14,6 Hz para o motor do ventilador do túnel de vento, ou seja, 6 m/s.

Com os dados medidos, determina-se o raio da esteira aerodinâmica das turbinas. Para isso, deve-se determinar a velocidade que o vento exerce dentro do mecanismo, v_2 , através da relação entre a velocidade do vento incidente nas pás medida a um metro antes da turbina, v_1 , e a velocidade a um metro após a turbina, v_3 , como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5. Perdas de velocidade do vento na turbina (Marques, 2004).



Então, assumindo que a velocidade do vento que atravessa as pás do rotor é:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (2)$$

Posteriormente, deve-se fazer um balanço de massa determinado através da relação:

$$\rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 = \rho \cdot A_3 \cdot v_3 \quad (3)$$

Na qual ρ é a densidade do ar, A_1 é a área que a esteira aerodinâmica possui antes da turbina, A_2 é a área do protótipo, A_3 é a área que a esteira aerodinâmica possui depois da turbina.

Como ρ é a mesma em todas as igualdades da Eq. (3), ela se anula. Dessa forma, como pode ser visualizado na Tabela 3, tem-se, alternando as angulações das pás:

Tabela 3. Dados de entrada.

Baseline	4°	6°	8°	Q. Multiflora	4°	6°	8°
v_1	6,0	6,0	6,0	v_1	6,0	6,0	6,0
v_2	5,65	5,45	11,1	v_2	5,25	5,45	5,5
v_3	5,3	4,9	5,1	v_3	4,5	4,9	5,0
A_1	0,586	0,565	0,529	A_1	0,429	0,445	0,449
A_2	0,622	0,622	0,622	A_2	0,490	0,490	0,490
A_3	0,663	0,692	0,622	A_3	0,572	0,545	0,539

Finalmente, é possível estimar o coeficiente de potência ($C_{p,prot}$) de cada protótipo, que caracteriza o nível de rendimento de uma turbina eólica, o qual é uma medida adimensional e pode ser definido pela razão:

$$C_{p,prot} = \frac{\frac{1}{2}(\rho \cdot A_1 \cdot v_1^3) - \frac{1}{2}(\rho \cdot A_3 \cdot v_3^3)}{P_d} \quad (4)$$

Para potência disponível pela turbina (P_d), considera-se fins de cálculo, a equação (1). A densidade do ar, ρ , no dia das medições, equivalia 1,3212997 (kg/m³). Assim, o $C_{p,prot}$ de cada protótipo é:

Tabela 4. Coeficiente de Potência dos protótipos.

Baseline	$C_{p,prot}$	Q. Multiflora	$C_{p,prot}$
4°	0,207444243	4°	0,383035714
6°	0,30239142	6°	0,302355395
8°	0,236357315	8°	0,279752457

Como pode-se observar na Tabela 4, os resultados obtidos com o projeto de pá bioinspirada na semente *Q. multiflora* apresentou resultados promissores, quando comparados com o projeto convencional aplicado atualmente pelo uso da Teoria de Elementos de Pá (BEM – *blade element theory*). É importante ressaltar que os coeficientes de potência foram iguais ou superiores, com a principal ressalva do alto rendimento para a condição de 4 graus. Ainda, deve-se enfatizar o fato de que durante a execução dessa pesquisa, não foi realizado nenhum procedimento de otimização e investigação detalhada da aerodinâmica da pá bioinspirada, ou seja, simplesmente foi utilizada a cópia da geometria projetada pela natureza. Nesse contexto, acredita-se que com um estudo detalhado da aerodinâmica da pá bioinspirada pode-se atingir resultados ainda melhores. Esse estudo será conduzido na próxima etapa desta pesquisa.

3. CONCLUSÕES

O mercado de Pequenos Aerogeradores no Brasil está em desenvolvimento gradual e ascendente, o que mostra um mercado propício a pesquisas nessa linha. Através da análise experimental da esteira aerodinâmica dos protótipos de turbinas eólicas de eixo horizontal (HWAT) em escala reduzida, confeccionado por prototipagem 3D, foi possível estimar um coeficiente de potência ($C_{p,prot}$) com base na teoria do disco atuador e eficiência de Betz.

Os resultados preliminares desse estudo, no qual se baseia no projeto bioinspirado, ou seja, definido pela natureza, com base na semente anemocórica *Q. multiflora*, apresentou resultados satisfatórios e promissores. Para baixas velocidades de vento (6 m/s) e considerando um ângulo de pá de 4°, chegou-se a um $C_{p,prot}$ de aproximadamente 38%, em comparação a 20% para um projeto de pá convencional.

Por se tratar de um estudo em andamento, ainda serão consideradas etapas futuras para o aprofundamento do conhecimento da aerodinâmica dessas sementes. Destaca-se, portanto, os seguintes trabalhos futuros:

- Análise das características aerodinâmicas da semente anemocórica através de ensaios em túnel de vento para a caracterização dos coeficientes de força (arrasto e sustentação);
- Análise numérica através de Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) das características do perfil;
- Determinação do torque máximo gerado pelo aerogerador, levando-se em consideração o projeto bioinspirado;
- Otimização do formato aerodinâmico da geometria da pá e ajustes de projeto mecânico para a redução de perdas;

Com base nessa continuidade da pesquisa, será possível corroborar os potenciais ganhos na eficiência do projeto de pá bioinspirada, e eventualmente abrir novas possibilidades para esse mercado de geração de energia eólica em crescente expansão.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental - CPAERO pela disponibilização da impressora 3D e a Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio técnico e científico.

5. REFERÊNCIAS

- Araújo, A., “Fundamentos da Geração Eólica – Processos de Conversão e Tecnologia”. UFPE, 2011.
- Almeida, S. P.; Proença, C. E. B.; Sano, S. M.; Ribeiro, J. F. “Cerrado: espécies vegetais úteis”. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998. 464 p.
- Augspurger, C. K., “Morphology and Dispersal Potential of Wind-Dispersed Diaspores of Neotropical Trees”. American Journal of Botany, Vol. 73, No. 3 (Mar., 1986), pp. 353-363
- Burton, T. “Wind Energy Handbook”; John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, 2011.
- Corrêa, M. P. “Dicionário de plantas úteis do Brasil e exóticas cultivadas”. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura/Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, 1978. v. 5.
- Gasch, R.; Twele, J. “Wind Power Plants”; Solarpraxis: Berlin, Germany, 2002.
- ICMbio, 2007. “Cerrado” <<http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomas-brasileiros/cerrado>>
- Marques, Jeferson. “Turbinas Eólicas: modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação”. 2004. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- Queiroz, Natália; Aguiar, Rafael Rattes Lima Rocha de; Araújo, Rodrigo Barbosa de. “Biônica e Biomimética no Contexto da Complexidade e Sustentabilidade em Projeto”. Design & Complexidade, [s.l.], p.127-144, 30 dez. 2016.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.