



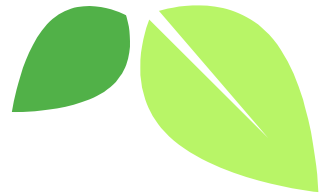
# PROTOTIPAGEM DE HÉLICE DE AEROGERADOR RESIDENCIAL UTILIZANDO COMPÓSITO POLIMÉRICO

Hudson B. dos Santos , Tharsia C. C. Costa.  
Instituto Federal da Bahia - IFBA



## INTRODUÇÃO:

- Energia e Sociedade;
- Produção de Energia Renovável através da Energia Eólica;
- Compósitos;





## JUSTIFICATIVA :

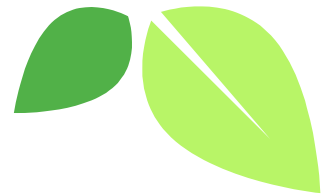
- Atualmente, o PET é um dos termoplásticos mais produzidos no mundo. O sucesso deste material deve-se à sua excelente relação entre as propriedades mecânicas, térmicas e o custo de produção (MACDONALD, 2002).
- No compósito, complementando a fibra de PET, a matriz polimérica, além de ser responsável pelo aspecto visual e de proteger os elementos de reforço contra ataques químicos e físicos, tem como principal função dispersar ou aglomerar o reforço.





## OBJETIVO GERAL

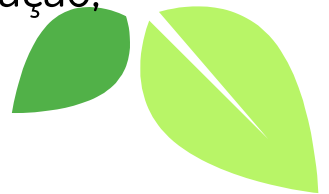
Obtenção de energia limpa, utilizando da geração de energia eólica, inovando nas pás, utilizadas no processo de energia eólica, produzidas utilizando materiais descartados no meio ambiente, e que apresentam grande potencial para sua reutilização ,sendo utilizado as embalagens de PET.





## OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

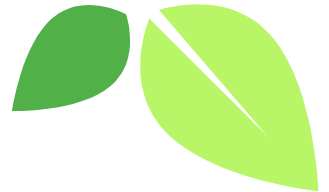
- Realizar uma análise, preliminar, de viabilidade da manufatura de pás para aerogeradores residenciais.
- Caracterização mecânica, utilizando-se de ensaios mecânicos, como ensaio de flexão, para medir a carga máxima suportada pelas pás e ensaio de flambagem;
- Avaliar a eficiência das pás quanto a sua eficiência a degradação, quando expostas as ações da natureza;





## **METODOLOGIA:**

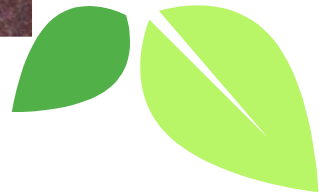
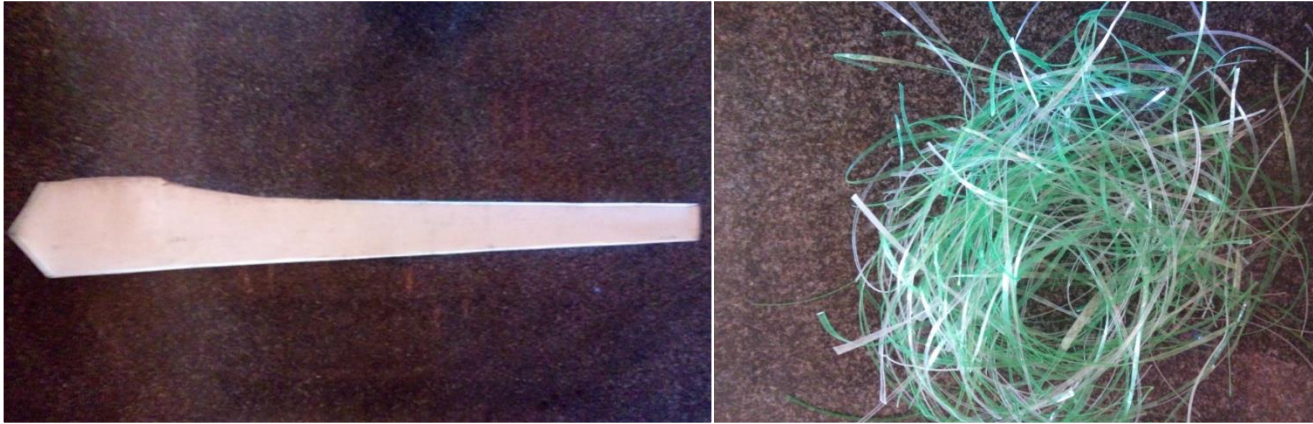
- Após a coleta, as garrafas PET passaram pelo processo de limpeza;  
Em seguida foram levadas para a estufa a 60° durante 24 horas, com a finalidade de se obter a secagem e o estiramento do filamento obtido a partir do PET, finalizando o processo picotando os filamentos em tamanhos que variaram de 3 cm a 6 cm.
- Molde com 1,20 m de comprimento, com largura variando entre 6 cm a 12 cm;





## METODOLOGIA:

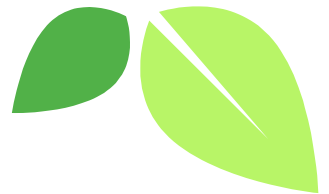
Figura 1: Molde de Zinco e Fibra de PET.





## **METODOLOGIA:**

- 78 gramas de garrafas PET recortadas em filamentos;
- 1150 ml de resina poliéster ortoftálica 5061;
- 1% de agente de cura;
- Processo de cura de 24 horas.

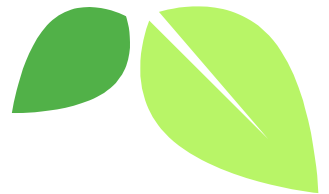


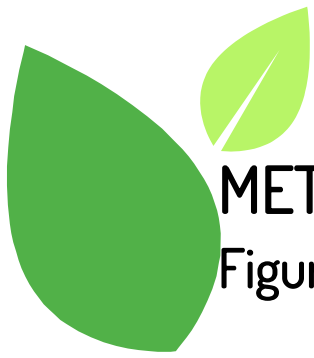




## METODOLOGIA:

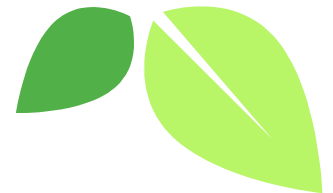
- Os ensaios de flexão foram realizados com base em recomendações da norma internacional para testes estruturais em pás em grande escala (IEC, 2001). A norma TS 61400-23 (IEC, 2001) fornece orientações gerais para realização dos testes.
- A norma TS 61400-23 (IEC, 2001) define que o ensaio estático deve ser realizado com um mínimo de 10s de carregamento.





## METODOLOGIA:

Figura 2: Esquema do dispositivo de simulação de cargas aerodinâmicas.

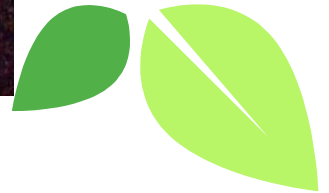




## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

A Figura 3 apresenta a pá produzida em fibra de PET usada em testes.

**Figura 3:** Pá de teste em compósito com fibra de PET.



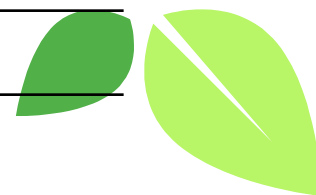


## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

A tabela 1 abaixo apresenta os dados técnicos da pá:

**Tabela 1:** Dados técnicos da pá.

Comprimento do perfil aerodinâmico (m)	0,05 a 0,15
Comprimento do perfil aerodinâmico (m)	1,19
Peso (g)	1.144,19
Área Total (m <sup>2</sup> )	0,12
Porcentagem de fibra (%)	6,80

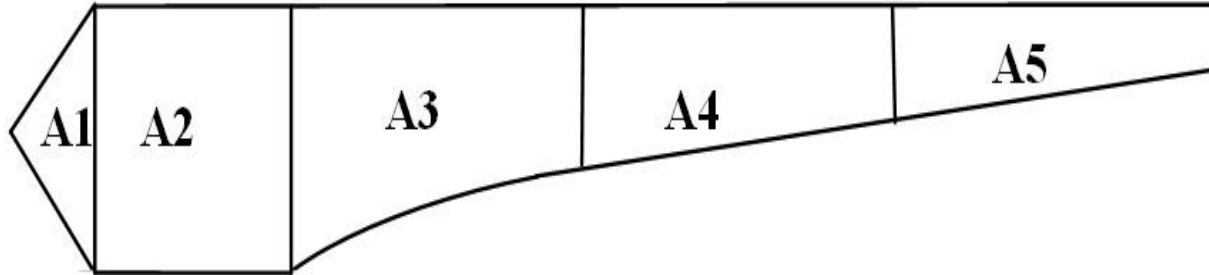




## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

A pá foi dividida em cinco áreas (A1 a A5), conforme ilustrado na Figura 4. Cada área usa um tipo de perfil aerodinâmico diferente.

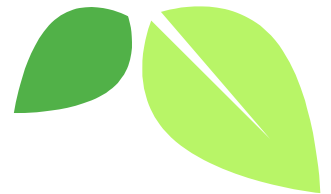
**Figura 4:** Áreas das seções A1 a A5 do perfil aerodinâmico da pá.





## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

A norma IEC 61400-1 estabelece que uma pá deva suportar rajadas máximas por um intervalo de tempo de 50 anos. Classificando em quatro classes para diferentes valores de velocidades médias anuais de vento, assim para cada classe, a velocidade de referência e as velocidades máximas para a rajada de 10 e de 50 anos são mostradas na tabela .

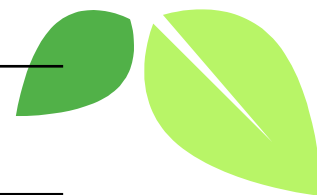




## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

**Tabela 2:** Parâmetros de vento das classes de aerogeradores (em m/s), adaptada (VOGT,2010).

<b>Classe de Vento</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
Velocidade de Referência	50,0	42,5	37,5	30
Velocidade média anual	10,0	8,5	7,5	6,0
Rajada máxima de 50 anos	70,0	59,5	52,5	42,0
Rajada máxima de 10 anos	52,5	44,6	39,4	31,5





## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

Considerando que a rajada seja frontal e o aerogerador esteja parado (freado), as forças aerodinâmicas são calculadas por:

$$F = 1/2 * \rho * c_a * A * v^2$$

Onde:

- F = Força (N);
- V = Velocidade
- $\rho$  = densidade de ar (kg/m<sup>3</sup>) (padrão da norma: 1,225 kg/m<sup>3</sup>);
- A = Área da pá (m<sup>2</sup>);
- O coeficiente de arraste (c<sub>a</sub>) para um plano quadrado ou redondo é de 1,1.







## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

**Tabela 3:** Forças de arraste geradas por rajadas máximas Classe I a IV de vento atuando na pá

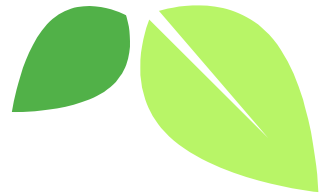
<b>Forças por Seções</b>	<b>Seção da Pá</b>	<b>Classe I</b> <i>Rajada de 70 m/s</i> (Forças em N)	<b>Classe II</b> <i>Rajada de 59,5 m/s</i> (Forças em N)	<b>Classe III</b> <i>Rajada de 52,5 m/s</i> (Forças em N)	<b>Classe IV</b> <i>Rajada de 42 m/s</i> (Forças em N)
<b>F<sub>A5</sub></b>	<b>5</b>	15,1	10,9	8,5	5,4
<b>F<sub>A4</sub></b>	<b>4</b>	87,2	62,9	49,0	31,4
<b>F<sub>A3</sub></b>	<b>3</b>	129,4	93,5	72,8	46,6
<b>F<sub>A2</sub></b>	<b>2</b>	89,8	64,9	50,5	32,3
<b>F<sub>A1</sub></b>	<b>1</b>	63,0	47,7	37,1	23,8
<b>Total</b>		387,5	279,9	217,9	139,5





## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

Para calcular as forças atuando na operação nominal, é necessário avaliar as velocidades e os ângulos de vento relativos no perfil aerodinâmico da pá. A pá enfrenta o vento de uma forma vetorial relativa ao perfil da pá, já que o vento se aproxima perpendicularmente ao plano de rotação da pá e forma, assim, junto com a velocidade rotativa de cada seção da pá, um vetor, ângulo de vento e velocidade resultante diferente para a pá em rotação.



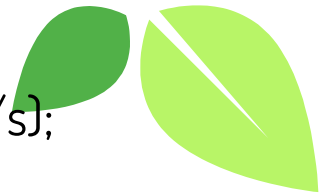


## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

O cálculo das velocidades rotativas das aéreas A5 a A1, na situação de geração nominal com uma rotação de 650 rpm (10,8 rotações/s) e vento de 12 m/s. Consideramos que a haste de encaixe entre a pá e o rotor tem 0,21 m.

$$V_{\text{radial}} = C * V_{\text{rotacional}}$$

- Onde:
- C = Comprimento de Circunferência;
- $V_{\text{rotacional}}$  = Velocidade rotacional (rotações/s);
- $V_{\text{radial}}$  = Velocidades radiais dos centros das áreas A5 – A1 (m/s);

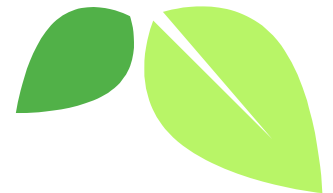




## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

Tabela 4: Velocidade radial obtidas a partir dos cálculos.

Área	r(m)	V <sub>radial</sub> (m/s)
A1	0,24	16,33
A2	0,36	24,41
A3	0,61	41,36
A4	0,93	63,07
A5	1,25	84,78

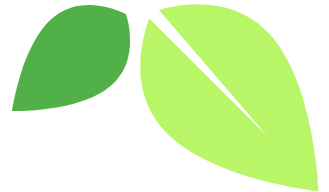




## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

- As condições ideais de extração de energia cinética do vento, a velocidade do vento diminui por 1/3 quando da aproximação do rotor.
- No cálculo de forças aerodinâmicas, considera-se a velocidade de 8m/s, o equivalente a 2/3 da velocidade de vento nominal de 12 m/s.
- As velocidades resultantes atuando nas seções da pá, usa-se a equação de Pitágoras, sendo que o ângulo entre o vento e o plano de rotação da pá é de 90°.

$$V_{\text{resultante}}^2 = V_{\text{radial}}^2 + V_{\text{vento}}^2$$

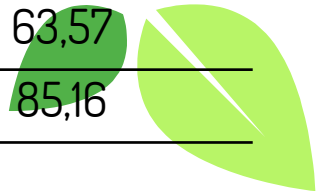




## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

**Tabela 5:** Velocidades resultantes nas seções da pá para a operação nominal.


Área	Velocidades radiais (m/s)	Velocidade de Vento no rotor (m/s)	Velocidades Resultantes (m/s)
A1	16,33	8	18,18
A2	24,41	8	25,69
A3	41,36	8	42,13
A4	63,07	8	63,57
A5	84,78	8	85,16





## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

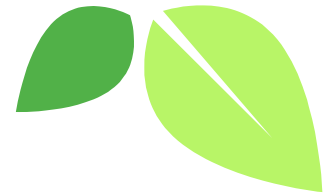
Neste caso, os ensaios de flexão foram realizados com 60s de carregamento, tempo suficiente para o teste estático e para medir a deflexão nas diversas seções da pá. Com a aplicação dos carregamentos durante o ensaio verificou-se que ocorreu a deflexão da pá com 7% de reforço em fibra de PET, após o ensaio foi verificado a medida do ângulo e a medida da deflexão para 150% do peso na pá, foi obtido então que o ângulo para o carregamento máximo foi de aproximadamente  $5,9^\circ$  e a deflexão 9,99 cm, a figura 5 demonstra a flexão ocorrida na pá durante o ensaio.





## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

**Figura 5:** Esquema do dispositivo de simulação de cargas aerodinâmicas com as forças em forma de pesos em sacos de terra.

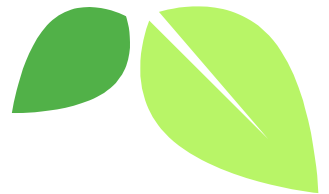






## RESULTADOS E DISCUSSÕES :

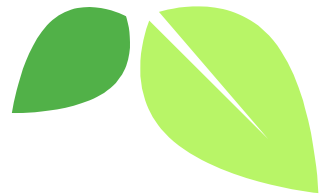
Para avaliar o custo/benefício da produção da pá foi levado em consideração dois fatores, o preço da resina utilizada e o custo da fibra. A resina poliéster custa em média R\$ 30,00 por litro, sendo utilizado na pá aproximadamente 1L, para a fibra foi utilizado o aproveitamento de garrafas PET descartadas no meio ambiente, sendo assim o custo de produção de cada pá é aproximadamente R\$ 30,00.






## CONCLUSÕES

- A pá confeccionada e testada para a pesquisa não apresentou nenhum sinal de falha estrutural e, após o carregamento, retornaram à posição anterior.
- Dentro das normas definidas para a classe;
- Boa relação Custo/Benefício;



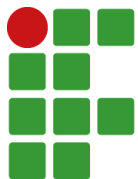


## REFERÊNCIAS

- CAMPOS, M. O. Estudo comparativo de pás para aerogeradores de grande porte fabricadas em materiais compósitos reforçadas com fibra de carbono ou fibra de vidro / Maxdavid Oliveira Campos – Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Natal, 2013.
  - GASCH, R.. *Windkraftanlagen*. Teubner, 2007
  - HENRICH, R. A. *Energia e Meio Ambiente/ Roger A. Hinrichs, Merlin Kleinbach, Lineu Belico dos Reis; tradução Lineu Belico dos Reis, Flavio Maron Vichi, Leonardo Freire de Mello.* – São Paulo: Cengage Learning, 2014.
  - LEVY NETO, Flaminio. *Compósitos Estruturais: Ciencia e tecnologia/ Flaminio Levy Neto, Luiz Claudio Pardini.* – 1. Ed. – São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
  - MacDonald, W. A. – *Polym. Int.* 51, p.923 (2002).
  - ROMÃO W. ; SPINACÉ, M. A. S., Marco-A. De Paoli . *PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem*, Instituto de Química, Unicamp, vol. 19, nº 2, p. 121-.
  - VOGT, H. H. *Análise estrutural de pás de gerador eólico de pequeno porte feitas de fibra vegetal brasileira / Hans Heinrich Vogt.* Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia.— Fortaleza, 2010.
- 



# AGRADECIMENTOS



**INSTITUTO FEDERAL  
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
Bahia



**Pró-Reitoria de Pesquisa,  
Pós-Graduação e Inovação**

**fapesb**



Fundação de Amparo  
à Pesquisa do Estado da Bahia

SECRETARIA DE  
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO**

**BAHIA**  
GOVERNO DO ESTADO

**UFERN**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

