

## **Fabricação de Uma Pequena Turbina Eólica de Eixo Vertical<sup>1</sup>**

Manoel Pedro de Oliveira e Silva Filho<sup>2</sup>, Lutero Carmo Lima<sup>3</sup>, Antonio Roberto Menescal Macêdo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Aceito para Publicação no 3º Trimestre de 2015

<sup>2</sup>Mestrando em Física Aplicada na Universidade Estadual do Ceará- UECE, pedrosilva1450@gmail.com

<sup>3</sup> Professor Dr. na Universidade Estadual do Ceará- UECE, luterodelima@gmail.com

<sup>4</sup>Professor na Universidade de Fortaleza- Unifor, bobmacedo@unifor.br

### **Resumo**

Este artigo apresenta o trabalho realizado no projeto e na produção de um teste de bancada de uma turbina eólica de pequeno porte com eixo vertical. A principal especificação foi conseguir uma turbina de fácil manuseio, e de fácil montagem e desmontagem. A utilização de energia eólica nos dias atuais vem se tornando cada vez mais imprescindível para as nações em desenvolvimento, em especial para o Brasil que possui regiões com ventos favoráveis durante quase todo o ano para esse tipo de empreendimento. A utilização de turbinas eólicas de grande porte já é uma realidade no Brasil, pois já existem vários parques eólicos e os operadores são submetidos a regras e leis já existentes. No entanto, a utilização de turbinas eólicas de pequeno porte ainda está em processo de implantação por parte do governo, que apenas recentemente regulamentou as leis necessárias para o desenvolvimento do setor. Além disso, a maioria das empresas que atuam no setor utiliza tecnologia importada, o que resulta em pouco espaço para desenvolvimento de tecnologia que já vem pronta de fora e apenas a fabricação de alguns componentes como as pás são fabricadas no Brasil. Assim o

consumidor final acaba não tendo muitas escolhas, principalmente com relação aos preços. A energia eólica é limpa, renovável e de grande aceitação. O aumento de seu uso reduzirá a emissão de gases de efeito estufa ajudando na busca das metas do Protocolo de Kyoto. Adicionalmente o projeto, a fabricação e a manutenção demandam mão de obra especializada observando-se um desenvolvimento socioeconômico regional onde estas tecnologias são instaladas. Este trabalho resultou na manufatura de um aerogerador capaz de atender as especificações do projeto, e comprova a necessidade de se investir mais em novas tecnologias, bem como prova ser possível o desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte de eixo vertical, principalmente pelo seu baixo custo e facilidade de fabricação.

**Palavras-chave:** Aerogerador - Energia eólica - Eixo vertical

### **Abstract**

This paper presents the work done in the design and production of a test bench of a small wind turbine with vertical axis. The main specification was to get a turbine easy to use, and easy to assemble and disassemble. The use of wind energy nowadays is becoming increasingly imperative for developing nations, especially to Brazil which has regions with favorable winds during most of the year for this kind of venture. The use of large wind turbines is already a reality in Brazil, because there are already several wind farms and operators are subject to existing laws and rules. However, the use of small wind turbines is still under implementation by the government, which only recently regulated the need for the development of sector laws. In addition, most companies operating in the sector uses imported technology, which results in little space for developing technology that comes ready from abroad and just the making of some components such as blades are manufactured in Brazil . So the end user ends up not having many choices, particularly with respect to prices. The increase of wind power use will reduce the emission of greenhouse gases, and help in finding the targets of the Kyoto Protocol. Additionally the design, manufacturing and maintenance require specialized labor observing a regional socioeconomic development where these technologies are installed. This work resulted in the manufacture of a wind turbine that can meet the design specifications, and demonstrates the need to invest more in new technologies, as well as proves possible to develop small vertical axis wind turbines, mainly due to its low cost and ease of manufacture.

**Key words:** Wind turbine - Wind Energy - Vertical Axis

## INTRODUÇÃO

Existe uma tremenda quantidade de energia livre no vento a qual está disponível para conversão de energia, O uso de máquinas para captar essa energia não é um conceito novo e pode ser datado desde os chineses 2000 anos antes de Cristo. Aquelas primeiras máquinas eram usadas para bombear água para irrigação. Foi somente no último século que a intensiva pesquisa e desenvolvimento levaram ao uso da energia do vento para geração de eletricidade (Golding, 1980; Manwell et al., 2002). [1] [2]

Uma das maneiras de se classificar uma turbina é com relação ao seu eixo. Podemos ter turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal. Estas permaneceram no foco de toda atividade de pesquisa relacionada à energia eólica pela última década, entretanto os trabalhos de pesquisa com eixo vertical continuou paralelamente numa escala relativamente menor (Bhutta, M. M. A., et al.). [3]

Buscar novas formas de energia em substituição aos combustíveis fósseis não é, ao contrário do que possa parecer, algo recente. No entanto, somente nos últimos 20 anos o mundo se tornou suficientemente capaz de entender a necessidade de agir em função do que o uso excessivo e globalizado desses combustíveis fósseis podem causar à este planeta e conseqüentemente à todas as formas de vida sobre ele. Aproximadamente 90% do abastecimento de energia no mundo é proveniente de combustíveis fósseis (Carvalho, P., 2003). [4]

A busca por energias mais limpas e renováveis com o intuito de reduzir os impactos nocivos ao meio ambiente causados pelas formas ditas sujas de energia, tem como resultado um incentivo cada vez maior ao desenvolvimento de novas tecnologias. Neste contexto, a engenharia tornou-se um ramo do conhecimento humano dos mais importantes neste início de século.

O presente texto consiste em informar sobre o trabalho realizado, no qual se utiliza os conhecimentos de física e engenharia para projetar e construir um teste de bancada de uma turbina eólica de eixo vertical. Além disso, ele deverá satisfazer outros requisitos: ser de fácil fabricação e montagem. Assim, com o provável desenvolvimento deste protótipo, ele poderá, no futuro, estar disponível para ser usado em diversas áreas, deste onde a energia elétrica das

distribuidoras não consegue chegar até o uso em residências, condomínios, barcos, no agronegócio, por exploradores etc.

A escolha por uma turbina de eixo vertical se deve ao fato desta ser em geral, e levando-se em conta gastos com manutenção, mais barata que os aerogeradores de eixo horizontal quando comparados na mesma categoria de capacidade de geração.

A solução do problema pode ser dividida em três partes:

- Da aplicação, para a geração de energia, de uma turbina de eixo vertical de pequeno porte;
- Da aerodinâmica, pelo novo design e disposição das pás da turbina eólica;
- Do manuseio do equipamento que pode ser facilmente fabricado, carregado e instalado.

## **Objetivos e justificativa**

O objetivo geral deste artigo é projetar e produzir um teste de bancada de uma turbina eólica de pequeno porte com eixo vertical, testando seu desempenho com aparelhos de medição.

Os objetivos específicos são: projetar e construir uma turbina eólica capaz de atender a demanda por um produto de fácil manuseio e de uso em locais onde a rede elétrica não está disponível, ou onde se deseja diminuir os gastos com eletricidade e fazer um teste de bancada desta turbina eólica, documentando os resultados.

O país é conhecido pelo seu grande potencial eólico, principalmente nas regiões praianas do nordeste e no Rio Grande do Sul. Portanto, o desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte com capacidade de fornecer energia elétrica para demandas pequenas como casas, condomínios e conjuntos habitacionais, ainda está começando a se desenvolver e nessa área alguns empreendedores nacionais estão tomando a dianteira em busca dessa tecnologia. Nesse contexto justifica-se o presente trabalho.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia empregada para o desenvolvimento desse trabalho é definida em:

- Conceituação e detalhamento do projeto;
- Levantamento dos materiais a serem empregados;
- Execução da fabricação do modelo para teste;
- Determinação dos testes a serem realizados;
- Realização dos testes.

### **Conceituação e detalhamento do projeto**

O projeto deverá ser desenvolvido de maneira a satisfazer os seguintes requisitos e restrições:

- Deve ser fácil de ser montado e desmontado, ou seja, qualquer pessoa que saiba ler o manual deverá ser capaz de montá-lo;
- Todas as peças devem ser leves, pesando não mais que 10 kg, dessa forma qualquer pessoa adulta fisicamente saudável deverá ser capaz de levantá-las e carregá-las sem muito esforço;
- Deve ser aerodinamicamente semelhante a uma turbina eólica do tipo Savonius, dessa forma, os custos deverão ser menores;
- Deve ter um desenho inovador das pás;
- Deve ter um gerador do tipo *coreless* (sem núcleo);
- Deve usar ímãs permanentes de neodímio;

O ímã escolhido para a construção do protótipo tem as seguintes características:

- Nome: Ímã de neodímio N50
- Br Remanência - G: 13.800/14.500
- Hc Força Coercitiva - Oe: > 10.500
- Hci Força Coercitiva Intrínseca: > 12.000
- BH max /Produto de Energia Máx.: 47,0/51,0
- Densidade - g/cm: 7,5
- Temp. de Curie - °C: 130°C
- Temp. Máx. de Trabalho - °C: 80°C
- Coeficiente de Temp. - Br %/°C: -0,12



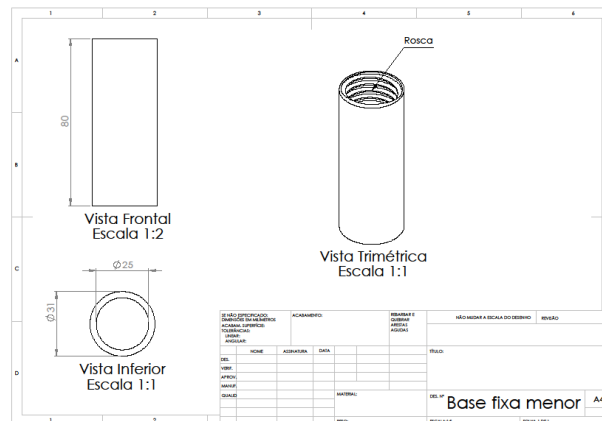


Figura 4 – Base fixa menor

A parte inferior das pás é fixada à base móvel, como na Fig. 5, as quais também servirão de suporte para os ímãs. Os ímãs de neodímio são fixados na parte de baixo da base móvel. Serão 12 ímãs distribuídos uniformemente de tal forma que a distância entre eles seja igual ao tamanho deles.

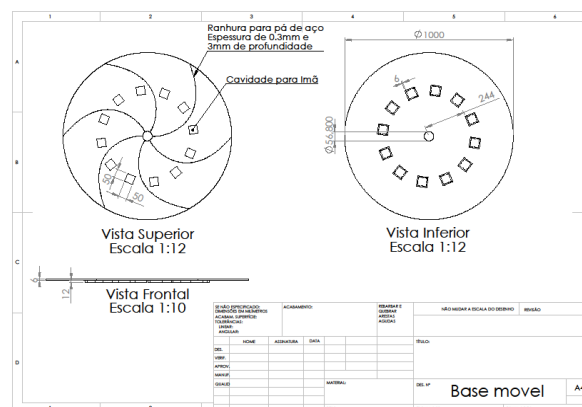


Figura 5 – Base móvel em forma de disco.

O disco da base móvel, que é visto na Fig. 5, é feito de ACM - *Aluminium Composite Material*, com raio de 50 cm.

Haverá outro disco de mesmo tamanho, feito de ACM, e que ficará fixo, servindo de base para as bobinas.

Nota-se na Fig. 6, o desenho das chapas (4 no total) em forma de barra chata de aço que serão soldadas à base fixa menor, e que servirão de pés para o aero gerador.

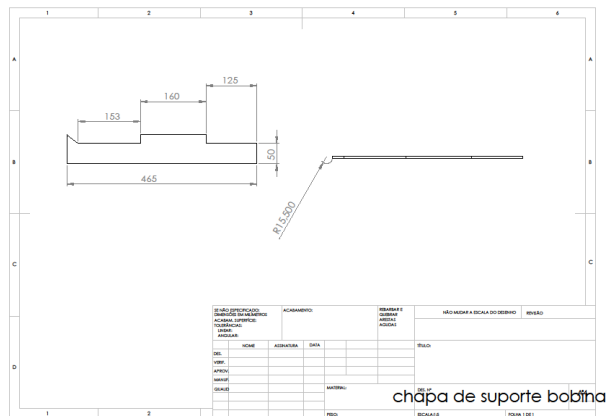


Figura 6 – Disco de suporte da bobina (base fixa menor) e barra chata de 5 mm de espessura para fabricação dos pés do aero gerador

Na Fig. 7, tem-se o aero gerador já montado com a posição dos ímãs, e uma vista frontal.

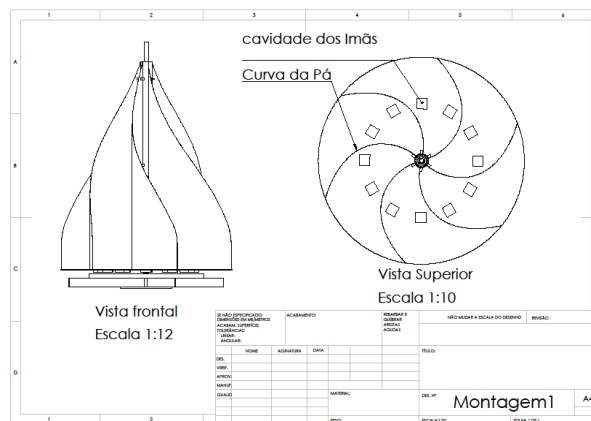


Figura 7 – Aerogerador com vista frontal e superior

A base menor tem diâmetro de 500 mm. A Fig. 8 mostra essa peça em detalhe.

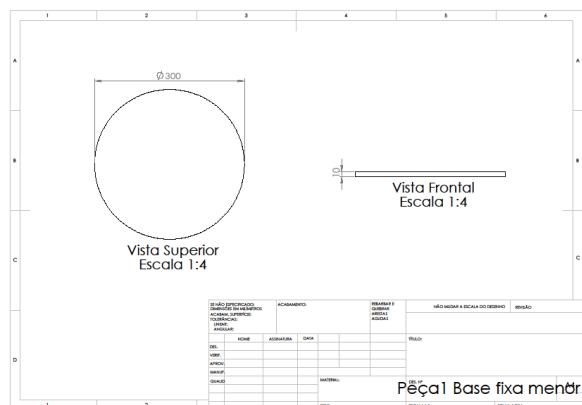


Figura 8 – Base fixa menor

## **Lista dos materiais**

Os materiais usados no modelo foram: 12 kg de fio 18 AWG, Folha de ACM de 2m x 1m, Tubo de alumínio de 50mm de diâmetro (interno) x 1m, com parede de 3mm, Tubo de aço de 1 polegada de diâmetro (externo) x 1,5m com parede de 3mm, Tarugo de alumínio de 3 polegadas de diâmetro x 15 cm, Tarugo de alumínio de 3 polegadas de diâmetro x 10cm, Tarugo de alumínio de 4 polegadas de diâmetro x 20cm, 2 rolamentos SKF 6302, Folha de alumínio de 0,7mm de espessura e de 5,5m x 1m, Fita dupla face 3M (rolo), Perfil em alumínio tipo cantoneira (barra de 6m), Perfil em alumínio tipo calha (barra de 6m), Anemômetro digital com haste, 40 parafuso em aço inox de 6mm x 15mm, com porcas e arruelas.

## **Execução da fabricação do modelo**

O modelo foi fabricado em oficina mecânica, com a ajuda de técnicos, e seguiu estritamente os desenhos do projeto detalhado. Todo o processo de fabricação durou em torno de 2 semanas.

## **Determinação dos testes realizados**

Foram realizados os seguintes testes:

- Medição da tensão (bobinas em série);
- Medição da corrente (bobinas em série);
- Medição da velocidade do vento.

## **Realização dos testes**

Como não há disponibilidade de um túnel de vento, foi utilizado um ventilador turbo de três velocidades, sendo a velocidade (medida à uma distância de 1,5m com um anemômetro de pás)

Foi utilizado um multímetro da marca Fluke, capaz de medir mA (miliampere) e mV (milivolt) em corrente alternada (AC), para medir a tensão e a corrente.

Para medir a velocidade do vento foi utilizado um anemômetro de pás.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletados os seguintes resultados:

O vento dos testes foi gerado a partir de um ventilador tipo turbo e distante 2m do eixo do protótipo.

Para o cálculo da velocidade média do vento na entrada da turbina, mediu-se a velocidade do vento nas posições a, b, c, d, e, f, g, h, i, como demonstrado na Fig. 9.

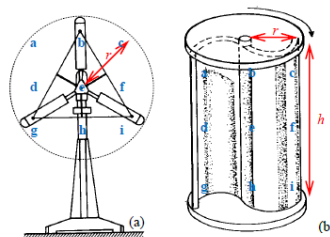


Figura 9 - Medidas para calcular a energia disponível em turbinas: a) de eixo horizontal e b) de eixo vertical.

As medições foram colocadas na seguinte tabela:

| Valores de Velocidade do Vento nas posições abcdefghi em km/h |             |             |             |              |              |             |             |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Medição   | a           | b           | c           | d            | E            | f           | g           | h           | i           |
| 1   | 5.0         | 7.9         | 5.4         | 6.8          | 13.4         | 3.9         | 4.3         | 3.2         | 2.9         |
| 2   | 2.3         | 7.5         | 4.3         | 6.8          | 14.1         | 3.9         | 4.3         | 3.2         | 2.8         |
| 3   | 3.2         | 6.8         | 3.9         | 9.7          | 12.7         | 4.2         | 4.3         | 4.6         | 1.4         |
| 4   | 6.0         | 8.6         | 4.6         | 13.0         | 15.2         | 4.1         | 3.9         | 2.5         | 3.2         |
| 5   | 5.7         | 6.8         | 4.6         | 14.1         | 15.1         | 6.1         | 2.8         | 6.1         | 3.2         |
| 6   | 5.7         | 5.4         | 3.6         | 14.2         | 19.5         | 4.4         | 2.8         | 3.1         | 3.3         |
| 7   | 4.3         | 7.9         | 2.8         | 13.4         | 13.9         | 3.3         | 1.4         | 2.8         | 2.3         |
| 8   | 6.4         | 7.2         | 2.8         | 12.3         | 15.0         | 4.6         | 2.4         | 2.8         | 1.6         |
| 9   | 5.4         | 7.2         | 1.4         | 10.8         | 14.3         | 3.9         | 2.9         | 2.1         | 3.1         |
| 10  | 5.6         | 4.6         | 3.6         | 11.5         | 12.8         | 3.8         | 4.0         | 3.6         | 2.1         |
| Média=  | <b>5,00</b> | <b>6,99</b> | <b>3,70</b> | <b>11,26</b> | <b>14,60</b> | <b>4,22</b> | <b>3,31</b> | <b>3,26</b> | <b>2,59</b> |
| Média das médias = 6,50 km/h                                  |             |             |             |              |              |             |             |             |             |

Transformando-se para m/s teremos a velocidade média  $v = 1,8$  m/s. Isso, embora seja um valor baixo, permitiu a realização dos testes.

### Pás em Forma de Cilindro Ôco

A Tab. 1 mostra os resultados das medições de tensão, e a Tab. 2 as medições de corrente.

As tensões na Tab. 1 foram feitas com as pás em forma de cilindro ôco e foram medidas em Volts.

As correntes elétricas foram medida em mili Amperes.

Tabela 1

Tabela 2

|                       |
|-----------------------|
| Tensão - pás em forma |
|-----------------------|

| de cilindro ôco medidas em V [Volts]: a cada 15s |              |
|--|--------------|
| Medição  | Valor        |
| 1  | 2,753        |
| 2  | 3,279        |
| 3  | 4,295        |
| 4  | 3,038        |
| 5  | 4,641        |
| 6  | 5,992        |
| 7  | 5,792        |
| 8  | 2,880        |
| 9  | 2,024        |
| 10   | 4,164        |
| 11   | 4,185        |
| 12   | 2,084        |
| 13   | 4,130        |
| 14   | 2,059        |
| 15   | 7,936        |
| 16   | 2,821        |
| 17   | 3,313        |
| 18   | 3,050        |
| 19   | 8,111        |
| 20   | 8,200        |
| Média =  | <b>4,237</b> |

| Corrente elétrica - Resistor (100 Ohms para cilindro) medida em mili Amperes: a cada 15s |               |
|--|---------------|
| Medição  | Valores       |
| 1  | 30            |
| 2  | 28            |
| 3  | 33            |
| 4  | 32            |
| 5  | 34            |
| 6  | 33            |
| 7  | 35            |
| 8  | 35            |
| 9  | 32            |
| 10   | 34            |
| 11   | 31            |
| 12   | 30            |
| 13   | 33            |
| 14   | 35            |
| 15   | 37            |
| 16   | 33            |
| 17   | 33            |
| 18   | 34            |
| 19   | 36            |
| 20   | 31            |
| Média =  | <b>32,950</b> |

### Pás em Form de S

Em seguida será mostrado as tabelas de tensão e corrente referentes às pás em forma de S.

A Tab. 3 mostra os resultados das medições de tensão, e a Tab. 4 as medições de corrente.

Tabela 3

| Tensão com pás em forma de S<br>Medida em V [Volts]: a cada<br>15 s |              |
|---|--------------|
| Medição   | Valores      |
| 1   | 2,367        |
| 2   | 2,786        |
| 3   | 2,248        |
| 4   | 2,711        |
| 5   | 2,653        |
| 6   | 3,852        |
| 7   | 3,892        |
| 8   | 2,795        |
| 9   | 3,711        |
| 10  | 2,941        |
| 11  | 4,440        |
| 12  | 3,812        |
| 13  | 3,041        |
| 14  | 4,948        |
| 15  | 3,026        |
| 16  | 3,810        |
| 17  | 3,010        |
| 18  | 3,611        |
| 19  | 4,313        |
| 20  | 3,956        |
| Média =   | <b>3,396</b> |

Tabela 4

| Corrente com resistência de 100<br>Ohms para Pá em forma de S<br>Medida em mili Amperes [A]: a<br>cada 15s |               |
|--|---------------|
| Medição  | Valores       |
| 1  | 22            |
| 2  | 21            |
| 3  | 22            |
| 4  | 23            |
| 5  | 28            |
| 6  | 29            |
| 7  | 30            |
| 8  | 31            |
| 9  | 33            |
| 10   | 34            |
| 11   | 38            |
| 12   | 40            |
| 13   | 38            |
| 14   | 36            |
| Média =  | <b>30,357</b> |

## Fabricação do Protótipo

Os resultados seguintes se basearam nos valores do protótipo e do local onde os testes foram feitos:

Lembrando-se de:

$$E_c = (16/27) \cdot \rho \cdot r \cdot h \cdot v^3 \cdot t \quad (7)$$

E utilizando a Eq. 7 que é própria para eixos verticais:

$$E_c = (16/27) \cdot \rho \cdot r \cdot h \cdot v^3 \cdot t \quad (\rho \text{ medido à } T = 30^\circ\text{C})$$

$$E_c = (16/27) \cdot 1,165 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot (6,5 \cdot 1000/3600)^3 \cdot t$$

$$E_c = 2,0 \cdot t \quad \text{onde } t \text{ é tempo em [s].}$$

Para calcular a potência do vento, temos:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (8)$$

$$P = 0,5 \cdot 1,165 \cdot (1,0 \cdot 1,0) \cdot (1,8)^3$$

$$P = 3,397 \text{ W}$$

Para calcular a força de arraste temos:

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_a \cdot v^2$$

$$F = 0,5 \cdot 1,165 \cdot (1,0 \cdot 0,5) \cdot 2,3 \cdot (1,8)^2$$

$$F = 2,17 \text{ N}$$

A fabricação levou em conta a rapidez na montagem, que durou 30 minutos. A seguir o protótipo foi desmontado e montado novamente. Desta vez em apenas 20 minutos. As bobinas foram ligadas em paralelo.

A Fig. 10 mostra uma foto do protótipo.



Figura 10 - Foto do protótipo

## CONCLUSÕES

Podemos concluir que é possível fabricar um aere gerador de pequeno porte de eixo vertical de fácil montagem e desmontagem.

O desenvolvimento do protótipo leva a crer que ele está dentro do que se podia esperar de uma turbina Savonius.

Foi possível testar dois modelos de pá.

A pá que deu os melhores resultados, baseando-se apenas na maior média de tensão conseguida, foi a pá com formato de cilindro reto oco.

A quantidade de eletricidade gerada pode ser retificada para corrente contínua.

O gerador pode acender lâmpadas de led quando ligado em série.

## REFERÊNCIAS

- [1] Golding, E. W. 1980. The generation of electricity by wind power - London: E. & F. N. Spon Ltd.
- [2] Manwell J. F., MCGowan J. G., Rogers A. L., 2002. Wind energy explained theory, design and application - New York: Wiley.
- [3] Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, S. R., Hussain, Z., 2012. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 16 (2012) 1926-1939.

- [4] Carvalho, P., 2003. Geração eólica - Fortaleza; Imprensa Universitária.
- [5] Custódio, R. S., 2009. Energia eólica para produção de energia elétrica - Rio de Janeiro: Eletrobrás.
- [6] Al-Badhadly., I., 2009. Building a wind turbine for rural home – Energy for Sustainable Development; 13 (2009) 159-165.