

PROJETO DE UM GERADOR DE IMÃS PERMANENTES DE FLUXO AXIAL PARA PEQUENA TURBINA EÓLICA

Romeu Abrahão Pereira¹; Leandro Aureliano da Silva²; Willian Gigo³; Alberto Wallace T. A. Rodrigues⁴; Dênis Aranha da Silva⁵; Ewerton Silva Sene⁶; José Lucas V. de B. Chaves⁷; Matheus Nardini⁸; Willian Augusto Canevaroli⁹; Rafael de Oliveira Barbosa¹⁰; Gabryel F. C. Cardoso¹¹

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10} Faculdade de Talentos Humanos - FACTHUS, Uberaba (MG), Brasil

¹ Centro Brasileiro de Pesquisa Físicas – CBPF – MCTR, Rio de Janeiro (RJ), Brasil

romeuabrahao@yahoo.com.br¹; lasilva@facthus.edu.br²; wigo@facthus.edu.br³; alberto.wallace@hotmail.com⁴; denis.aranha30@hotmail.com⁵; ewertonsene@hotmail.com⁶; j.lucas.engeletrica@gmail.com⁷; Matheus_nardini@hotmail.com⁸; willian.canevaroli@hotmail.com⁹; rafaeloliveira_barbosa@hotmail.com¹⁰; gabryelfcardoso@hotmail.com¹¹

RESUMO: A extração e utilização da energia do vento por meio de turbinas eólicas de eixo horizontal ou de eixo vertical, requer a disponibilidade de um gerador de construção mecânica simples, alta eficiência de conversão de energia e baixo custo de construção, operando a baixa velocidade de rotação. Este artigo apresenta o procedimento de projeto para um gerador síncrono de imã permanente de fluxo axial, em configuração de duplo rotor, com oito imãs magnéticos cada, e de um estator contendo as armaduras de seis bobinas, conectadas duas a duas, de modo a se ter três fases de tensões geradas, em função dos parâmetros de projeto adotados, buscando obter a máxima tensão induzida, baixas distorções de harmônicos e máxima eficiência. Para avaliar o desempenho do gerador, são apresentados os resultados de variações da tensão de uma fase, potência gerada e do rendimento em função da velocidade de rotação, quando alimentando um circuito resistivo equivalente simples.

PALAVRAS CHAVE: Energia do vento; fluxo axial; gerador síncrono; imã permanente; operação em velocidade variável.

AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR DESIGN FOR SMALL-SCALE WIND TURBINE

ABSTRACT: The extraction and use of wind energy by wind turbines horizontal axis or vertical axis, requires the availability of a simple mechanical construction generator, high energy conversion efficiency and low construction cost, operating at low speed rotation. This paper presents the design procedure for a synchronous generator of permanent axial flow magnet, double rotor configuration, with eight magnets each, and a stator containing the windings of six coils, connected two by two, in order to have three phase voltages generated, according to the adopted design parameters, seeking to obtain the maximum induced voltage, low distortion harmonics and maximum efficiency. To evaluate the performance of the generator, they are shown the results of voltage variations of a power output stage and yield as a function of rotational speed when feeding a single resistive equivalent circuit.

KEYWORDS: Wind energy; axial flux; synchronous generator; permanent magnet; variable-speed operation.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por geração de energia renovável tem propiciado o desenvolvimento de sistemas de conversão da energia mecânica do vento em energia elétrica utilizável.

As máquinas de imãs permanentes têm-se mostrado mais eficientes que as de excitação de campo, por serem mais fáceis de construir e podendo apresentar um grande número de pólos requeridos em operações de baixa velocidade.

Em termos de corrente de fluxo, o projeto de geradores usados em sistemas eólicos, são divididos em máquina de fluxo radial e máquina de fluxo axial. No primeiro, o fluxo magnético circula radialmente pelo estator, pelo espaço de ar e pelo rotor; no segundo, o fluxo se processa na direção axial, originando maior torque eletromagnético, balanceamento das forças atrativas

motor-estator e melhor remoção de calor, apresentando vazão de ar ajustável.

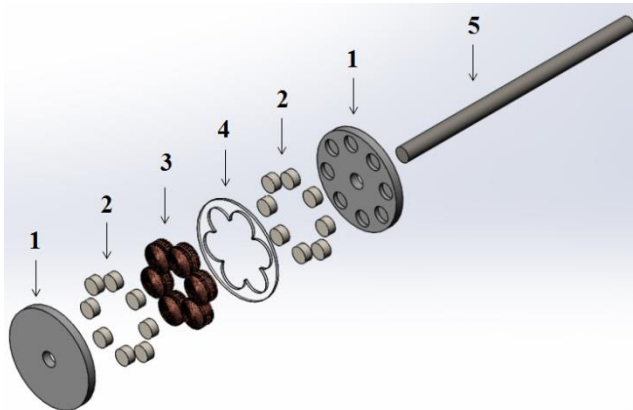
Em relação às máquinas geradoras convencionais, as de imãs permanentes, tanto radiais quanto as axiais, apresentam níveis de ruído de operação menores, permitem construção planas e ajuste fácil do espaço vazio de ar, de modo que o fluxo principal por ele possa variar, permitindo várias topologias discretas. (JACEK, 2005), (MILLER, 1989), (BOLDEA, 2006), (HANSELMAN, 2006), (BUMBY, 2004).

Este artigo apresenta o projeto de um gerador de fluxo-axial de imã-permante, trifásico, de baixa potência, a ser utilizado em pequenas turbinas eólicas, com o objetivo de satisfazer as condições de simplicidade mecânica, de fácil construção e manutenção de baixo custo, e operando sob condições de baixas velocidades de vento.

TOPOLOGIA DO GERADOR

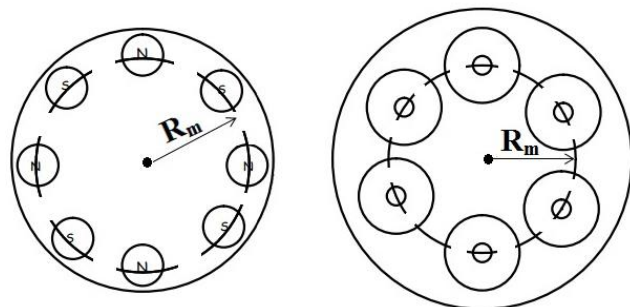
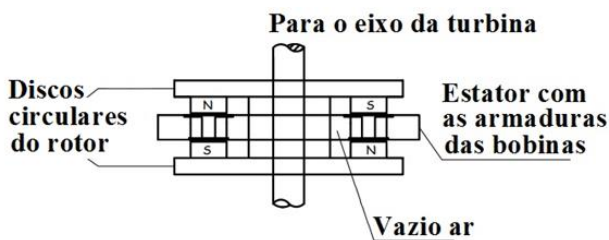
O gerador é constituído de dois rotores de forma plana circular, contendo oito ímãs cada um. Há entre eles um estator não condutor e não magnético, com seis bobinas circulares para geração de voltagem de saída senoidal, e vista de estrutura esquemática em 3D mostrada na Fig.1, e a topologia de duplo rotor de fluxo axial com núcleo de ar e estator mostrado na Fig. 2.

Figura 1 - Vista da estrutura da máquina



Legenda: 1) disco rotor; 2) ímãs;
3) armadura das bobinas;
4) disco estator; 5) eixo gerador

Figura 2 - Topologia do gerador.



R_m , em cada rotor, com o N magnético de um defronte o S magnético do outro, de forma que o fluxo cruza diretamente o espaço de ar entre eles, atravessando as armaduras das bobinas, antes de retornar ao disco do rotor.

O estator suporta as bobinas, com os seus centros posicionados sobre pontos da circunferência de mesmo raio circunferencial do rotor: R_m .

Embora os geradores possam ser projetados para um número qualquer de fases, foi adotado neste projeto um número de fases igual a três, tendo duas bobinas por fase, propiciando 240° de mudança de fase entre bobinas adjacentes. (BUMBY; MARTIN, 2005).

Os ímãs circulares de Neodímio-Ferro-Boro ($N_d Fe 35$), com diâmetro de 22mm e espessura 10mm, são fixados nos discos de aço-carbono SAE-1020. As bobinas de armadura circular são fixadas no estator, ficando posicionados entre os rotores, expostos a campo magnético variável, devido ao giro dos rotores. As perdas devido a contra-corrente geradas (EDDY current losses) nas bobinas, são minimizadas com o uso de fios de cobre de pequeno diâmetro de secção e por denso enrolamento. Essas perdas são desprezíveis quando comparados com as perdas por efeito Joule. (GURU; HIZIROGLU, 2001).

Os parâmetros principais do projeto gerador são sumarizados na tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros principais do gerador.

Símbolo	Quantidade – parâmetros	Valor
P_s	Potência de saída	100W
N	Taxa de Velocidade	300RPM
V	Voltagem de saída	12V
P	Número de pares de polos	8
\emptyset	Número de fases	3
R_i	Raio interno do disco Rotor	50mm
R_e	Raio externo de disco Rotor	70mm
R_{ei}	Raio interno estator	50mm
R_{ee}	Raio externo estator	80mm
t_e	Espessura do estator	10mm

MODELO ANALÍTICO

Os procedimentos analíticos de cálculos para o projeto são os descritos em (BUMBY, 2004), com a hipótese de que, no centro axial do estator, a distribuição de densidade de fluxo magnético induzido $B_m(x)$ na direção axial x , tem forma senoidal, com raio igual à metade do passo de pólo do rotor, resultando:

$$B_n(x) = \left[\frac{J_n \cdot \mu_0 \cdot \sinh(u_n \cdot t_n)}{u_n \cdot \sinh(u_n \cdot \frac{g}{2})} \right] \cos a_n = \hat{B} \cos u_n \cdot x \quad (1)$$

Sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, g o vazio efetivo de ar e J_n a densidade magnética de corrente equivalente definida por:

$$J_n = \frac{4}{T} * \frac{B_{rem}}{\mu_0 \mu_{rec}} \text{sen} \frac{u_x}{2} * dm, \quad \left(\frac{A}{m^2} \right) \quad (2)$$

Sendo:

B_{rem} = Remanência magnética
 dm = diâmetro do imã

T = Passo polar, onde:

$$T = \frac{\pi D_o}{2p} = \frac{\pi}{8} * 0,050 = 0,01963 \text{ e } u = \frac{2p}{2D_o} = \frac{8}{0,10} = 80$$

é uma constante.

O pico de densidade de fluxo no eixo médio do estator tem valor:

$$B_{pico} = \frac{4Br}{\mu_r \pi} \text{sen} \frac{Prm}{2ri} * \frac{\text{senh}\left(\frac{Plm}{2ri}\right)}{\frac{\text{senh}[P(2lm+g)]}{4ri}} = 0,4366T \quad (3)$$

Sendo Br e μ_r a densidade de fluxo magnético residual e a permeabilidade relativa, respectivamente. Os demais parâmetros são os descritos na Tab. I e Apêndice I. O componente fundamental (rms), da Força Eletromotriz Induzida em cada armadura da bobina é calculada a partir do primeiro harmônico do fluxo como: (HANSELMAN, 2006), (KRAUS; CARVER, 1973).

$$E_{bobina} = \frac{\sqrt{2} K_1 K_2 n N \pi^2 B_{pico} R_i^2}{15 P^2 (Reb - Rib)} * \left[4r_i * \left(\text{sen} \frac{P.Reb}{2r_i} - \text{sen} \frac{P.Rib}{2r_i} \right) - Pr_i \left(1 + \cos \frac{P.Reb}{2r_i} \right) + Pr_i \left(1 + \cos \frac{P.Rid}{2r_i} \right) \right] \quad (4)$$

K_1 e K_2 são os fatores de enlaçamento de fluxos com os valores $K_1=1,1$ e $K_2=1,05$. (HANSELMAN, 2006), n é o número de espiras na armadura da bobina e N é a velocidade de rotação em (rpm); Rib e Reb são os raios interno e externo da bobina (Apêndice I).

Com a velocidade de rotação igual a 300rpm e 210 espiras na armadura da bobina, as equações (3) e (4) fornecem para o acoplamento magnético λ o valor: (GURU; HIZIROGLU, 2001), (BUMBY; MARTIN; SPOONER; BROWN; CHALMERS, 2004).

$$\lambda = \frac{E \cdot \sqrt{2}}{2\pi f} = 0,067817 \quad (5)$$

Com FEM = 6,026v por bobina.

A indutância da bobina é: (KRAUS, 1973)

$$L_b = \frac{Kl \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot m^2}{6(g + t_m x^2)} (R_{eb}^2 + 2R_{eb} \cdot R_{ib} + 3R_{ib}^2) = 1,37mH \quad (6)$$

$$\mu_0 = \text{Permeabilidade do vácuo} = 4\pi * 10^{-4} T \frac{m}{A}$$

K_l = Fator de compensação de ligação de fluxo entre as bobinas = 1,5

A resistência da bobina é:

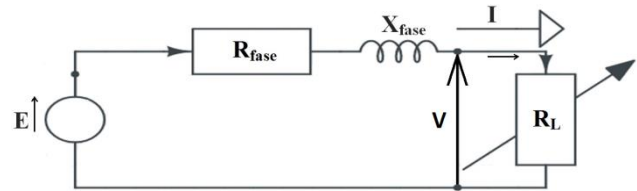
$$R_b = \rho_{cu} * \frac{n \cdot 2\pi \cdot (R_{ib} + \frac{R_{eb}}{2})}{A_{cu}} = 0,36 \Omega \quad (7)$$

A Reatância é: $X_l = \omega L_b = 2\pi \cdot f \cdot L_b$

Resultado: $X_l = 0,172 \Omega$.

O rendimento do gerador ligado a uma turbina, e a cujos terminais se liga uma carga R_L , pode ser avaliado considerando o circuito equivalente abaixo.

Figura 3- Circuito elétrico equivalente em carga R_L .



Sendo duas bobinas por fase, os valores a considerar são:

$$X_{fase} = 2 * X_L = 2 * 0,172 = 0,344\Omega \quad (8)$$

$$R_{fase} = 2 * R_b = 2 * 0,036 = 0,720\Omega$$

A indutância total resulta:

$$Z = (R_L + 0,72) + j * 0,344 \quad (9)$$

A corrente em cada fase é:

$$I_{fase} = \frac{E_{fase}}{\sqrt{(R_L + 0,72)^2 + (0,344)^2}} \quad (10)$$

A potência total fornecida é:

$$P_{Total} = 3 * E_{fase} * I_{fase} \quad (w)$$

A perda por efeito Joule é:

$$P_{cu} = 2 * I_{fase}^2 * R_b \quad (w) \quad (11)$$

A perda devido às contracorrentes induzidas na bobina (Correntes Eddy) é: (BOLDEA), (KRAUS; CARVER, 1973).

$$P_{Eddy\ bobina} = \frac{1}{16} (\omega B D_{cu})^2 * \frac{1}{\rho_{cu}} (2n) \cdot E \cdot \left(\frac{\pi D_{cu}^2}{4} \right) \quad (12)$$

A potência perdida devido às contracorrentes são muito pequenas em geradores axiais de baixa rotação e

podem ser desprezadas, quando comparadas com as perdas por efeito Joule. (CARTER, 1967)

A perda Total P_{TP} de potência é:

$$P_{\text{Perdida Total}} = P_{\text{Joule}} + P_{\text{Eddy}} \quad (13)$$

A eficiência elétrica é:

$$\eta = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{total}} + P_{\text{total perdida}}} \quad (14)$$

DESEMPENHO DO GERADOR

As três fases de saída do gerador podem ser ligadas a bancos de resistores, podem ser retificadas e usadas para carga em baterias ou alimentar circuitos de consumo de energia elétrica de uma maneira geral, dependendo da demanda e da capacidade gerada.

No caso de alimentação de uma carga resistiva R_L , o circuito equivalente de uma única fase, como mostrado na Fig. 3, fornece uma potência que é função do valor da carga resistiva ligada, e da tensão gerada nos terminais das bobinas.

Para avaliar o comportamento do gerador em estado de regime estacionário simples, admitindo as hipóteses de saturação magnética desprezível, bem como das componentes harmônicas e das perdas por histereses, a velocidade de rotação Ω em rad/s, a FEM induzida E em volts, a fluxo magnético constante, e a frequência da corrente e voltagem ω , se relacionam pelas equações: (BOLDEA, 2006)

$$E = K \cdot \Omega \quad (15)$$

e,

$$\omega = p \cdot \Omega \quad (16)$$

sendo p igual ao número de pólos do gerador e K a chamada “constante da máquina.”

A potência fornecida por fase é:

$$P_{\text{fase}} = \frac{E^2}{(R_b + R_L)^2 + X_b^2} \cdot R_L \quad (17)$$

Considerando a (14), a (16) se escreve:

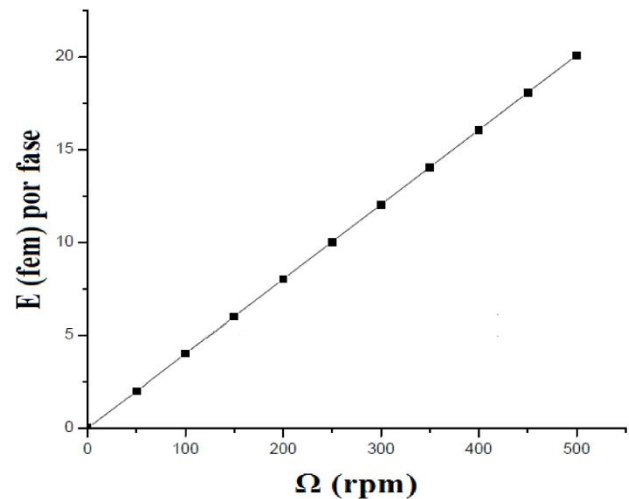
$$P_{\text{fase}} = \frac{K^2 \Omega^2}{(R_b + R_L)^2 + X_b^2} \cdot R_L \quad (18)$$

Para $E_{\text{fase}} = 12,052\text{v}$ e $\Omega = 31,415 \text{ rad/s}$, a constante de máquina do gerador é igual a $K = 0,38364, \left(\frac{\text{V.s}}{\text{rad}}\right)$. Se $R_L = 2,5 \text{ Ohms}$ em (17), resulta $P_{\text{fase}} = 34,63 \text{ Watt}$. A potência total fornecida pelo gerador é:

$$P = 3 \cdot 34,63\text{w} = 103,89\text{w}$$

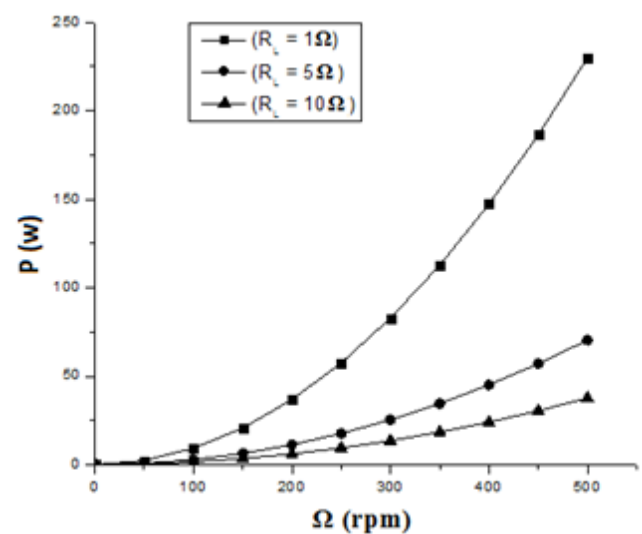
A tensão de fase gerada segundo as equações (5) e (14) em função da velocidade de rotação do gerador apresentam relação de proporção direta entre si, com velocidade de rotação maiores gerando tensões também maiores, como mostra a Fig. 4.

Figura 4 – Tensão Gerada E em função da velocidade de rotação Ω .



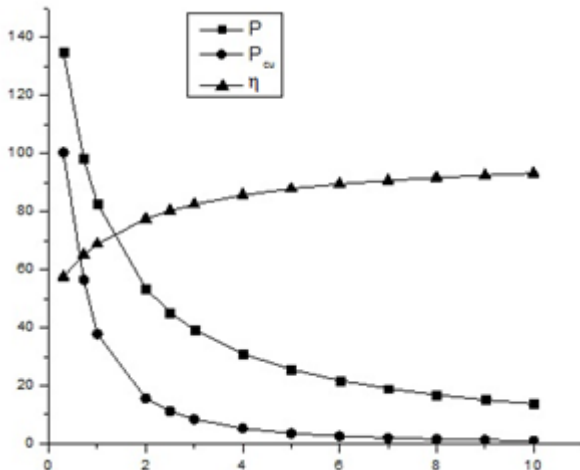
Para os valores de projeto $E = 12,00\text{V}$ e $\Omega = 300 \text{ rpm}$, foram determinadas as potência, perdas e o rendimento em função de valores de R_L no intervalo de $0,1 \Omega$ a 10Ω . Os resultados apresentados na Fig. 5 para os valores de $R_L = 1 \Omega, 5 \Omega$ e 10Ω mostram sempre valores de potência crescentes para aumento da velocidade de rotação porém, os valores correspondentes à mesma rotação, são menores para resistências maiores.

Figura 5 – Potência de saída da fase do gerador para valores de R_L .



A Fig. 6 apresenta a potência, as perdas e o rendimento para tensão de 12,052V, e velocidade de rotação de 300rpm, para os valores de R_L variando de 0,1 a 10 Ω .

Figura 6 – Potência gerada (P), potência perdida (P_{cu}) e rendimento (η) do gerador em função da resistência R_L .



Para valores da resistência de carga R_L da ordem de grandeza que a do gerador e da reatância normal, ocorrem maiores valores da potência porém também com maiores perdas e menores eficiência. Para valores de R_L crescentes a partir de 2 Ω , a potência gerada por fase é próxima do valor de projeto, com perdas inferiores a 20W e eficiência superiores a 80%. Contudo, para valores de R_L maiores do que 4 Ω , o acréscimo da taxa de crescimento da eficiência é menor, com pouco ganho na potência gerada, não justificando a ligação de cargas resistivas de grandes valores aos terminais desse gerador.

CONCLUSÃO

Este artigo descreve o projeto, o procedimento de cálculo e o desempenho de um gerador axial de ímãs permanentes para uso com turbinas eólicas de pequeno porte, podendo também, ser usado em pequenas turbinas hidráulicas. É de fácil construção, e os materiais a serem empregados na sua construção são facilmente encontrados no comércio especializado. Atendendo aos parâmetros de cálculos e dimensionamento adotados, obtém-se eficiência superior a 80%, particularmente boa para esse tipo de gerador. Operando em diferentes velocidades de rotação, pode-se controlar a potência fornecida e, variando o valor da carga ligada aos terminais das fases, pode-se pré-determinar o rendimento desejado.

APÊNDICE I - PARÂMETROS DE CÁLCULO

Dimensões do ímã:
 R_m : raio= 11mm
 T_m = espessura= 10mm

Comprimento axial do estator = 10mm
 Espessura do disco do rotor = 10mm
 Comprimento axial do rotor = 20mm
 Diâmetro do vazio-ar médio da máquina = $r_1 + r_0$
 $D_g = 50 + 70 = 120$ mm
 Efetivo vazio-ar : $g_e = 2 + 10 + 2 * 1,5 + 10 = 33$ mm; sendo $g = 1,5$ mm o vazio ar entre os discos rotor-estator.

Comprimento axial da máquina:

$$L_{maq} = 2 * L_{rotor} + L_{estator} + 3 = 56 \text{mm}$$

Número de bobinas no estator:

$$n = \frac{3}{4} p = \frac{3}{4} * 8 = 6 \text{ bobinas}$$

Passo polar: $\tau = \frac{2\pi}{2D_0} = 0,0393$

Número de espiras por bobinas = 210

Dimensões da armadura das bobinas:

E= espessura = 15mm
 Rib= Raio interno= 0,5mm
 Reb= raio externo = 20 mm
 Fio da armadura: Cobre, $D_{cu} = 1$ mm

REFERÊNCIAS

- BOLDEA, Ion. **Synchronous Generators**. CRC, Press – Taylor and Francis Group, 2006.
- BUMBY, Jim R.; MARTIN, R.; SPOONER, E.; BROWN, N.L; CHALMERS, B.J. **Eletromagnetic Design of Axial Flux Permanent Magnet Machines**. Vol 151, Nº 2. Proc IEE- Electrical Power Applications, march 2004. pp. 151-160.
- BUMBY, Jim R.; MARTIN, R. **Axial-flux permanent-magnet synchronous Generator for a direct coupled wind turbine system**. Proc. Inst. Electr.Eng. Electr. Power Appl., 2005. 15- pp 1065-1075
- CARTER, George W. **The Eletromagnetic Field in its Engineering**. Aspects; LONGMANS, 1967.
- GURU, Bhag S.; HIZIROGLU, HÜseyin R. **Electric Machinery and Transformers**. Oxford University press, 2001.
- HANSELMAN, Duane. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. 2.ed. Magna Physics Publishing, 2006.
- JACEK, F. Gieras; WANG, Rong-Jie; KAMPER, Maarten J. **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**. Kluwer Academic Publishers, 2005.
- KRAUS, John D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1973.

MILLER, Timothy John Eastman Miller. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives.** Oxford Science Publications-Clarendon Press, 1989.