



**IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica
22 a 25 de Agosto 2006, Recife-PE**

Ensaio Laboratorial para Testes em Bancada de Geradores Eólicos de Pequeno Porte

Marcelo R. Petry

Gustavo Konzen

Jorge Antonio Villar Alé (orientador)

02203701@puhrs.br

gustavo.konzen@puhrs.br

villar@puhrs.br

NUTEMA – PUCRS, Av. Ipiranga, 6681 CEP 90619-900, Prédio 30, bloco F, sala 272
Porto Alegre - RS - Brasil

***Resumo.** O trabalho faz parte de um projeto FINEP no qual são desenvolvidos e testados diferentes modelos de turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV). Estas máquinas apresentam características diferenciadas das turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH). São máquinas de maior solidez, rotação mais baixa, contudo apropriadas para uso urbano com ventos mais turbulentos. Comercialmente no país, não existem disponíveis geradores elétricos específicos para ser acoplados as TEEV em desenvolvimento, portanto, é necessário avaliar a possibilidade de utilizar alguns dos geradores de pequeno porte disponíveis para TEEH. O presente resumo descreve o método utilizado para levantar os parâmetros característicos, eficiência e faixa de trabalho de geradores de pequeno porte e avaliar se os mesmos podem ser acoplados as turbinas de eixo vertical em desenvolvimento. Como parte da aplicação do método de ensaio, construiu-se uma bancada contendo os equipamentos necessários a realização das medidas. Na bancada, um motor síncrono transmite ao gerador uma rotação controlada por um inversor de frequência. A variação da rotação em intervalos constantes permite a simulação das condições trabalho, ao mesmo tempo em que medidas como tensão, corrente e torque são feitas. O ensaio completo inclui três testes, diferenciando-se por apresentarem diferentes configurações nas conexões de saídas do gerador, sendo estes: Teste de Curto-Circuito, Circuito Aberto e Teste de Carga Resistiva. Com os resultados obtidos são estudadas as características das TEEV desenvolvidas e as alternativas e modificações que devem ser realizadas para utilizar os geradores elétricos avaliados.*

***Palavras-chave:** Energia eólica, gerador de ímãs permanentes , bancada de testes .*

1. INTRODUÇÃO

O NUTEMA vem trabalhando em diferentes projetos entre eles alguns relacionados com geradores de pequeno porte e projetos de novos conceitos de máquinas de pequeno porte de eixo vertical. Nas etapas de projeto se faz necessário avaliar a performance aerodinâmica das máquinas, as quais podem ser testadas em laboratório utilizando-se um túnel de vento, e a partir destes testes, levantando parâmetros importantes como, por exemplo, o coeficiente de torque e o coeficiente de potência das máquinas. Em relação aos geradores elétricos que são acoplados a estas máquinas se faz necessário conhecer suas características elétricas e seu desempenho para diferentes faixas de rotações. Com esta finalidade foi implementado no LAER, Laboratório de Energias Renováveis do NUTEMA, uma bancada de testes para geradores de pequeno porte. Com tal metodologia já foram testados vários geradores permitindo confrontar os resultados práticos com os resultados teóricos já esperados para este tipo de máquinas, facilitando o aperfeiçoamento dos geradores assim como conhecendo como será seu comportamento quando acoplados as turbinas em desenvolvimento. No presente trabalho será descritos os procedimentos para realização os testes de geradores assim como resultados obtidos com a metodologia apresentada.

2. BANCADA DE TESTES

Os testes de laboratório aqui apresentados (Fig. 1) permitem obter os parâmetros característicos de geradores de pequeno porte (Fig. 2). Conforme Muljadi et al (1999), o procedimento é composto de três testes, realizados em uma mesma bancada, onde se varia o tipo de ligação das pontes de saída do gerador. Os testes são estes: terminais do gerador em circuito aberto, terminais curto-circuitados e ligados a um banco de carga resistiva.

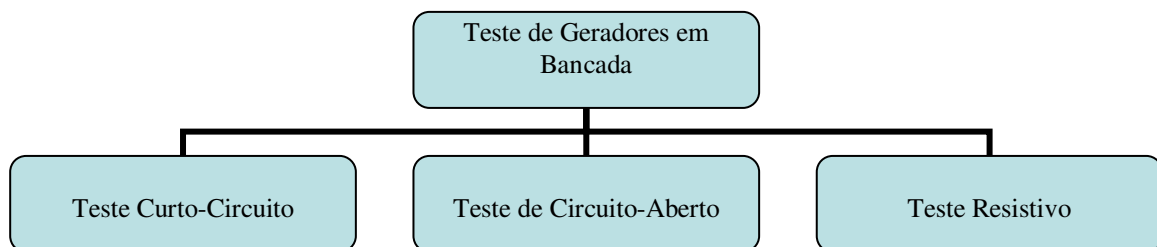


Figura 1. Tipos de testes em bancada

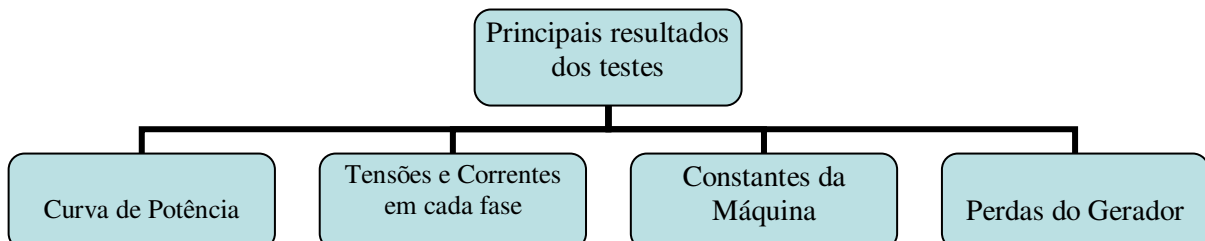


Figura 2. Principais resultados dos ensaios laboratoriais

2.1 EQUIPAMENTOS DA BANCADA

A Fig. (3) mostra um desenho esquemático da bancada com os equipamentos de instrumentação e medição. A bancada é composta por um motor de indução (3) possuindo sua rotação controlada por um inversor de frequência (4). Um eixo permite o acoplamento adequado entre o motor e o gerador que será testado. Ao eixo, é conectado um torquímetro (2) para medir o torque produzido pelo gerador. Para a medição de corrente nos terminais do gerador (1) são utilizadas três ponteiras (8), uma para cada fase. Uma placa de acionamento (5) permite controlar o inversor através do software MATLAB 7.0. O Data Logger (6) permite armazenar todos os dados fornecidos tais como tensão, corrente, rotação e torque, os quais são transferidos para o computador (7) através do programa de aquisição de dados AGILENT.

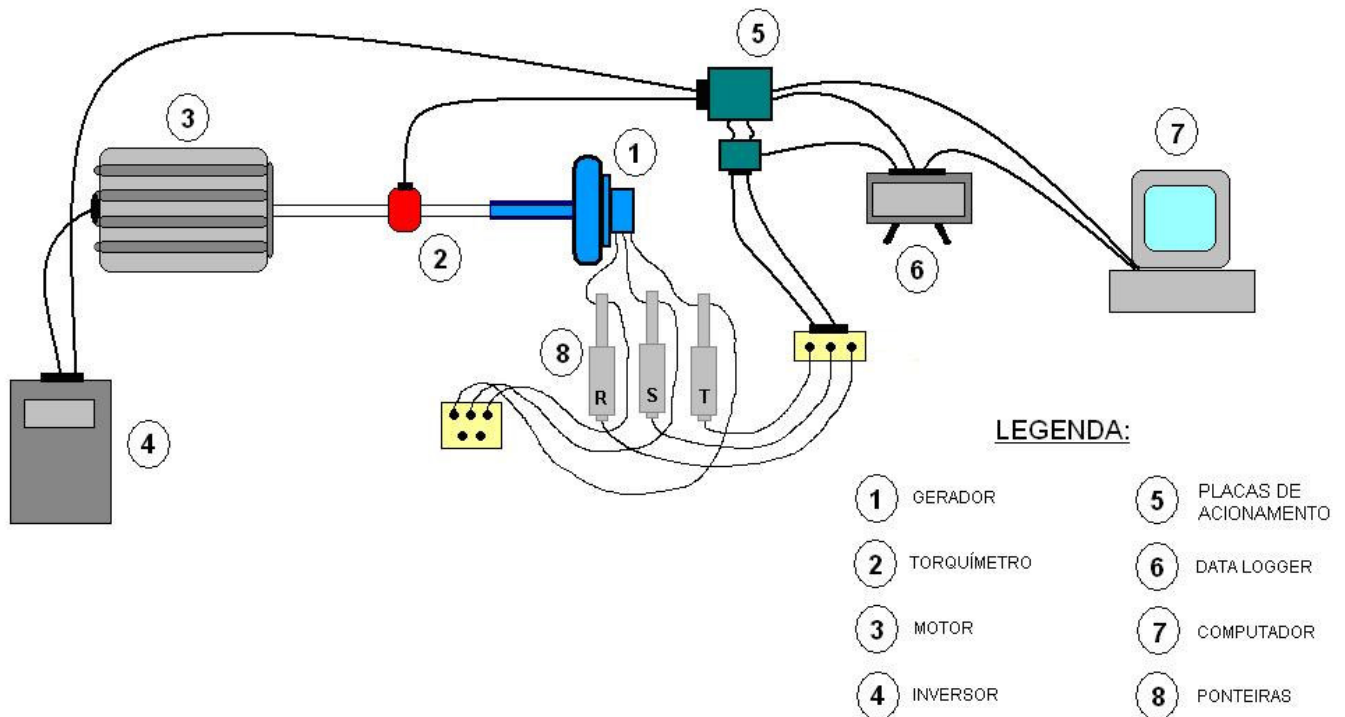


Figura 3. Desenho esquemático da bancada de testes

3. PROCEDIMENTO DE MEDIDAS

Medidas em Circuito Aberto: monta-se o gerador na bancada de testes ligando as ponteiras diretamente nos terminais de saída. Com esta configuração obtém-se, para cada RPM, a respectiva tensão de linha e perdas mecânicas. Medidas em Curto-Circuito: estando o gerador disposto na bancada com seus terminais de saída conectados entre si, é medida a corrente e o torque para cada faixa de rotação. Medidas com Carga Resistiva: neste teste conecta-se os terminais do gerador a um banco de resistências realizando medições de corrente, tensão de linha e torque. (Muljadi,1999; Sánchez, 2003)

4. RESULTADOS

Para os resultados parciais de cada teste, tomaremos como exemplo o desempenho do gerador de fabricação nacional E250W da empresa Enersud, de potência 250Watts, rotação nominal de 350 rpm e tensão nominal de 12V.

4.1 RESULTADOS EM CIRCUITO ABERTO

Tensões trifásicas são geralmente produzidas por um gerador CA de três fases, constituído de três bobinas separadas por 120° . A partir do giro do rotor, a tensão é induzida nos enrolamentos dando início ao processo de geração de energia. Essa tensão, que é medida entre um terminal de saída do enrolamento e a linha neutro, é denominada tensão de linha. Essa tensão é obtida utilizando-se a metodologia descrita no item [3] para medidas a circuito aberto, resultando no gráfico abaixo, Fig. (5).

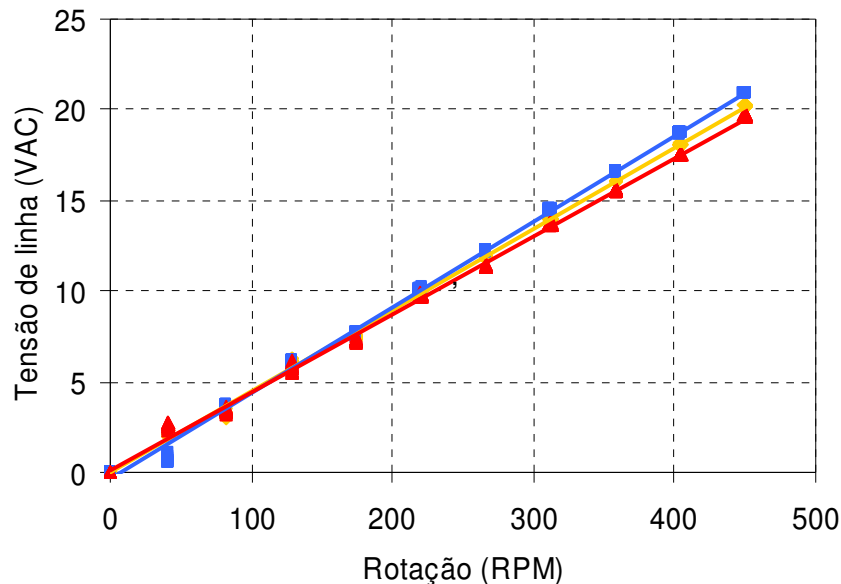


Figura 5. Tensão em circuito aberto *versus* rotação

4.2 RESULTADOS EM CURTO-CIRCUITO

Este teste faz-se necessário dado à importância de um parâmetro conhecido como Reatância. Brevemente, explica-se a reatância como a oposição à passagem de corrente alternada por indutância ou capacitância em um circuito elétrico. A Equação (1) demonstra a reatância (X_s) como relação entre a tensão de fase a circuito aberto (E_{CA}), a corrente de curto-circuito (I_{CC}) e a resistência de armadura do gerador (R_a):

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_{CA}}{I_{CC}}\right)^2 - R_a^2} \quad (1)$$

Os resultados para a corrente com os terminais do gerador em curto-circuito obtidos do modelo testado podem ser encontrados na Fig. (6).

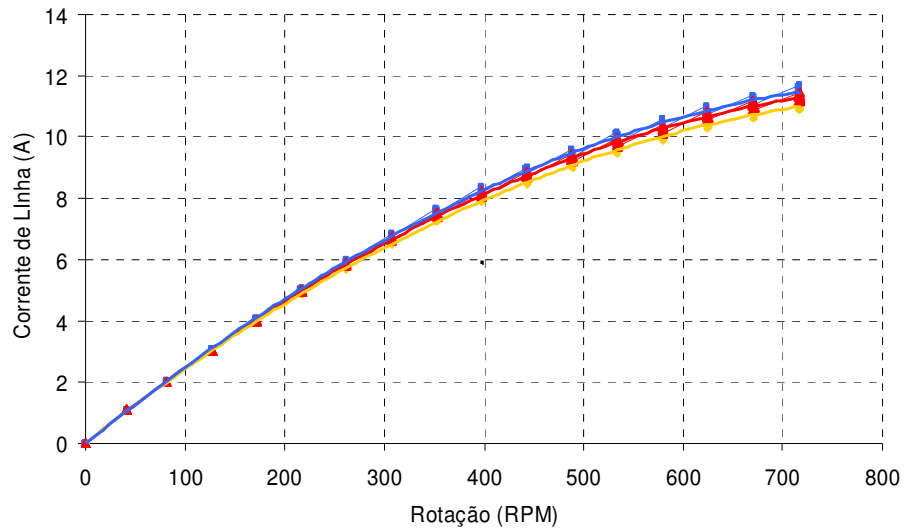


Figura 6. Corrente de linha *versus* rotação - resultado do teste em curto-circuito

4.3 RESULTADOS DO TESTE RESISTIVO

Os resultados de tensão de linha, Fig. (7), e corrente, Fig. (8), tem como principal objetivo a determinação das perdas elétricas (P_{ele}) por efeito Joule, Eq. (2), e a caracterização da potência do gerador.

$$P_{ele} = I_a^2 R_a \quad (2)$$

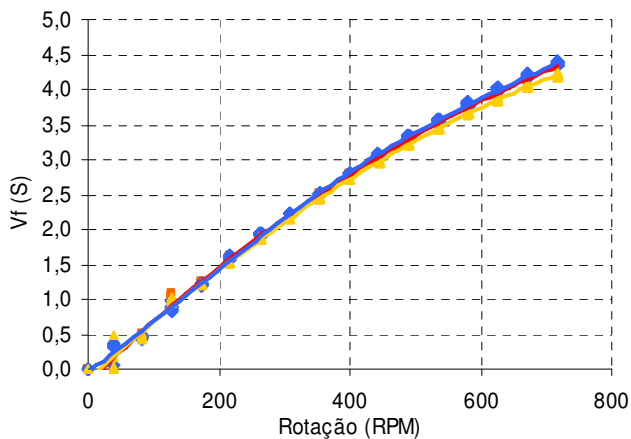


Figura 7. Teste resistivo - tensão *versus* rotação.

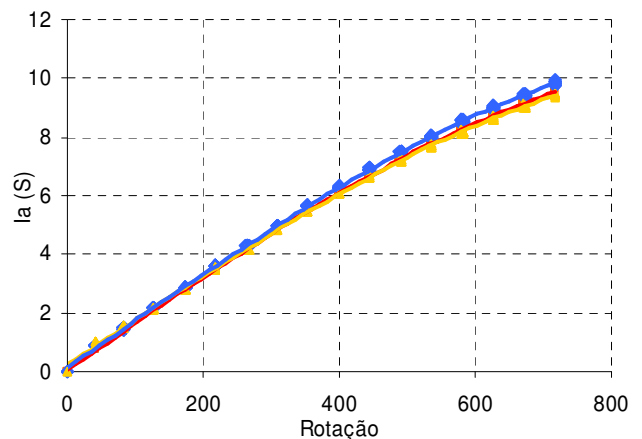


Figura 8. Teste resistivo - corrente *versus* rotação.

A potência que o gerador ($P_{gerador}$) entrega quando conectado ao banco de cargas resistivas, pode ser encontrada através da Eq. (3), sendo entendida como o produto da tensão de linha (V_a) pela corrente (I_a) de cada uma das três fases do teste resistivo.

$$P_{Gerador} = (I_{a1}V_{a1} + I_{a2}V_{a2} + I_{a3}V_{a3}) \quad (3)$$

As medidas de torque, Fig. 9, e potência do gerador, Fig. 10, estão demonstradas a seguir.

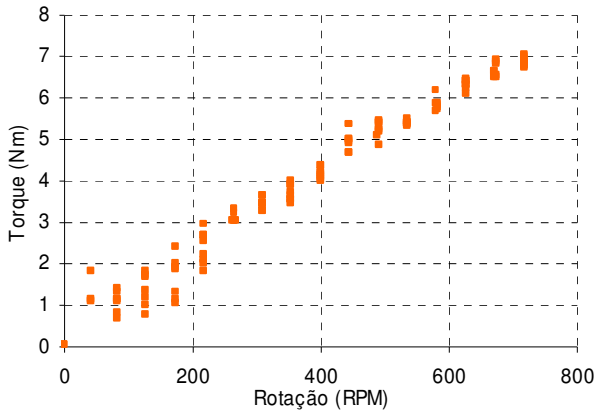


Figura 9. Teste resistivo - torque versus rotação.

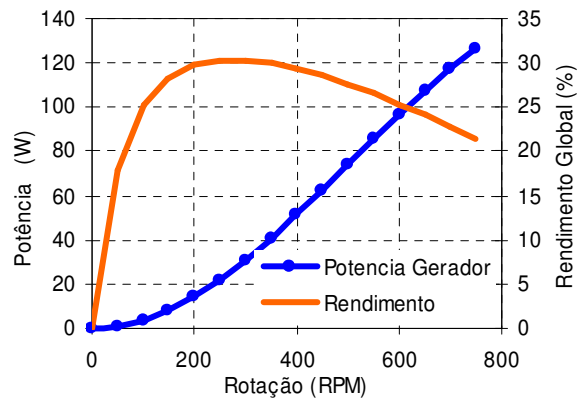


Figura 10. Teste resistivo - potência e rendimento do gerador

A potência fornecida pelo eixo (P_{eixo}) é dada pela Eq. (4), onde “ T ” é o torque do gerador e “ ω ” sua rotação.

$$P_{Eixo} = T\omega \quad (4)$$

O rendimento do gerador ($\eta_{gerador}$) pode ser definido como o cociente entre a potência fornecida pelo gerador ($P_{gerador}$) e a potência entregue pelo eixo (P_{eixo}), Eq. (5).

$$\eta_{Gerador} = \frac{P_{gerador}}{P_{eixo}} \quad (5)$$

O gráfico comparativo entre as potências fornecidas pelo eixo, a potência produzida pelo gerador, as perdas mecânicas e perdas elétricas é encontrado na Fig. (11).

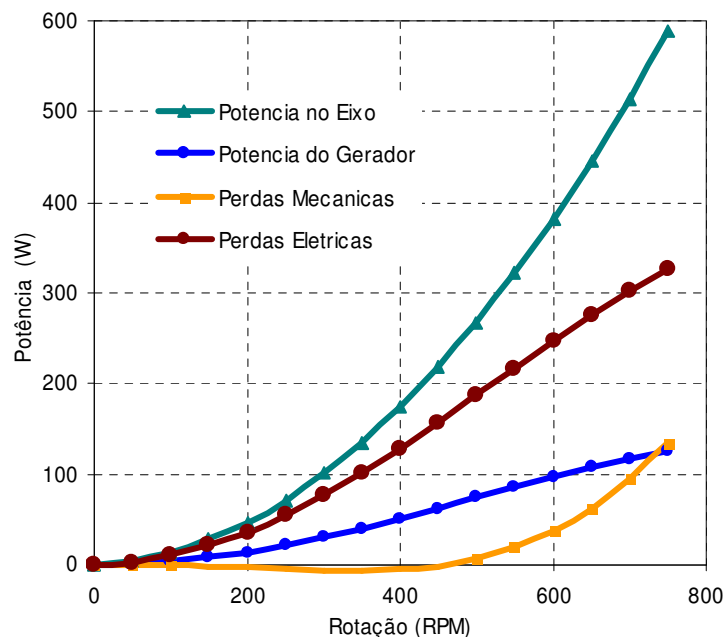


Figura 11. Comparativo entre potências e perdas no gerador – Carga resistiva (0,45 Ohm)

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi possível obter resultados satisfatórios nos três testes apresentados, especificamente para um gerador elétrico de fabricação nacional. Tais testes geram informações suficientes para prever o comportamento das máquinas sob condições reais de uso. A bancada implementada mostra-se apropriada para estes tipos de testes, podendo ser utilizada para avaliar o desempenho de novos geradores que venham a ser fabricados especificamente para atender a demanda de funcionamento de máquinas de pequeno porte de eixo vertical com características diferentes das turbinas eólicas de eixo horizontal.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FINEP pelo auxílio financeiro ao Convênio de Nº 01.04.0217.00 REF. 2694/3 no projeto: “Turbinas Eólicas de Eixo Vertical” e ao CNPQ pela bolsa de iniciação científica no âmbito deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

Gieras J. F., Wing M., 2002, “Permanent Magnet Motor Technology, Design and Applications, Second Edition, Revised and Expanded”.

Pierik J.T.G., Dunlop R.W., Lee W.K., 2001, “Performance Evaluation Method for Autonomous, Applications Orientated Wind Turbine Systems: Systems with batteries”, ECN-RX-01-062.

Muljadi E., Drouilhet S., Holz R., 1996, “Analysis of Wind Power for Battery Charging”, National Renewable Laboratory, State Engineering University of Armenia, ASME Wind Energy Symposium, Houston, Texas.

Muljadi E., Butterfield C. P., Wan Yih-Huei, 1999, “Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications”, National Renewable Energy Laboratory, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 35, NO. 4.

Rovio T., Vihriälä H., Söderlund L., Kriikka J., 2001, “Axial And Radial Flux Generators In Small-Scale Wind Power Production”, Institute of Electromagnetics, Tampere University of Technology, European Wind Energy Conference, Vol. 1.

Sánchez T., Chiroque J. E., Ramírez S., 2003, “Evaluación Y Caracterización De Un Aerogenerador De 100W”, <http://www.itdg.org.pe/>

Skaar S.E., Krovel O., Nilssen R. and Erstad H., “Slotless, Toroidal Wound, Axially-Magnetized Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbine Systems,” Norwegian University of Science and Technology

Spooner E., Chalmers B.J. “TORUS: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator”, In IEE Proceedings-B, volume 139, pages 497–506, 1992.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

LABORATORIAL BENCH TEST PROCEDURES TO SMALL PMG

Marcelo R. Petry

Gustavo Konzen

Jorge Antonio Villar Alé (orientador)

02203701@pucrs.br

gustavo.konzen@pucrs.br

villar@pucrs.br

NUTEMA –Renewable Energy Laboratory - PUCRS, Av. Ipiranga, 6681 CEP 90619-900, Prédio 30, bloco F, sala 272
Porto Alegre - RS - Brasil

***Abstract:** this study is part of a FINEP (Brazilian Federal Studies and Projects Financer) project which is focused in developing and testing different vertical axis wind turbine (VAWT). VAWT has many different characteristics from horizontal axis wind turbine (HAWT). It has a higher solidity and lower rotation, being appropriated to use in urban areas. For commercial use, Permanent magnet generators (PMG) are still not available in Brazil, being necessary evaluate the possibility to use some little generators made to HAWT. This paper shows the method to get the generator characteristics, efficiency, work band and to evaluate the viability to connect then in the VAWT. To apply this method, was necessary built a bench test with the equipment to realize the measures.*

In bench test, was fixed a synchronous motor connected to the PMG. The motor has its rotation controlled by a frequency inverter. It simulates the work conditions, permitting measures as voltage, current and torque. The complete study includes four tests, presenting different generator out connections: short-circuit, open circuit, resistive e inductive tests.

With the obtained results, we can study developed VAWT characteristics and the alternatives and modifications that must be made to permit the use of the evaluated generators.

Keywords: Wind Energy, permanent magnet generator, bench test.