

SISTEMA EÓLICO DE PEQUENO PORTE PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS

Isaac R. Machado, Demercil S. Oliveira Jr., Luiz H. S. C. Barreto,
 Herminio M. Oliveira F., S. Rafael O. Souza, Mônica M. Reis
 Universidade Federal do Ceará - Grupo de Processamento de Energia e Controle – GPEC
 Caixa Postal 6001, CEP-60455-760, Tel.: +55 (85) 3366-9586,
 Fortaleza – CE – Brasil.
 isaacrochamachado@yahoo.com.br, demercil@dee.ufc.br

Resumo - Este artigo trata do estudo de um sistema eólico de pequeno porte utilizado para carregamento de baterias. Uma topologia que visa o aproveitamento da energia gerada em baixas velocidades é proposta. As características da turbina eólica e do gerador utilizado são discutidas, dando uma completa visão da modelagem do sistema. Uma simulação do sistema (MATLAB-SIMULINK) também é feita e os resultados simulados são discutidos e comparados com os experimentais, obtidos a partir de um protótipo de 1kW, de modo a validar a proposta do aproveitamento na energia gerada em baixas velocidades (130 A 270 rpm).

Palavras-Chave – Carregamento de baterias, controle de máxima potência, geração eólica.

A SMALL SIZE WIND GENERATION SYSTEM FOR BATTERY CHARGING

Abstract – This paper is concerned with the study of a small wind generation system used for battery charging. A topology that aims at the exploitation of the energy generated at low speed is proposed. The characteristics of the wind turbine and the generator are discussed, providing the overview of the system modeling. Simulation tests of the system are obtained using MATLAB/SIMULINK, as the relevant results are supposed to be compared with experimental data and validate the proposal.

Keywords - Battery charging, maximum power point tracking, wind generation.

NOMENCLATURA

A_v	Área varrida pela seção transversal da turbina.
B	Coefficiente de atrito viscoso (0.00467 Nm/rad/s).
C_p	Coefficiente de potência.
C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 e C_6	Constantes relacionadas com o projeto aerodinâmico da turbina.
$Ci(s)$	Função de transferência do controlador.
E_a, E_b, E_c	Forças eletromotrizas induzidas fase neutro.
F_m	Ganho do modulador PWM.

$Gi(s)$	Função de transferência da planta (i_L/d).
$Hi(s)$	Função de transferência relativa ao ganho de amostragem de corrente.
I_a, I_b, I_c	Correntes de linha do gerador (A).
I_L	Corrente no indutor (A).
I_{dc2}	Corrente nas baterias (A).
I_{Lref}	Corrente de referência do indutor.
J	Momento de inércia da massa girante (0,065 kg.m ²).
L_a, L_b, L_c	Indutâncias próprias dos enrolamentos de fase (H).
L_o	Indutância cíclica homopolar ($L+2M$) (H).
L_s	Indutância cíclica ($L-M$) (H).
M_{ab}, M_{ac}, M_{bc}	Indutâncias mútuas entre os enrolamentos de fase (H).
P	Número de pares de pólos (7);
P_v	Potência disponível no vento (W).
P_m	Potência mecânica extraída (W).
R_a, R_b, R_c	Resistências dos enrolamentos de fase (Ω).
T_e	Torque elétrico.
T_m	Torque mecânico.
u	Velocidade do vento (m/s).
V_a, V_b, V_c	Tensões induzidas fase neutro (V).
V_{dc1}	Tensão de entrada do conversor boost (V).
V_{dc2}	Tensão de saída (barramento das baterias) (V).
β	Ângulo de pitch (Graus).
λ	Relação da velocidade de ponta.
ρ	Operador diferencial.
ρ_a	Densidade do ar (Kg/m ³).
ω_g	Velocidade mecânica do rotor (rad/seg.).
Θ_g	Ângulo que define a posição mecânica do rotor (rad.).
Θ_r	Ângulo que define a posição elétrica do rotor (rad.).
P	Número de par de pólos.
V_{qd}	Componentes da tensão de estator.
I_{qd}	Componentes da corrente de estator.

I. INTRODUÇÃO

A energia dos ventos é uma fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia. No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e

Artigo submetido em 28/09/2006. Revisões em 12/12/2006 e 07/03/2007.
 Aceito por recomendação do editor R. M. Stephan.

dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão. Mais de 50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e equipamentos foram desenvolvidos. Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 30%, movimentando bilhões de dólares em vendas por ano. Logo, os sistemas de geração eólicos estão começando a ser o centro das atenções, pois são de custos competitivos e fontes não poluentes e renováveis de energia quando comparados a outros sistemas de geração (combustíveis fósseis e nucleares) [1].

Um sistema eólico pode ser utilizado basicamente em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, conforme a aplicação, de uma unidade de armazenamento. Os sistemas isolados de pequeno porte, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida. Na área de geração eólica, os sistemas de velocidade variável são mais atrativos do que os sistemas com velocidade fixa, pois um melhor rendimento do sistema pode ser obtido com a implementação de algoritmos seguidores de máxima potência.

Este artigo trata em particular do estudo de um sistema eólico isolado para carregamento de baterias. É apresentada uma completa visão da modelagem e funcionamento do sistema, bem como uma alternativa de controle para que a extração de energia ocorra em toda faixa de operação e sempre numa situação de ótimo aproveitamento em baixas velocidades.

II. TOPOLOGIA PROPOSTA

O sistema em estudo é disponível comercialmente pela empresa de produtos de geração alternativa ENERSUD [10] e é composto por uma turbina eólica e um gerador síncrono de ímã permanente, com topologia de fluxo axial, acoplados diretamente sem a presença de caixa de engrenagens. Atualmente este sistema para carregamento de baterias é disponível sem proteção contra excesso de carga nas baterias (controlador de carga), o que reduz a vida útil das baterias. Outra evidente limitação do sistema é o desperdício da energia eólica disponível na faixa de operação em baixas velocidades. Esta limitação se deve a conexão de duas baterias de 12 V, 150Ah em série (barramento de 24 V) diretamente alimentadas por um retificador trifásico, pois a presença dos diodos não permite a transferência de energia enquanto a tensão de fase gerada não ultrapassar o valor necessário para polarizar os diodos (aproximadamente a 240 rpm de velocidade mecânica).

Para solucionar o problema do desperdício da energia disponível em baixas velocidades, propõe-se uma topologia em que se coloca um conversor *boost* operando em paralelo com um retificador trifásico em ponte completa. Na faixa de operação em baixas velocidades o conversor *boost* é utilizado para drenar a corrente vinda do gerador para as baterias. Quando a tensão de entrada do conversor V_{dc1} supera os 24 V (faixa de altas velocidades) o retificador passa a suprir energia às baterias deixando o conversor inoperante.

O processo de comutação das duas faixas de operação não requer nenhum circuito auxiliar, pois é gerenciado por um microcontrolador da micrichip (PIC16f876), que também é utilizado na implementação de um algoritmo seguidor de máxima potência na faixa de baixas velocidades. A figura 1 mostra a topologia proposta e o diagrama de blocos relativo ao sistema de controle implementado.

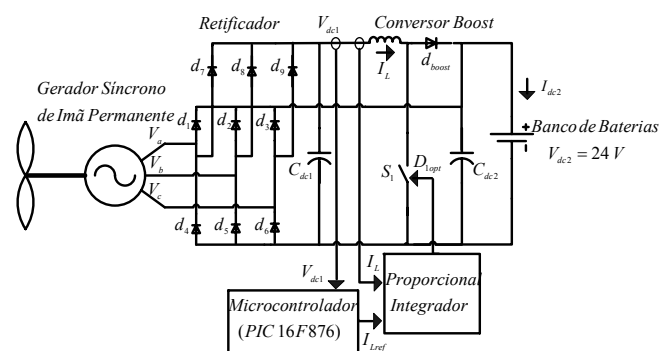


Fig. 1. Topologia proposta.

A verificação da tensão de entrada do conversor V_{dc1} é necessária para determinação da corrente utilizada como referência na malha de controle em modo corrente e também para controle on/off do integrado UC 3525 (pino shutdown). O integrado citado é muito utilizado no controle de conversores estáticos (modulação PWM) e o seu pino 10 (pino shutdown) traz a opção de queda dos pulsos quando ativado. A corrente de referência é capturada numa tabela que armazena valores de corrente ótimos para cada tensão de entrada (e velocidade mecânica). A tabela I mostra os principais dados relativos ao sistema.

TABELA I
Características do Sistema Eólico.

Diâmetro da hélice	2,46 m
Potência de saída a 12m/s	1000 W
Potência máxima de saída a 20m/s	1200 W
Número de pás	3
Velocidade de partida	2,2 m/s
Torque de partida	0,3 Nm
Controle de velocidade	Active Stall
Proteção para altas velocidades	Controle de passo
Sistema magnético	Neodímio
Sistema elétrico	Trifásico
Tensão de saída	24 V
Topologia (gerador)	Fluxo axial
Peso total	32 kg
Material Antioxidante	Alumínio / Inox

III. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Comportamento Aerodinâmico da Turbina Eólica

Uma quantidade de vento de massa m que flui com velocidade u no sentido axial da turbina de vento possui certa energia cinética. A potência, P_v , disponível no vento é a derivada da energia cinética com relação ao tempo dada pela equação 1, onde A_v é a área (varrida) da seção transversal da turbina de vento e ρ_a é a densidade do ar. Isto representa a potência total disponível para a extração [2].

$$C_p = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot e^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad (1)$$

Como o vento passa através da turbina, a perda de potência do vento é igual a potência capturada pela turbina. A máxima potência teórica capturada pela turbina equivale a 59% (coeficiente de Betz) da potência do vento.

A extração de potência mecânica, P_m , em relação a potência disponível no vento, P_v , feita por turbinas eólicas é dada pelo desempenho do coeficiente de potência, C_p . A equação 2 expressa a potência mecânica extraída do vento para o eixo do gerador [2].

$$P_m = C_p \cdot P_v = C_p \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_v \cdot u^3 \right) \quad (2)$$

O valor de C_p é função da velocidade do vento, u , da velocidade de rotação da turbina, ω_g , do ângulo de pitch, β , e dos parâmetros da pá da turbina. A relação da velocidade de ponta, λ , é um parâmetro que combina os efeitos da velocidade de rotação da turbina e a velocidade do vento e também pode ser relacionada com o coeficiente de potência. Sua definição é a razão entre a velocidade de ponta da turbina ($\omega_g \cdot R$) e a velocidade do vento u .

O coeficiente de potência de turbinas eólicas é determinado pelos fabricantes através de testes realizados em túneis de vento, onde para se obter a curva do C_p é relacionada a potência capturada pela turbina, P_m , para cada relação de velocidade de ponta, λ , e ângulo de pitch, β .

A equação da curva C_p para uma dada turbina eólica é apresentada na equação 3 como demonstrado em [2] e [3]:

$$C_p = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot e^{\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad (3)$$

Onde C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 e C_6 são constantes que são relacionadas com o projeto aerodinâmico da turbina e λ_i um parâmetro dado pela equação 4 abaixo:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Para realização da simulação foram utilizados os seguintes valores para as constantes mencionadas na equação 3:

$$C_1 = 0,5176, C_2 = 116, C_3 = 0,40, C_4 = 5, C_5 = 21, C_6 = 0,0068$$

Estes valores são relativos a uma turbina de 3 pás com características aerodinâmicas semelhantes a turbina utilizada no sistema. O valor de β escolhido para simulação foi 0° , pois o C_p máximo é obtido nesta condição. Na técnica de controle a ser implementada não há necessidade de se conhecer com precisão tal curva.

B. Características do Gerador

A máquina utilizada no sistema é um gerador síncrono de ímã permanente (GSIP) de 1 kw a 1000 rpm, 7 pares de pólos e com topologia de fluxo axial. A configuração característica deste tipo de máquina favorece o seu emprego em sistemas de geração eólicos. Diversos estudos anteriores como em [4] e [5] tratam das diversas características próprias deste tipo de máquina. O equacionamento da dinâmica da máquina é feito como em [5] e [6] e é mostrado nas equações 5, 6, 7 e 8.

$$T_e = \frac{E_a \cdot I_a + E_b \cdot I_b + E_c \cdot I_c}{\omega_g} \quad (5)$$

$$J \cdot \rho \cdot \omega_g = T_m - T_e - B \cdot \omega_g \quad (6)$$

$$\rho \cdot \theta_g = \omega_g \quad (7)$$

$$\rho \cdot \theta_r = P \cdot \omega_g \quad (8)$$

O modelo elétrico da máquina síncrona operando em regime permanente como gerador é mostrado na figura 2 [5].

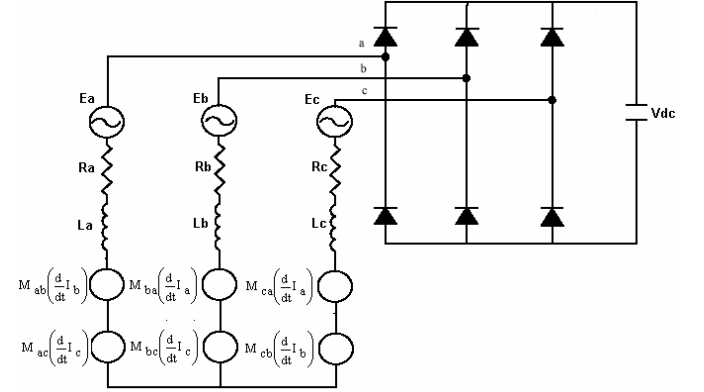


Fig. 2. Modelo elétrico do gerador eólico.

Com auxílio do modelo elétrico da máquina, foram determinadas as equações das tensões de fase geradas na forma matricial.

$$\begin{pmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_o \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{pmatrix} - R \begin{pmatrix} I_o \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_o & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_o \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{pmatrix} \quad (9)$$

Após feitas simplificações e a transformada inversa $\alpha\beta$ na equação matricial 9 chega-se à equação 10.

$$E^2 = (V + R \cdot I)^2 + (L_s \cdot \omega \cdot I)^2 \quad (10)$$

Considerando a corrente como incógnita, podemos então encontrar as raízes da equação 10. A raiz válida é dada na equação 11.

$$I = \frac{-V \cdot R + \sqrt{(R \cdot E)^2 + (L_s \cdot \omega)^2 \cdot (E^2 - V^2)}}{R^2 + (L_s \cdot \omega)^2} \quad (11)$$

Para determinação dos parâmetros físicos da máquina (resistência de fase, indutâncias próprias e mútuas dos enrolamentos) foram realizadas uma série de testes e medições como descrito a seguir.

Resistências dos enrolamentos: Aplica-se uma tensão cc em cada um dos enrolamentos com verificação da respectiva leitura de corrente. A resistência por fase encontrada foi de $0,5 \Omega$ / fase.

Indutância própria: Aplica-se uma tensão ac (valor rms e frequência conhecidos) no enrolamento com verificação da respectiva leitura de corrente. Logo, a impedância e reatância própria do enrolamento podem ser determinadas. O valor considerado foi encontrado a partir do cálculo do valor médio das indutâncias encontradas nas várias medições. É importante frisar que os três enrolamentos da máquina são uniformemente distribuídos, balanceados e defasados de 120° . Conseqüentemente as indutâncias próprias e mútuas nas três fases são iguais. Assim foi obtido uma indutância própria média de 3,35 mH.

Indutância mútua: Para indutância mútua foi utilizada a mesma técnica descrita no caso da indutância própria, porém agora com a verificação da tensão induzida no enrolamento em que se deseja saber a indutância mútua. Assim com a medição da corrente que circula no enrolamento em que se aplica a tensão, calcula-se a reatância mútua entre os enrolamentos envolvidos. O valor de indutância mútua considerado foi obtido pela média das indutâncias mútuas encontradas. Logo, com as medidas realizadas, a média das indutâncias mútuas foi igual a 3,06 mH.

C. Simulação do sistema

Para simulação do sistema proposto foi utilizado o MATLAB (Simulink). A modelagem foi feita de acordo com todo equacionamento anteriormente descrito. A figura 3

mostra o esquemático relativo a modelagem do gerador com a conexão de um retificador trifásico em ponte completa alimentando diretamente o banco de baterias (representado por uma fonte de tensão CC). A modelagem do comportamento dinâmico do gerador eólico segue as equações 5, 6, 7 e 8, enquanto o modelo elétrico é descrito pela equação matricial. A modelagem do desempenho aerodinâmico da turbina eólica também foi implementado e está de acordo com as equações 3 e 4.

As simulações têm o objetivo de provar e validar a existência de um ponto ótimo de operação e prever o comportamento do sistema para cada situação de velocidade do vento. Para isso foi proposta uma simulação em que se adiciona uma fonte de tensão controlada na saída do retificador. A fonte de tensão controlada determina uma variação da tensão V_{dc} em rampa, simulando uma variação da impedância vista pelo gerador. Logo, a variação da impedância de saída determina uma variação da tensão de fase gerada e velocidade mecânica.

Logo, pela observação do comportamento da potência de saída (fig. 4) verifica-se a existência de um ponto de máxima potência transferida para saída. Este ponto de máxima potência ocorre numa tensão DC ótima para cada velocidade do vento. A figura 4 apresenta o gráfico da potência de saída versus tempo para uma velocidade do vento de 7 m/s. No decorrer de 10 segundos a tensão DC de saída é variada de 0 a 70 V em rampa e a velocidade mecânica de 0 a 653 rpm. A ondulação na forma de onda da potência de saída se deve a uma ondulação na corrente DC de saída já esperada pelo processo de retificação.

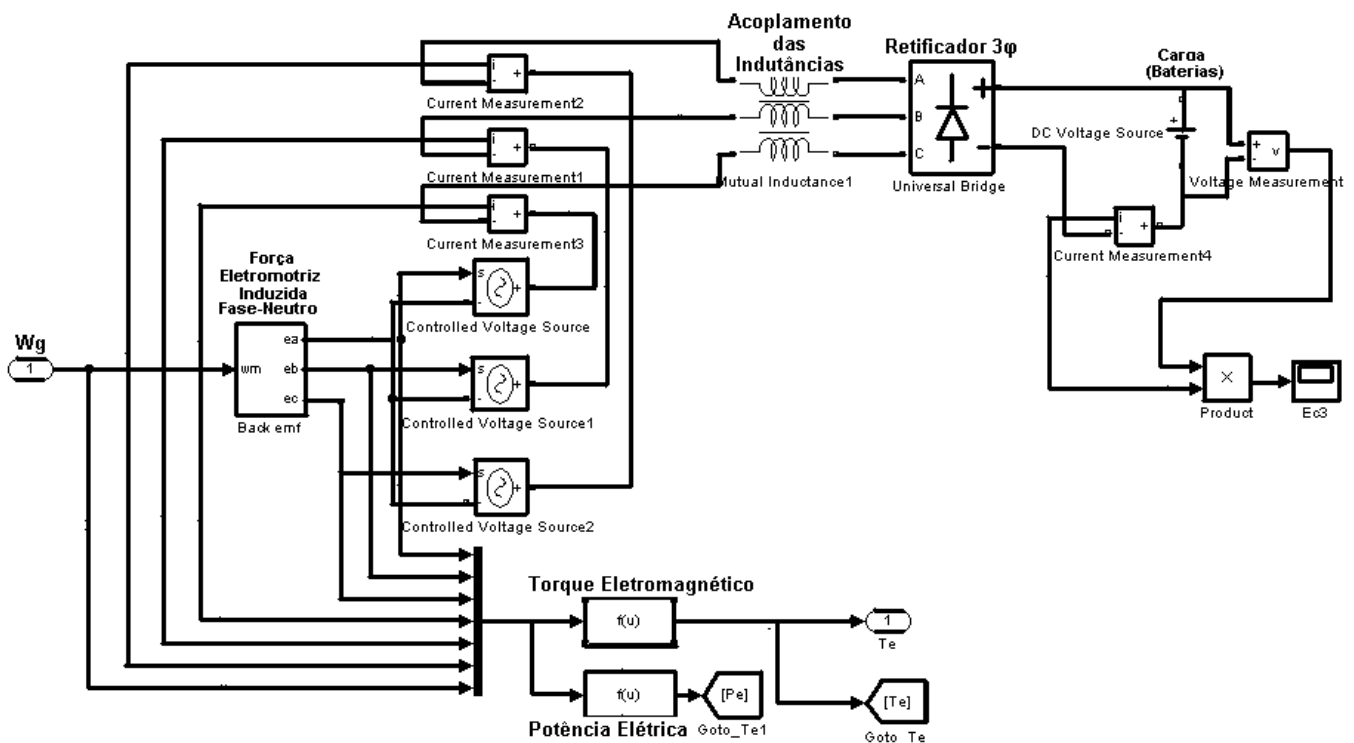


Fig. 3. Esquemático do sistema eólico simulado.

Na situação mostrada na figura 4, observa-se que uma máxima potência de saída ocorre aproximadamente aos 6,25

segundos, instante em que a tensão de saída é de 44,1 V (tensão ótima de saída).

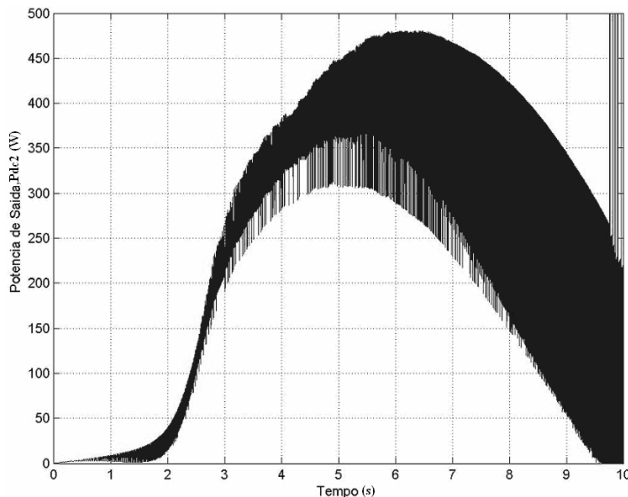


Fig. 4. Potência de saída versus tempo.

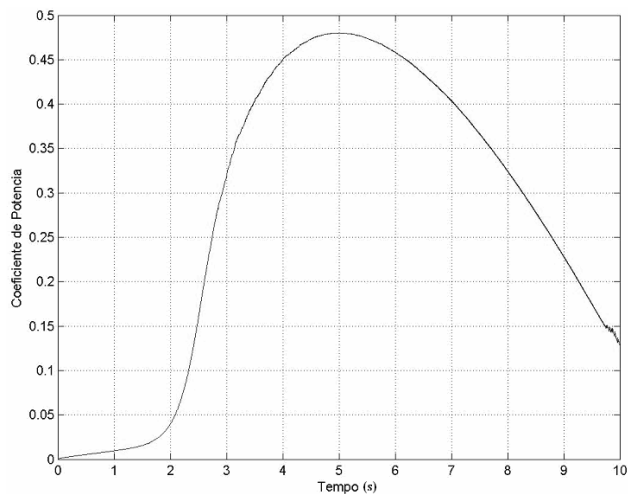


Fig. 5. Comportamento do coeficiente de potência.

O coeficiente de potência também é um importante parâmetro a ser observado e é mostrado na figura 5. Observa-se o desempenho do C_p de 0 a 10 s, para mesma variação de tensão e velocidade mecânica no tempo descrita para figura 4. É importante notar que a forma de onda da potência de saída tem um formato parecido com a curva do coeficiente de potência, porém os seus máximos ocorrem em instantes diferentes devido às perdas internas existentes na máquina e nos diodos. As perdas joulicas (RI^2) são responsáveis por grande parte das perdas internas neste tipo de máquina.

As simulações foram feitas para várias velocidades do vento (3 m/s a 12 m/s). A existência do ponto de máxima potência pode ser observada pela comparação entre valores de potência de saída, obtidos para operação no ponto ótimo (V_{dc1} ótimo) e fora deste ponto (V_{dc1} igual a 24 V – módulo ENERSUD). As tabelas II e III trazem os resultados para da simulação para as duas situações citadas.

Para todas as velocidades de vento uma maior potência é disponível quando o sistema opera com V_{dc1} ótimo. Assim, o ponto ótimo de operação pode ser alcançado pelo controle da tensão V_{dc1} . Para isso, a adiciona-se um conversor *boost* operando em paralelo com um retificador trifásico em ponte

completa, pois assim é possível se obter uma tensão de saída fixa (24 V) e um controle da tensão V_{dc1} através do ajuste do ciclo de trabalho num ponto de otimização do sistema.

TABELA II
Resultados da Simulação para
Operação no Ponto de Máxima Potência.

u (m/s)	V_o ótimo (V)	P_o (W)	I_o (A)	ω_g (rpm)	C_p	I_{Linh} (A)	Perdas RI^2 (W)
3	21,0	36,75	1,70	208	0,447	1,57	3,69
4	26,3	86,62	3,30	271	0,458	2,90	12,61
5	31,0	164,3	5,30	333	0,454	4,40	29,04
6	37,3	272,6	7,30	409	0,430	6,40	61,44
7	44,1	413,6	9,30	493	0,448	7,65	87,78
8	47,2	604,1	12,8	554	0,439	10,3	160,68
9	53,0	829,4	15,6	636	0,437	12,5	234,37
10	57,0	1100,1	19,3	708	0,432	15,2	360,37
11	61,5	1414,5	23,0	786	0,432	18,1	494,13
12	66,0	1773,4	26,8	866	0,426	21,0	661,50

TABELA III
Resultados da Simulação para Operação fora do Ponto
de Máxima Potência ($V_{dc1} = 24$ V).

u (m/s)	V_o (V)	P_o (W)	I_o (A)	ω_g (rpm)	C_p	I_{Linh} (A)	Perdas RI^2 (W)
3	24,0	21,6	0,9	271	0,181	0,75	0,84
4	24,0	69,6	2,9	298	0,474	2,4	8,28
5	24,0	149	6,2	325	0,471	4,9	36,75
6	24,0	233	9,7	364	0,479	7,8	91,26
7	24,0	326	13,6	405	0,479	10,8	174,96
8	24,0	437	18,2	450	0,476	14,5	315,37
9	24,0	564	23,5	501	0,479	18,6	518,94
10	24,0	699	29,1	558	0,472	23,2	807,36
11	24,0	852	35,5	624	0,473	28,5	1218,37
12	24,0	1020	42,5	695	0,475	33,4	1673,34

Para validação do modelo apresentado é traçado o gráfico da potência gerada versus velocidade mecânica no eixo do gerador (fig. 9) para valores simulados e experimentais. O resultado experimental foi coletado até uma velocidade mecânica máxima de 366 rpm devido à limitação da máquina que foi usada para excitar o gerador.

Observa-se uma aproximação dos valores da potência de saída simulados e experimentais principalmente depois que a velocidade mecânica ultrapassa os 310 rpm. Logo se validam o modelo e a técnica para um ótimo aproveitamento da energia eólica proposto.

IV. PROJETO DO CONVERSOR

O circuito de potência foi dimensionado de acordo com os parâmetros de projeto mencionados abaixo:

$P_o = 100$ W	(Potência de Saída)
$f_s = 50$ kHz	(Frequência de Chaveamento)
$\Delta I_L = 0,5$ A	(Ondulação de Corrente no Indutor)
$\Delta V_{dc2} = 2$ V	(Ondulação da Tensão de Saída)

Os valores utilizados no circuito de potência foram calculados como em [8] e os semicondutores projetados pelos esforços máximos exigidos pelo circuito.

- $C_{dc1} = 1000$ μ F (1 capacitor de 1000 μ F, 68 V).

- $C_{dc2} = 8,8$ mF (4 capacitores de 2200 μ F, 35 V em paralelo).
- $L = 480$ μ H (Núcleo Thornthon EE-42/21/20, 35 espiras com 9 condutores 25 AWG em paralelo, e entreferro de 0,038 cm).
- Diodos d_8, d_9, d_{10} e d_{boost} : MUR 460 (On semiconductor).
- Diodos $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$: Pontes retificadoras GBPC3510.
- Interruptor S_j : IRFP3710 (On semiconductor).

O circuito de controle em modo corrente média foi projetado como em [8] e [9]. O controle modo corrente é usualmente implementado em fontes chaveadas de potência no intuito de se controlar a corrente média do indutor. Um controlador PI com filtro para comparar o valor de corrente no indutor com a referência de corrente gerada pelo microcontrolador é projetado. O diagrama de blocos do sistema de controle implementado é mostrado na figura 6.

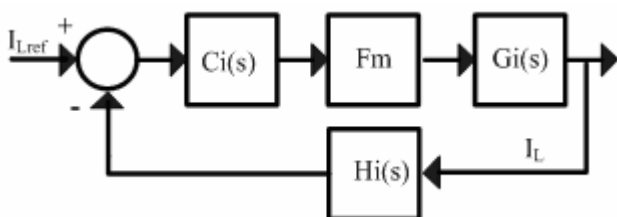


Fig. 6. Diagrama de blocos do controle em modo corrente média.

Os diagramas de bode da função de transferência em malha aberta, $FTMA(s)$ (sem considerar o compensador) e do compensador projetado, $Ci(s)$ são mostrados na figura 7.

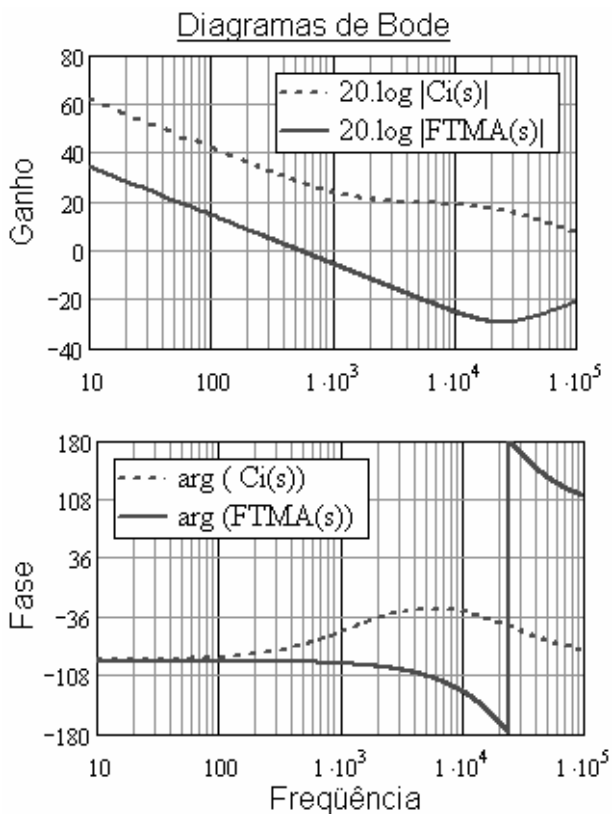


Fig. 7. Diagramas de bode ($FTMA(s)$, $Ci(s)$).

O compensador foi projetado no intuito de se obter uma função de transferência de laço aberto com alto ganho em baixas frequências, frequência de corte de 6 kHz, inclinação de -20 dB/década no cruzamento e margem de fase de 32°. Como os diagramas são funções logarítmicas e a $FTLA(s)$ é o produto de $FTMA(s)$ e $Ci(s)$, o bode do sistema compensado será a soma de dos dois diagramas mostrados na figura 7. O diagrama de blocos do sistema compensado é mostrado na figura 8.

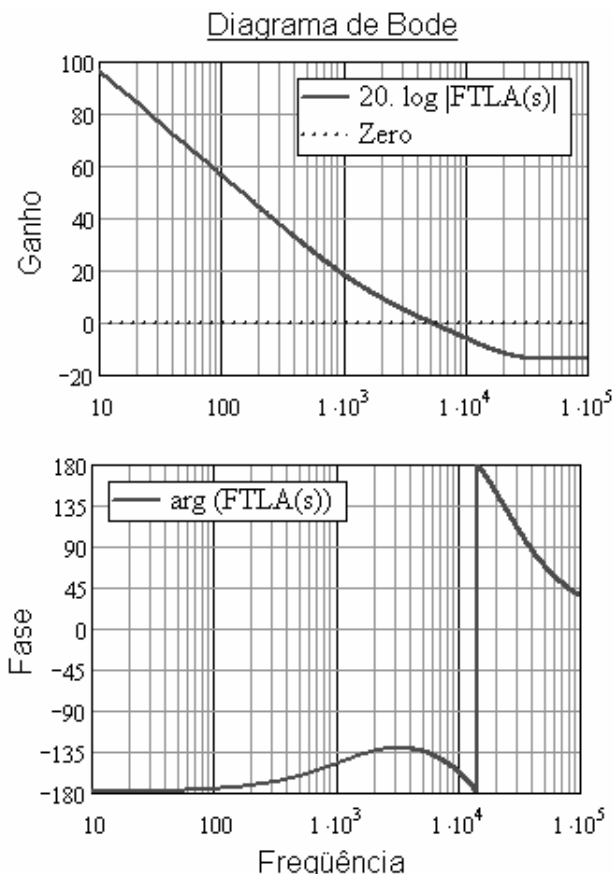


Fig. 8. Diagramas de bode ($FTLA(s)$).

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais foram coletados até uma velocidade mecânica de 366 rpm. O conversor passa a ficar inoperante quando a tensão V_{dc1} atinge os 24 volts (270 rpm de velocidade mecânica), logo a corrente passa a ser drenada para as baterias através do retificador. A tabela IV mostra as aquisições feitas para faixa de operação em baixas velocidades.

TABELA IV
Resultados Experimentais para Operação em Baixas Velocidades.

ω_g (rpm)	V_{Linha} (V)	I_{Linha} (A)	P_{in} (W)	V_{dc2} (V)	I_{dc2} (A)	I_L (A)	V_{dc1} (V)
135	10,89	0,31	6	24,5	0,15	0,3	12
165	12,50	0,72	13	24,5	0,35	0,85	15
197	14,50	1,30	26	24,7	0,90	1,5	17
223	16,38	1,95	48,6	24,9	1,45	2,27	19,5
243	17,50	2,23	60	25,0	1,95	2,71	21
270	18,70	3,13	89	25,3	2,9	3,9	23

Pela tabela apresentada observa-se a extração de potência em baixas velocidades, o que não ocorre quando se conecta o retificador diretamente às baterias. As figuras 9 e 10 mostram os gráficos da potência de saída versus velocidade mecânica e rendimento versus potência de saída, respectivamente. Uma pequena queda na potência de saída e no rendimento é observada no instante da comutação do conversor ao retificado, porém a queda de potência é mais acentuada na simulação.

Na figura 10 observa-se que o rendimento do conversor aumenta consideravelmente quando este opera com uma potência de saída acima dos 9 watts.

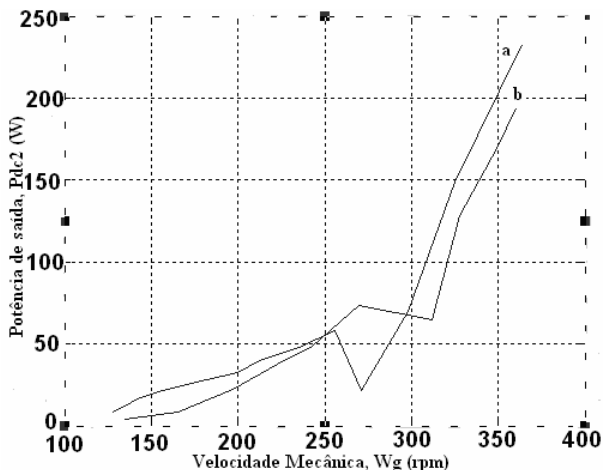


Fig. 9. Gráfico da potência de saída versus velocidade mecânica (a - simulado, b - experimental).

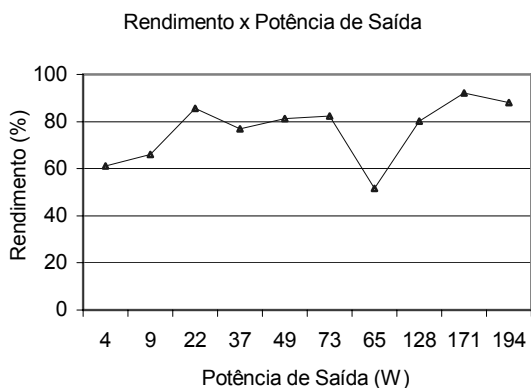


Fig. 10. Gráfico do Rendimento Versus Potência de Saída.

As figuras 11, 12 e 13 mostram algumas aquisições feitas para uma velocidade mecânica de 182 rpm. Na figura 11 observa-se o comportamento da corrente de linha e tensão fase-neutro gerada. A tensão tem um valor rms de aproximadamente 8,5 V e a corrente 1,25 A o que determina uma potência aparente de 31,87 VA e útil de 25,5 W, logo a máquina opera a um fator de potência de 0,8. Observa-se também a presença de ruído nas formas de onda da tensão das figuras 11 e 12, devido ao chaveamento do conversor boost.

A figura 12 apresenta a tensão de entrada do conversor, V_{dc1} e corrente no indutor I_L . A tensão média V_{dc1} atinge aproximadamente 14 V enquanto que a corrente I_L 1,25 A.

A corrente nas baterias tem comportamento mostrado na figura 13 e seu valor médio é de 0,8 A, determinando uma potência de saída de 20 W. Para esta situação o rendimento do sistema fica próximo dos 78,5%.

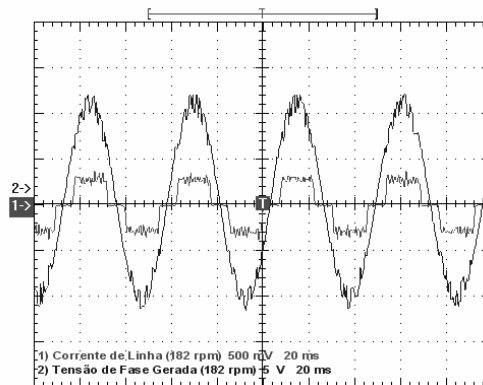


Fig. 11. Tensão de fase e corrente de linha para $\omega_g=182$ rpm (2,5A/div, 5V/div, 20ms/div).

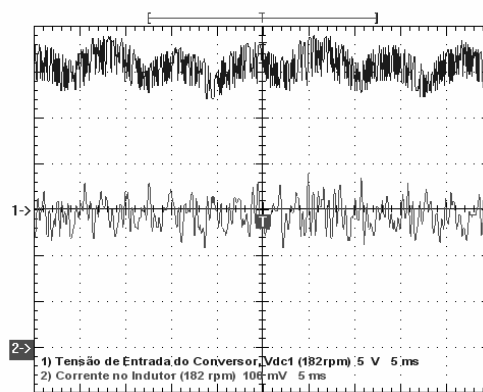


Fig. 12. Tensão de entrada do conversor, V_{dc1} e corrente no indutor, I_L para $\omega_g=182$ rpm (0,5A/div, 5V/div, 5ms/div).

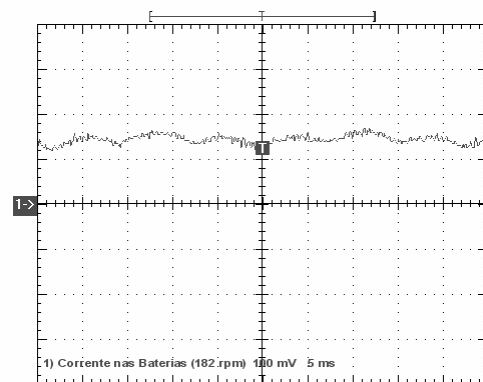


Fig. 13. Corrente nas Baterias, I_{dc2} para $\omega_g=182$ rpm (0,5A/div, 5V/div, 5ms/div).

VI. CONCLUSÕES

Uma nova topologia empregada em sistemas eólicos para carregamento de baterias foi proposta. A principal proposta desta topologia é o aproveitamento da energia gerada em baixas velocidades. Uma simulação do sistema completo também foi implementada e discutida, observando-se a existência de um ponto de otimização do funcionamento do sistema para cada velocidade do vento. O sistema opera no ponto ótimo em baixas velocidades, pois a corrente de referência ótima I_{Lref} é gerada pelo microcontrolador e implementada no controle em modo corrente média para o conversor *boost*.

A validação do modelo de simulação se deu pela comparação entre os resultados simulados e experimentais (fig.6). A comprovação da extração de potência útil mesmo a baixas velocidades foi apresentada através dos resultados experimentais. Logo a topologia proposta pode ser considerada mais atraente do que a apresentada pelo fabricante ENERSUD, pois além da extração de potência em baixas velocidades existe a possibilidade da implementação de processos paralelos de proteção das baterias como limitação da corrente de carga e implementação de algoritmos que seguem os métodos de carga existentes.

AGRADECIMENTOS

A todo povo cearense que através da FUNCAP possibilita o desenvolvimento tecnológico do estado. A FINEP pelo incentivo financeiro. A ENERSUD pelo apoio técnico e doação de aerogeradores. A todos os membros componentes do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC).

REFERÊNCIAS

- [1] M. Tomohiko S; S. Masayuki; S. Yoji. "Optimum Control of IPMSG for Wind Generation System", in *PCC-Osaka 2002*, Department of Electrical and Electronic Systems Osaka Prefecture University, pp. 1435 – 1440.
- [2] H. Siegfried. "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Kassel University. Copyright 1998 by John Wiley Ltd. pp. 29 – 40.
- [3] www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/windturbine. Acesso em 20 de set. 2006, 16:30.
- [4] E. Spooner; B. J. Chalmers. "TORUS: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator", *IEE Proceedings-B*, Vol. 139, NO. 6, November 1992.
- [5] B.J. Chalmers; A.M. Green; A.B.J. Reece; A.H. Al-Badi. "Modelling and Simulation of the Torus Generator", *IEE Proc.-Eletr. Power Appl.*, Vol. 144, Nº6, November 1997.
- [6] A.H. Al-Badi; A. Gastli, "MATLAB and PSPICE Dynamic Model of Axial-Field Permanent-Magnet", in *SQU Journal for Scientific Research – Science and Technology*, 2002, Volume 7, part 1, pp. 109-121, 2002.
- [7] I. Barbi, "Teoria Fundamental do motor de Indução", Edição do autor, 2000.

- [8] E. Robert W; M. Dragan. "Fundamentals of Power Eletronics", University of Colorado, Second Ediction Publisher: Springer Science+Business Media Inc-1997.
- [9] D. Lloyd. "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies", in *Proc. Unitrode Power Supply Design Sem.*, 1988, pp. 5.1–5.14.
- [10] www.enersud.com.br, Acesso em 20 de set. 2006, 16:30.

BIOGRAFIAS

Isaac R. Machado nasceu em Parnaíba – PI em 1982 e recebeu o título de engenheiro eletricista pela Universidade Federal do Ceará (UFC), Brasil, em 2004. Atualmente é aluno de pós-graduação em engenharia elétrica também pela UFC e pesquisador do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC). Dentre as áreas de interesse destacam-se: eletrônica de potência e processamento de energia aplicado a fontes alternativas de energia, controle de processos e automação industrial.

Demercil S. Oliveira Jr. nasceu em Santos, São Paulo, Brasil, em 1974. Obteve sua graduação e o título de mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, em 1999 e 2001, respectivamente, e o título de doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, em 2004. Atualmente é professor adjunto e pesquisador do Grupo de Processamento de Energia e Controle da Universidade Federal do Ceará. Suas áreas de interesse abrangem conversão cc/cc, comutação suave e aplicações de eletrônica de potência em sistemas de energia renovável.

Luiz H. S. C. Barreto nasceu em Naviraí, Mato Grosso do Sul, Brasil, em 1974. Obteve sua graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso, em 1997 e os títulos de mestre e doutor pela Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, em 1999 e 2002. Atualmente é professor adjunto e pesquisador do Grupo de Processamento de Energia e Controle da Universidade Federal do Ceará. Suas áreas de interesse abrangem conversão CC/CC, comutação suave e aplicações de eletrônica de potência em sistemas de energia renovável.

Mônica Magalhães Reis nasceu em Fortaleza, Ceará, em 1982. Obteve sua graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Ceará, em 2005. Atualmente aluna de mestrado em engenharia elétrica na Universidade Federal do Ceará. Suas áreas de interesse abrangem eletrônica de potência, controle de processos e fontes alternativas de energia.

Herminio M. de O. Filho nasceu em Taguatinga, Distrito Federal em 1983. Atualmente é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e bolsista de iniciação científica do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC). Áreas de interesse: eletrônica de potência, sistemas de controle, automação industrial e fontes alternativas de energia.

Rafael Oliveira de Sousa nasceu em Brasília, Distrito Federal, em 1983. Atualmente é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (UFC) e bolsista de iniciação científica do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC). Áreas de interesse: automação industrial, eletrônica de potência, robótica, controle de processos e fontes renováveis de energia.