

# PROJETO E IMPLANTAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO EÓLIO-ELÉTRICA OPERANDO EM BAIXA VELOCIDADE

Sérgio Daher, Fernando L. M. Antunes, Ruth P. Saraiva Leão e René P. T. Bascopé  
GPEC-DEE

Universidade Federal do Ceará – C.P.6001  
CEP 60455-769, Fortaleza – CE, Brasil

e-mail: sdaher@secrel.com.br; fantunes@dee.ufc.br; rleao@dee.ufc.br; rene@dee.ufc.br

**Resumo** - Este artigo propõe um sistema autônomo de conversão eólico-elétrica operando em baixa velocidade, tendo como gerador elétrico uma máquina de indução trifásica comercial com rotor em gaiola de esquilo. O gerador é excitado através de um inversor trifásico alimentado por um banco de baterias. Mostra-se que a máquina de indução, apesar de ser projetada para operar como motor com velocidades em torno de 1800 rpm, pode operar com velocidades em torno de 300 rpm e rendimento de até 60%. A operação em baixa velocidade e com frequência variável proporciona uma conexão direta entre o rotor eólico e o gerador de indução sem a necessidade de caixa de engrenagens, fato este que reduz os custos de instalação e de manutenção e aumenta o rendimento do conjunto. O sistema foi projetado e um protótipo de laboratório implementado. Resultados experimentais são mostrados para validar a proposta aqui apresentada.

**Palavras-Chave** – Geração eólico-elétrica, gerador de indução e inversores.

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A WIND ENERGY POWER SYSTEM OPERATING AT LOW SPEED.

**Abstract** – This paper proposes an off-grid low speed wind energy conversion system having a commercial squirrel cage three-phase induction machine operating as a generator, and excited by a static inverter fed by a battery bank. The paper shows that although the induction machine has been designed to run at speeds around 1800 rpm, it can operate at speeds around 300 rpm with efficiency up to 60%. The operation with low and variable speed allowed the connection between the wind rotor and the induction generator without gearbox, leading to lower installation and maintenance costs and also a higher efficiency. The complete system has been designed and a laboratory prototype has been built. Experimental results are shown to access the performance of the proposed system.

**Keywords** - Induction generator, wind power generation and inverters.

---

Artigo submetido em 11 de novembro de 2005. Revisado em 9 de março de 2006. Aceito sob recomendação do Editor José Antenor Pomílio.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas baseados em fontes de energias renováveis têm-se apresentado economicamente competitivos a eletrificação de áreas isoladas, devido ao fato das cargas rurais serem de pequena demanda [1]. Em geral, para pequenas vilas situadas a uma distância superior a 3 km da rede de distribuição, o uso de um aerogerador é mais viável que os investimentos em linhas de distribuição [2].

O custo de um aerogerador é ainda mais baixo que o de um painel solar de potência equivalente. Além disso, o custo por kW de um aerogerador decresce com o aumento da potência enquanto que o custo por kW de um sistema fotovoltaico mantém-se, praticamente, constante com o aumento da potência. Um sistema fotovoltaico de potência variando entre 30 W e 50 W tem custo aproximado entre US\$ 500,00 e US\$ 700,00. Se considerarmos o aumento de custo de um sistema fotovoltaico proporcional à potência, o custo de um sistema de 500 W será de US\$ 3.500,00. O aerogerador comercial produzido por empresa brasileira, tem preço anunciado de R\$ 3.500,00. Neste caso, o sistema fotovoltaico apresenta custo de aproximadamente 2,5 vezes o custo de um sistema eólico equivalente. Outro fabricante de aerogeradores, a Bergey, afirma que o seu aerogerador BWC 1500-PD utilizado para bombeamento de água é duas ou três vezes mais barato que um sistema à energia solar equivalente. Dessa forma, a experiência desses fabricantes mostra que os pequenos aerogeradores têm potencial de aplicação e são mais baratos, em termos de custo inicial, que os sistemas à energia solar.

Neste trabalho é proposto um sistema de conversão eólico-elétrica composto de uma máquina de indução trifásica comercial do tipo gaiola de esquilo, operando como gerador de energia elétrica (GIT) e um inversor trifásico para promover a excitação do GIT a partir de um banco de baterias. Mostra-se que o GIT, mesmo sendo projetado para velocidade nominal em torno de 1800 rpm, é capaz de operar em velocidades baixas, da ordem de 300 rpm, com rendimento em torno de 60%. Isto tornou possível a utilização de acoplamento direto entre o rotor eólico e o gerador, evitando-se assim o uso de caixa de engrenagem. São apresentados os projetos de dimensionamento das pás do rotor eólico, do gerador elétrico e do inversor trifásico para excitação do gerador. São apresentados também resultados de simulação e de laboratório mostrando que o sistema proposto funciona com bom desempenho.

## II. ENERGIA DO VENTO

A energia do vento consiste na energia cinética da massa de ar em movimento. Considerando-se que o vento apresenta direção fixa e velocidade constante, pode-se desenvolver uma expressão para a potência disponível no vento relacionada a uma determinada área de captação. Seja um cilindro fictício como mostrado na Figura 1.

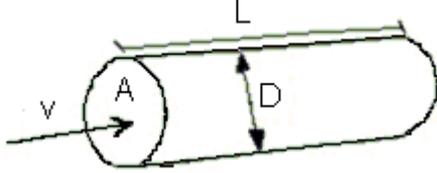


Fig. 1. Cilindro fictício de uma massa de ar.

A massa de ar contida no cilindro é igual ao produto de seu volume pela densidade do ar.

$$m = \rho \cdot \text{Vol} = \rho \cdot A \cdot L \quad [\text{kg}] \quad (1)$$

Onde:

- m - Massa de ar.
- $\rho$  - Densidade do ar.
- $V_{\text{ol}}$  - Volume do cilindro.
- A - Área transversal do cilindro.
- L - Comprimento do cilindro.

A energia cinética da massa m em deslocamento é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \rho A L v^2 \quad [\text{J}] \quad (2)$$

Onde:

- $E_c$  - Energia cinética da massa de ar.
- v - Velocidade do vento.

Considerando-se um intervalo de tempo t e a velocidade v do vento constante, a potência média  $P_v$  associada a essa massa de ar em deslocamento é dada pela Equação 3.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Para uma densidade do ar igual a  $1,25 \text{ kg/m}^3$  e a área do círculo igual a  $\pi R^2$  tem-se  $P_v$  re-escrito como:

$$P_v = 1,806 R^2 v^3 \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Observando-se a Equação 4, conclui-se que a potência disponível no vento é proporcional ao quadrado do raio R do rotor eólico e ao cubo da velocidade do vento. O termo “rotor eólico” é aqui utilizado para denominar a parte do aerogerador que realiza a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica.

O processo de conversão da energia cinética do vento em energia mecânica no rotor de uma turbina eólica pode ser ilustrado através da Figura 2.

A energia cinética da massa de ar m, com velocidade  $v_1$ , que segue em direção ao rotor é dada pela Equação 5.

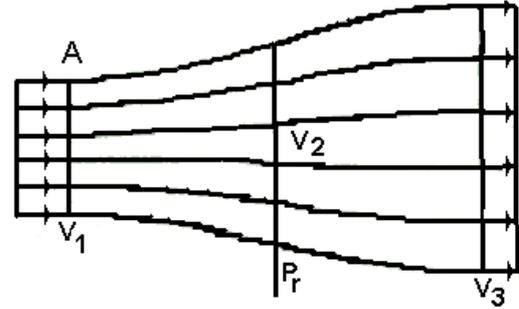


Fig. 2. Esquema de conversão da energia cinética do vento em energia mecânica.

$$E_{c,1} = \frac{1}{2} m v_1^2 \quad [\text{J}] \quad (5)$$

Ao passar pelo rotor eólico, a velocidade do vento é reduzida de  $v_1$  para  $v_3$ , e a energia associada ao vento à jusante do rotor eólico é dada pela Equação 6.

$$E_{c,3} = \frac{1}{2} m v_3^2 \quad [\text{J}] \quad (6)$$

Quando  $v_1$  é igual a  $v_3$ , não há alteração na energia cinética do vento e  $E_{c,1}$  é igual a  $E_{c,3}$ . Se  $v_1$  é diferente de  $v_3$ , parte da energia cinética do vento é convertida pelo rotor. A energia que é absorvida pelo rotor é igual à diferença entre  $E_{c,1}$  e  $E_{c,3}$ , e expressa como  $E_r$ .

$$E_r = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad [\text{J}] \quad (7)$$

Assumindo que as velocidades do vento à jusante e à montante do rotor eólico são constantes, a potência absorvida pelo rotor é obtida derivando-se  $E_r$  em relação ao tempo.

$$P_r = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_3^2) \frac{d}{dt} m \quad [\text{W}] \quad (8)$$

A derivada em relação ao tempo da massa de ar que passa pelo rotor é dada por:

$$\frac{d}{dt} m = \frac{d}{dt} \rho \text{Vol} = \rho \frac{d}{dt} \text{Vol} = \rho A v_2 \quad [\text{kg/s}] \quad (9)$$

Onde:

$v_2$  - Média aritmética da velocidade  $v_1$  à jusante e  $v_3$  à montante [3].

Substituindo-se (9) em (8), determina-se a potência absorvida pelo rotor em função das velocidades à montante e à jusante, da área interceptada e da densidade do ar.

$$P_r = \frac{1}{4} \rho A [(v_1^3 - v_3^3) + v_1 \cdot v_3 (v_1 - v_3)] \quad (10)$$

A característica de conversão de um rotor eólico depende do seu tipo, número de pás, perfil aerodinâmico e tamanho do raio. Na situação em que o rotor está parado na presença de vento – rotor bloqueado ou alinhado na direção do vento –

a potência produzida é zero. Em outra situação extrema, o rotor eólico gira a uma velocidade tal que o vento não impõe torque mecânico útil ao rotor eólico - neste caso diz-se que o rotor está rodando livre. Existe então a situação em que o rotor eólico gira a uma velocidade maior que zero e menor que a velocidade de rotor livre. Dentro desses limites haverá potência útil disponível no eixo do rotor que pode ser convertida em energia elétrica por um gerador que esteja a ele acoplado. Entre estes dois extremos observa-se que, dada uma velocidade de vento, existe uma velocidade do rotor eólico que maximiza a potência produzida. Ou seja, para cada velocidade de vento a qual o rotor é submetido, existe uma velocidade de operação do rotor que maximiza a potência gerada.

Define-se como coeficiente de potência,  $C_p$ , a razão entre a potência mecânica convertida pelo rotor eólico e a potência disponível no vento. Partindo-se de (3) e (10) obtém-se:

$$C_p = \frac{P_r}{P_v} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \quad (11)$$

Observe que quando  $v_3/v_1=1$ , ou seja, quando  $v_1$  não é alterada, nenhuma energia é absorvida pelo rotor. À medida que o rotor passa a absorver a energia cinética do vento, a velocidade  $v_3$  passa a ser menor que  $v_1$  e  $C_p > 0$ , indicando que foi entregue energia ao rotor. Nota-se que  $C_p$  apresenta um ponto de valor máximo; este ponto acontece para  $v_3/v_1=1/3$ . Para  $v_3/v_1=1/3$ ,  $C_p$  é igual a 0,593, que corresponde ao máximo rendimento que pode ser obtido por um rotor ideal, sendo por isso chamado de coeficiente de potência ideal.

A situação em que  $v_3=0$ , tem-se  $C_p=0,5$ , indicando que metade da potência eólica é convertida pelo rotor e a outra metade é dissipada. Para  $0 < v_3 < v_1$ , parte da energia cinética do vento é convertida pelo rotor, parte é dissipada e outra parte continua em forma de energia cinética no vento que segue.

É importante observar que o valor de  $C_p$  dado pela equação (11) é resultado de um cálculo teórico para um rotor ideal. Na prática, o valor de  $C_p$  e o seu comportamento em função de  $v_3/v_1$  variam de acordo com o tipo e perfil aerodinâmico do rotor.

Em geral, o coeficiente de potência  $C_p$  é obtido em função da relação de velocidade linear da extremidade ou ponta do rotor eólico pela velocidade do vento. O coeficiente da velocidade de ponta,  $\lambda$ , é definido pela Equação 12 [3].

$$\lambda = \frac{\text{Velocidade linear da ponta do rotor}}{\text{Velocidade do vento livre}} = \frac{\omega_r \cdot R}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot R}{v} \quad (12)$$

Onde:

- $\omega_r$  - Velocidade angular do rotor eólico.
- $f_r$  - Frequência de rotação do rotor eólico.

Assim, o comportamento de um rotor eólico é fornecido em forma de um gráfico que relaciona os coeficientes  $C_p$  e  $\lambda$  como mostra a Figura 3.

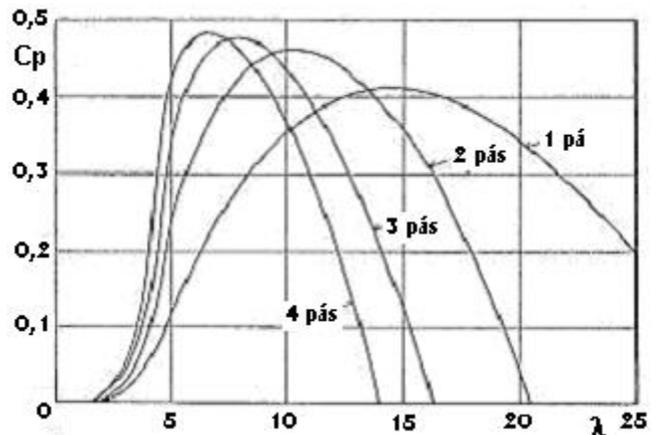


Fig. 3. Característica  $C_p$  x  $\lambda$  para rotores de 1, 2, 3 e 4 pás.

### III. O SISTEMA PROPOSTO

O sistema aqui proposto deverá atender às necessidades de consumo de uma residência rural, em localidades onde a velocidade média do vento é de 6 m/s, com capacidade de fornecimento contínuo de energia elétrica e baixa manutenção. Tendo em vista as especificações mencionadas, o diagrama em blocos do sistema desenvolvido é mostrado na Figura 4.

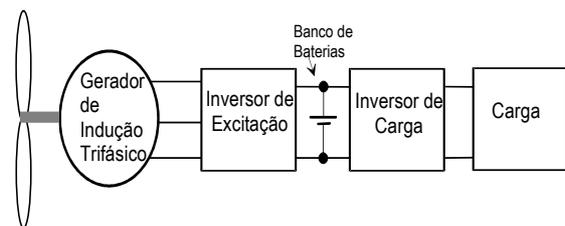


Fig. 4. Diagrama em blocos das principais partes do sistema de geração eólico-elétrico.

A Tabela 1 mostra as cargas, potência e consumo estimados para uma residência rural padrão. O consumo diário é obtido multiplicando-se a potência pela quantidade e pelo tempo de uso.

**TABELA 1**  
**Cargas e Consumo Estimado de uma Residência Rural Simples**

Carga	Potência (W)	Quantidade	Tempo de uso (horas)	Consumo diário (kWh)
Lâmpada fluorescente	15	7	5	0,53
Geladeira	100	1	24	2,40
Televisor	80	1	5	0,40
Rádio	20	1	12	0,24
Bomba D'água	500	1	5	2,50
FORAGEIRA	500	1	2	1,00
<b>CONSUMO DIÁRIO TOTAL ⇒ 7,07 kWh</b>				

A potência contínua que o sistema deve ser capaz de fornecer é função da carga que se quer alimentar. O dimensionamento do gerador será feito com base no consumo estimado de uma pequena residência. A potência média que o sistema deve ser capaz de fornecer continuamente é dada por:

$$P_{med} = \frac{\text{Consumo diário total}}{24h} = \frac{7,07 \text{ kWh}}{24h} = 295 \text{ W} \approx 300 \text{ W} \quad (13)$$

Considerando a potência média de 300 W serão dimensionados os seguintes componentes do sistema de conversão eólico-elétrica: raio das pás do rotor eólico, gerador de indução, inversor do gerador e banco de baterias.

#### A. Dimensionamento do Rotor Eólico

O rotor é dimensionado a partir dos dados da velocidade do vento e da potência mecânica que deve estar disponível no eixo do gerador. O cálculo da potência a ser captada do vento depende do rendimento total do sistema, pois a potência convertida pelo rotor deve ser suficiente para compensar todas as perdas do sistema e suprir a potência média da carga.

Considerou-se que as perdas mecânicas por atrito estão embutidas no rendimento do rotor (devido ao acoplamento direto, as perdas mecânicas são reduzidas). Também foi assumido que toda a energia gerada é armazenada no banco de baterias (na prática, ocorre que parte da energia gerada alimenta diretamente a carga). Sendo assim, a potência do vento necessária para atender a carga é calculada pela Equação 17 e os valores estimados dos parâmetros de rendimento da Equação 17 apresentados na Tabela 2 [3].

$$P_v = \frac{P_{med}}{C_p \cdot \eta_g \cdot \eta_{ig} \cdot \eta_b \cdot \eta_{ic}} \quad [W] \quad (14)$$

Aplicando-se os valores dados na Tabela 2 na Equação 14, obtém-se:

$$P_v = \frac{300}{0,40 \cdot 0,60 \cdot 0,90 \cdot 0,80 \cdot 0,90} = \frac{300}{0,156} \approx 1930 \quad [W] \quad (15)$$

**TABELA 2**  
**Rendimentos do Sistema**

Parâmetro	Valor
$P_{med}$ : Potência média da carga	300 W
$C_p$ : Coeficiente de Potência	0,40
$\eta_g$ : rendimento do gerador.	0,60
$\eta_{ig}$ : rendimento do inversor do gerador.	0,90
$\eta_b$ : rendimento do banco de baterias.	0,80
$\eta_{ic}$ : rendimento do inversor das cargas.	0,90

Observa-se na Equação 15 que o rendimento total do sistema está em torno de 15%. Dessa forma, para se obter 300W disponíveis para a carga, o rotor deve ter uma área de captação que compreenda uma potência eólica de 1930 W para a velocidade média do vento de 6 m/s.

A partir da Equação 3 tem-se que o raio do rotor eólico para os valores numéricos de  $P_v=1930 \text{ W}$  e  $v=6 \text{ m/s}$  é igual a  $R=2,20 \text{ m}$ .

O acoplamento do rotor eólico ao eixo do gerador sem a presença de redutores ou multiplicadores de velocidade implica numa operação do gerador à baixa velocidade. Considerando-se como 300 rpm a velocidade nominal do gerador, o rotor eólico deve ser dimensionado de forma a

apresentar essa rotação na condição de velocidade de vento nominal (6 m/s).

Utilizando-se a Equação 12, para  $R=2,22 \text{ m}$  e variando-se os valores de  $\lambda$  e  $v$ , obtém-se a Tabela 3.

**TABELA 3**  
**Velocidade do Eixo do Rotor (rpm) em Função da Velocidade do Vento e de  $\lambda$  para  $R=2,22 \text{ m}$**

$\lambda$	v(m/s)						
	3	4	5	6	7	8	9
7	90	120	151	181	211	241	271
8	103	138	172	206	241	275	310
9	116	155	194	232	271	310	348
10	129	172	215	258	301	344	387
11	142	189	237	284	331	379	426
12	155	206	258	310	361	413	465
13	168	224	280	336	391	447	503
14	181	241	301	361	422	482	542
15	194	258	323	387	452	516	581

Observando-se na Tabela 3 a coluna referente à velocidade do vento de 6m/s conclui-se que, para se obter a rotação desejada de 300 rpm, o rotor deve operar com  $\lambda$  entre 11 e 12. O valor exato de  $\lambda$  pode ser calculado a partir da Equação 12, sendo  $\lambda$  igual a 11,62. Assumiu-se  $C_p = 0,40$  conforme Tabela 2. Conclui-se então que o rotor deverá ser capaz de operar com  $C_p$  maior ou igual a 0,40 para  $\lambda$  igual a 11,62. De acordo com a Figura 3, o rotor que mais se adequa a estes valores de  $C_p$  e  $\lambda$  é o rotor de 2 pás, pois para  $\lambda=11,62$  pode-se obter um valor de  $C_p$  maior que 0,40 [9].

A Figura 5 mostra os gráficos da potência convertida pelo rotor dimensionado em função da velocidade do rotor (para  $v=3 \text{ m/s}$ ,  $6 \text{ m/s}$  e  $8 \text{ m/s}$ ), que foram obtidos utilizando-se a Equação 16. O traço mais largo é a curva de potência obtida operando-se o rotor no ponto de máximo rendimento, ou seja, com  $C_p = C_{pmax} = 0,40$ .

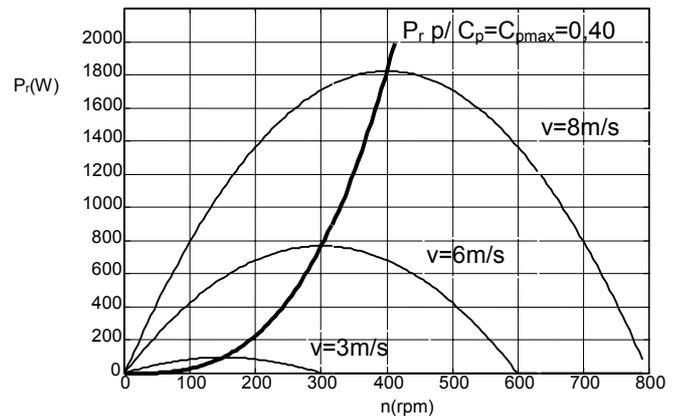


Fig. 5. Característica de conversão do rotor dimensionado em função da velocidade de rotação: Curva característica para  $v=3 \text{ m/s}$ ,  $6 \text{ m/s}$  e  $8 \text{ m/s}$  e Curva da potência mecânica para  $C_p=C_{pmax}=0,40$ .

$$P_r = 1,806R^2 v^3 C_{pmax} \frac{\frac{n\pi R}{30v} \left( 2\lambda_{max} - \frac{n\pi R}{30v} \right)}{\lambda_{max}^2} \quad [W] \quad (16)$$

#### B. Dimensionamento do Gerador Elétrico

O gerador elétrico é a máquina que realiza a conversão de

energia mecânica em energia elétrica. Os geradores utilizados em sistemas eólicos são do tipo síncrono e assíncrono. O gerador de indução trifásico (GIT) tipo gaiola de esquilo destaca-se por suas características de construção simples, manutenção baixa e robustez [5].

Uma máquina de indução trifásica (MIT) funciona como gerador quando o seu eixo é movido por uma máquina primária à velocidade maior que a velocidade síncrona (escorregamento negativo). Devido às características construtivas e princípio de operação, o GIT necessita de uma fonte para a excitação. Essa excitação é normalmente provida pelo sistema de distribuição da concessionária, ou por um banco de capacitores ou por uma fonte cc através de um inversor [3]. No caso do uso do GIT em sistema isolado, apenas as duas últimas opções podem ser utilizadas. A Figura 6 mostra diferentes configurações para operação isolada do GIT.

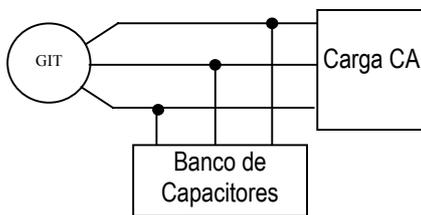


Fig. 6. (a) Carga conectada diretamente ao gerador excitado por banco de capacitores.

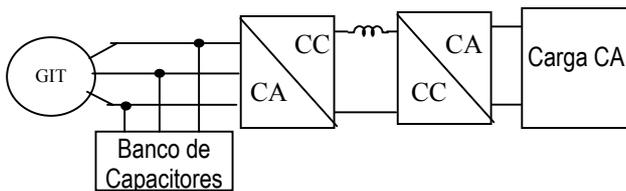


Fig. 6(b). Geração em velocidade variável com gerador excitado por banco de capacitores.

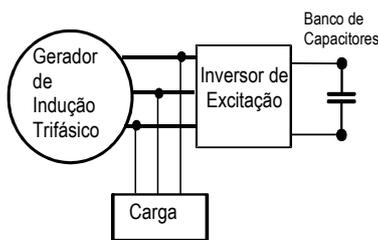


Fig. 6(c). Gerador com excitação por VSI a capacitor.

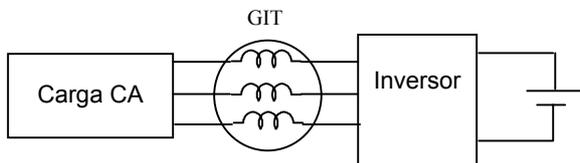


Fig. 6(d). Gerador com compensação série.

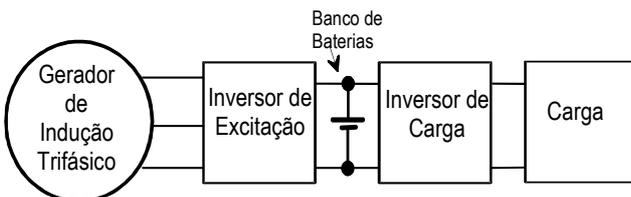


Fig. 6(e). Gerador eletronicamente desacoplado da carga.

A configuração mais tradicional e simples é mostrada na Figura 6 (a), onde um banco de capacitores é utilizado para promover a auto-excitação e a carga CA é conectada diretamente aos terminais do gerador [4, 6, 7, 8]. Neste tipo de configuração, a variação da tensão e a frequência nos terminais do GIT dependem da velocidade de rotação, da capacitância de excitação e também da carga conectada. Além disso, o valor da capacitância aumenta muito quando se diminui a frequência, tornando esse tipo de configuração impraticável para operação em velocidades baixas [9, 10].

O diagrama apresentado na Figura 6 (b) sugere a utilização de um elo CC de forma a obter tensão e frequência estáveis na carga para operação do GIT em velocidade variável [11]. Neste caso, a faixa de velocidade de operação ainda é limitada devido ao uso de capacitores para excitação do gerador.

O desenvolvimento da eletrônica de potência abriu caminho para utilização dos conversores CC-CA como excitadores estáticos na operação dos GIT. As Figuras 6 (c), (d) e (e) apresentam três possíveis configurações. Na Figura 6(c) pode-se ver uma configuração em que o banco de capacitores é substituído por um inversor estático com um capacitor acoplado à entrada [12]. Neste caso, após ser estabelecido o processo de auto-excitação, a tensão no capacitor aumentará até ser atingido um valor de equilíbrio que dependerá do ponto de operação do GIT e do tipo de controle utilizado no inversor. Este tipo de configuração permite a operação do GIT em uma ampla faixa de velocidades. No entanto, devido à carga estar conectada aos terminais do gerador, a faixa de velocidade de operação estará sujeita à faixa de operação estabelecida pela carga.

A Figura 6(d) é chamada de configuração de compensação série devido ao fato do gerador estar situado entre a fonte de excitação e a carga, comportando-se como um elemento em série [11]. Neste caso, o banco de baterias serve para fornecer a excitação inicial e também como elemento de armazenamento da energia gerada que não é consumida pela carga. Nesta configuração, a faixa de velocidade de operação também está sujeita aos limites impostos pela carga.

A Figura 6(e) mostra um tipo de configuração que é propícia à operação do GIT em uma ampla faixa de velocidades [9]. Devido à inserção de um banco de baterias entre o GIT e a carga, pode-se suprir a carga com frequência e tensão estáveis sem aplicar nenhuma restrição à velocidade de operação do gerador. O banco de baterias serve como elemento armazenador de energia, e também garante o suprimento da carga em horários em que pouca ou nenhuma energia é gerada. Além disso, o controle do ponto de operação do GIT não depende da carga. Esta é a configuração que foi escolhida, pois possibilita a operação do GIT em uma ampla faixa de velocidades e permite armazenar energia gerada em excesso.

Considerando-se uma máquina de indução operando com controle tensão/frequência (V/f) constante, tem-se que a potência máxima convertida, mantendo-se a corrente nominal, é aproximadamente proporcional à frequência de alimentação [5]. Isto acontece porque no controle V/f a tensão de alimentação é reduzida na mesma proporção que a frequência enquanto a corrente máxima permitida permanece igual à corrente nominal, resultando que o produto (tensão x

corrente máxima) seja proporcional à frequência de alimentação. Por exemplo, se uma máquina de indução apresenta potência nominal de 3 kW à frequência nominal de 60 Hz, estima-se que à frequência de 10 Hz (um sexto da frequência nominal) esta mesma máquina converta apenas 500 W (um sexto da potência nominal). É ainda importante observar que este cálculo não é dotado de rigor matemático e leva apenas a uma primeira aproximação do ponto de operação “nominal” em velocidade reduzida. A rigor, o fator de potência, a não linearidade do circuito magnético, o aquecimento, e ainda outros fatores variam com a frequência de alimentação, influenciando na operação em velocidades reduzidas.

No caso da operação da máquina de indução como gerador, tem-se que a velocidade síncrona da máquina deve ser menor que a velocidade do rotor para garantir um escorregamento negativo. Dessa forma, considerando-se um escorregamento da ordem de -0,1 (de acordo com testes preliminares, este é o valor típico para operação à velocidade rotórica de 300 rpm) tem-se que a velocidade síncrona da máquina deve ser igual a 273 rpm ( $300/1,1$ ) [3]. Considerando-se que a máquina de indução opera com velocidade em torno de 300 rpm e potência convertida de 772 W, chega-se à Tabela 4. A potência estimada é calculada multiplicando-se a razão  $n_N/273$  por 772 W.

TABELA 4

Máquinas de Indução Comerciais Adequadas para Operar à Velocidade de 300 rpm e Potência de 772 W.

Nº de pólos	Velocidade síncrona nominal $n_N$ (rpm) $f_1 = 60$ Hz	Razão $n_N/273$	Potência (W) estimada para $n=300$ rpm	Motor comercial mais aproximado	
				cv	kW
2	3600	13,19	10183	15	11
4	1800	6,59	5087	7,5	5,5
6	1200	4,40	3397	5	3,7
8	900	3,30	2548	4	3,0

Pode-se notar que a potência nominal varia com o número de pólos, sendo que quanto menor o número de pólos maior a potência nominal da máquina. Considerando-se estes fatores, pode-se afirmar que a máquina que melhor se adequa ao conjunto de especificações citadas é a máquina de 7,5 cv e 4 pólos. Esta máquina foi modelada, e os resultados para operação em baixa velocidade são mostrados a seguir [3].

A Figura 7 mostra as curvas do rendimento em função do escorregamento para diferentes valores de velocidade do rotor. Pode-se observar que o rendimento da máquina varia com o escorregamento e com a velocidade do rotor. Pode-se ver que, para cada velocidade do rotor, existe um valor de escorregamento que maximiza o rendimento do gerador. Este valor de escorregamento será chamado de escorregamento ótimo, pois leva o gerador a operar no ponto de rendimento máximo.

A Figura 8 mostra as curvas do rendimento versus velocidade do rotor para diferentes valores de escorregamento. Observa-se que a operação com escorregamento constante não é uma boa técnica de controle para operação com velocidade variável.

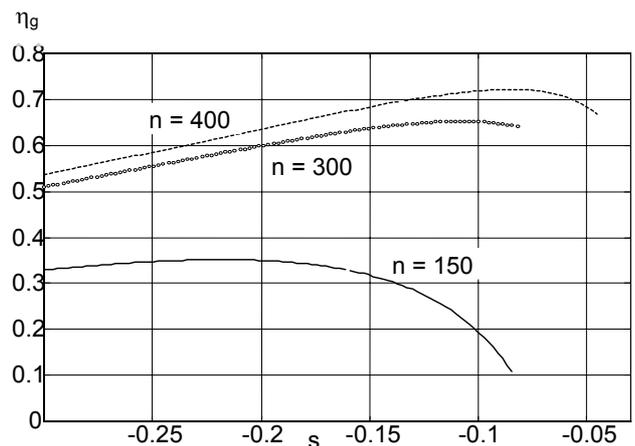


Fig. 7. Rendimento versus escorregamento para n igual a 150, 300 e 400 rpm.

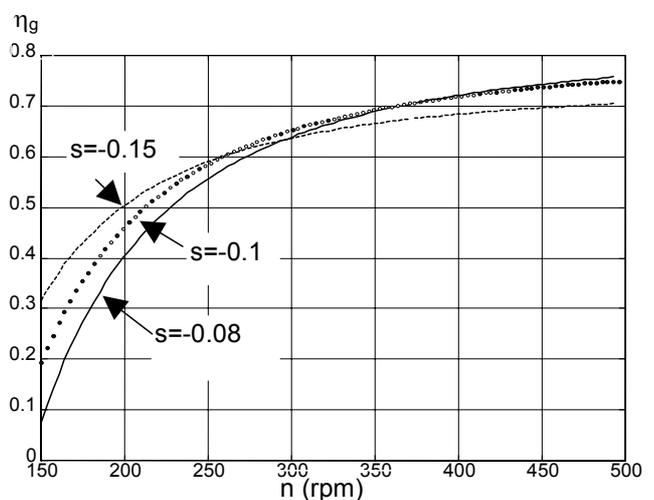
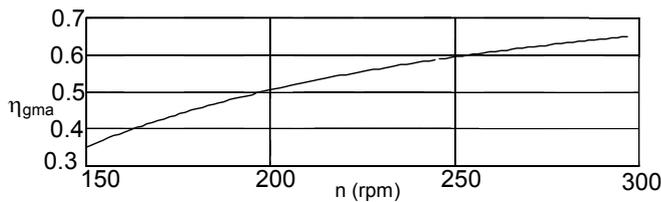


Fig. 8. Rendimento versus velocidade do rotor para operação com escorregamento constante.

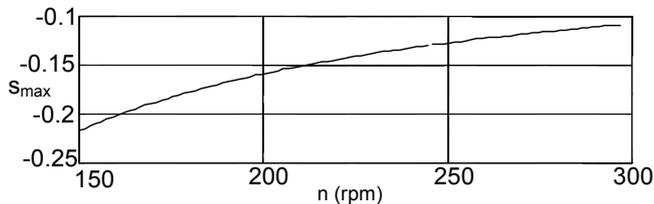
A curva do rendimento máximo ( $\eta_{gmax}$ ), mostrada na Figura 9(a), é obtida operando-se o gerador com  $s_{max}$ . A Figura 9(b) mostra a curva do escorregamento ótimo ( $s_{max}$ ) versus velocidade do rotor. Pode-se observar que o escorregamento ótimo diminui em módulo à medida que a velocidade do rotor aumenta. Nota-se também que para cada valor de velocidade do rotor existe um valor de  $s_{max}$  distinto. Observa-se ainda que o rendimento máximo aumenta à medida que a velocidade do rotor aumenta.

De acordo com as figuras 9(a) e 9(b), para uma dada velocidade do rotor o GIT apresentará máximo rendimento quando operar com o valor de escorregamento ótimo definido pela curva característica mostrada na Figura 9(b). O rotor eólico, por sua vez, apresentará eficiência máxima se estiver operando de acordo com a curva de potência mostrada na Figura 10.

O ponto ótimo de operação do sistema pode ser determinado multiplicando-se, ponto a ponto, as curvas características de rendimento do rotor eólico e gerador. A curva característica do rotor é traçada utilizando-se a aproximação da parábola [3]. A Figura 11 mostra as curvas de rendimento do gerador e rotor, bem como a curva obtida através da multiplicação dessas curvas.



(a)



(b)

Fig. 9 (a) Rendimento máximo versus n; (b) Escorregamento ótimo versus n.

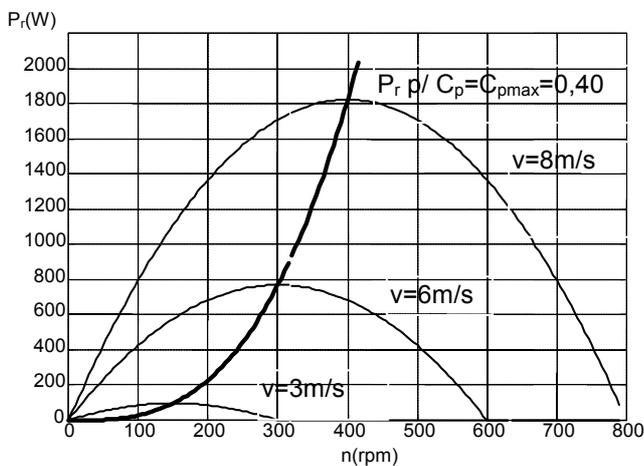


Fig. 10. Característica de conversão do rotor dimensionado em função da velocidade de rotação: Curva característica para  $v=3$  m/s, 6 m/s e 8 m/s; Curva da potência mecânica para  $C_p=C_{pmax}=0,40$ .

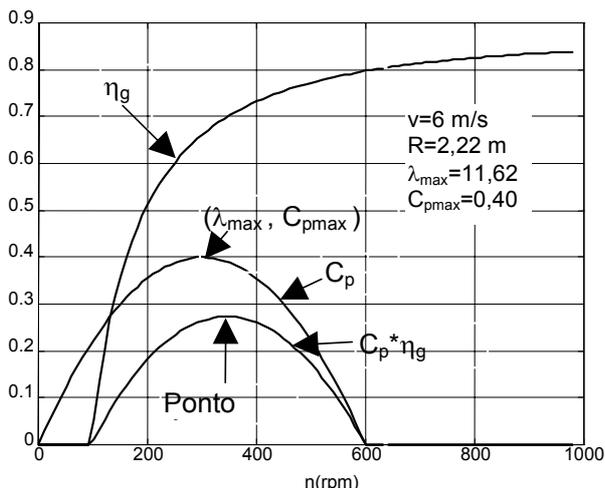


Fig. 11. Determinação do Ponto Ótimo de Operação do Sistema.

Para cada valor da velocidade de vento, existe um ponto  $(P_r, n)$  para o qual o sistema operará com máximo rendimento. Por outro lado, cada ponto de operação  $(P_r, n)$  define uma, e somente uma, velocidade de vento, de acordo com a equação (17). Então, o sistema operará com máxima

eficiência se o gerador operar com a característica ótima de  $(P_r, n)$ .

$$v = \frac{n\pi R}{30} + \sqrt{\left(\frac{n\pi R}{30}\right)^2 + \left(\frac{240\lambda_{max}^3 P_r}{1,806R^3 n\pi}\right)} \quad [m/s] \quad (17)$$

Conclui-se então que o controle ótimo do sistema não necessita da informação da velocidade do vento, mas apenas do valor da velocidade do rotor e da potência mecânica convertida pelo gerador. A potência mecânica pode ser estimada a partir da potência gerada, tendo-se os valores do rendimento do inversor e do rendimento do gerador.

### C. Dimensionamento do Banco de Baterias

O banco de baterias deve ser capaz de suprir a carga durante todo um dia, sem que haja nenhuma geração. Considerando-se baterias de 12 volts, pode-se calcular a capacidade de armazenamento.

$$Q_{bb} = \frac{\text{Consumo Diário (Wh)}}{12V} = \frac{7070}{12} = 589 \quad [A.h] \quad (18)$$

Escolhendo-se baterias de 150 Ah e um fator de carga de 60% (indica que a bateria só será descarregada em até 60% do valor nominal), pode-se determinar o número de baterias através da equação (19).

$$N_b = \frac{Q_{bb}}{F_{cb} Q_b} = \frac{589Ah}{0,60 \cdot 150Ah} = 6,54 \approx 7 \text{ baterias} \quad (19)$$

Já que a amplitude da tensão de saída do inversor de excitação do gerador pode ser ajustada pelo circuito de controle, estas baterias foram associadas em série de forma a obter-se uma tensão cc de 84 volts.

## IV. PROTÓTIPO IMPLEMENTADO

A fim de se comprovar experimentalmente o funcionamento do sistema aqui proposto, foi implementado um protótipo em laboratório. Na montagem realizada, o conjunto vento e rotor foram simulados através de um motor de corrente contínua controlado através de um computador. Nos testes realizados verificou-se apenas a capacidade do aerogerador de produzir energia elétrica. Nenhuma carga foi conectada ao gerador e toda a energia gerada destinava-se a carregar a bateria. A Figura 12 mostra o diagrama em blocos da montagem de laboratório.

O protótipo é constituído basicamente de motor cc (emulador do rotor eólico), gerador de indução, inversor de excitação, banco de baterias e circuito de controle, como mostrado na Figura 13.

O inversor tem dupla função: excitar o gerador e carregar o banco de baterias. O circuito de controle recebe os sinais de leitura de corrente do banco de baterias e velocidade do gerador e ajusta os valores de tensão e frequência de saída do inversor de forma a operar o sistema no ponto de máximo rendimento. O diodo  $D_1$  e o resistor  $R_1$ , no esquema da Figura 13, têm a função de proteção. No caso de falha do circuito de controle do inversor e algum braço do inversor

forneça um caminho de curto-circuito, o resistor  $R_1$  limitará a corrente, evitando que as chaves do inversor sejam danificadas. Quando em operação normal, i.e., sistema gerando energia e a bateria sendo carregada, praticamente toda a corrente que circula em direção à bateria passa pelo diodo  $D_1$ . Dessa forma, esse circuito serve para limitar a corrente que a bateria pode entregar ao inversor, mas deixa passar livremente toda a corrente que sai do inversor e carrega a bateria. O resistor  $R_1$  também serve para fornecer um caminho para excitação inicial do gerador; no entanto, depois que o sistema entra no estado de auto-excitação,  $R_1$  não é mais necessário ao funcionamento do sistema.

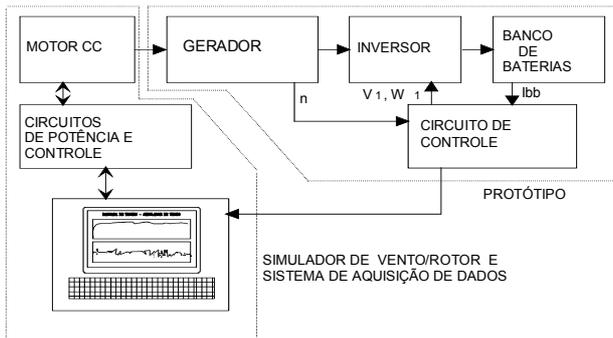


Fig. 12. Diagrama em blocos da montagem de laboratório.

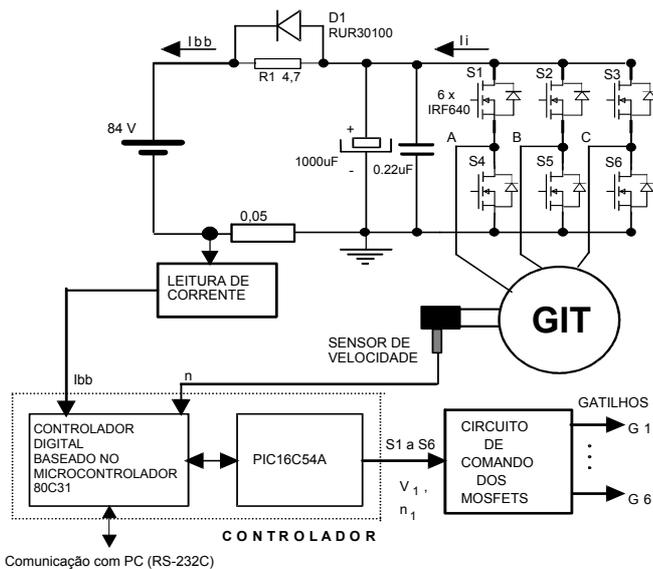


Fig. 13. Diagrama do protótipo implementado em laboratório.

A operação do gerador no ponto de máximo rendimento do sistema foi realizada utilizando-se um controlador digital, implementado através de um programa feito em linguagem C para o 80C31. A Figura 14 mostra o diagrama em blocos do programa de controle implementado.

No controle da tensão de saída do inversor utilizou-se de técnica PWM senoidal onde cada chave do inversor fica em estado condução ou bloqueio por um terço do período da tensão de saída. A técnica de PWM senoidal pode ser construída observando-se a estrutura de um inversor trifásico como mostrada na Figura 15.

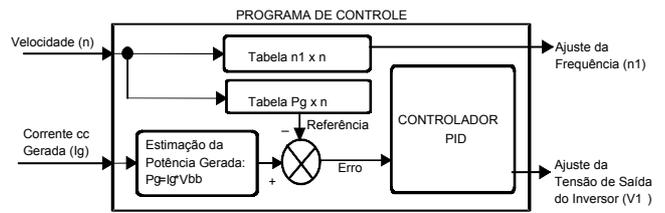


Fig. 14. Diagrama em blocos do programa de controle implementado.

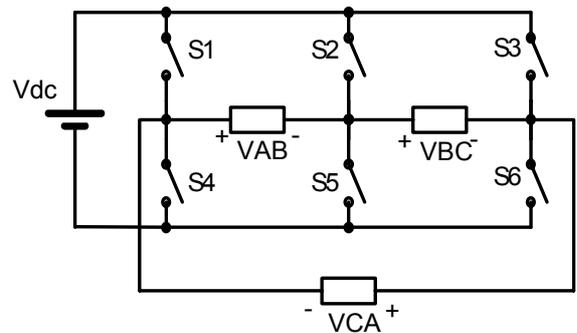


Fig. 15. Estrutura básica de um inversor trifásico.

No inversor da Figura 15, assume-se que as chaves de um braço do inversor operam de forma complementar. Dessa forma, cada estado do inversor é definido completamente a partir da informação dos estados de  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ , sendo os estados de  $S_4$ ,  $S_5$  e  $S_6$  complementares às respectivas chaves superiores. Considerando-se o funcionamento do inversor durante um instante, pode-se observar que cada combinação de estado das chaves (aberta ou fechada) corresponde a uma combinação das tensões  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$ . Dividindo-se o sistema trifásico senoidal em seis intervalos, cada intervalo corresponde a uma combinação distinta de sinais das tensões trifásicas. Por exemplo, no primeiro intervalo  $V_{AB}$  e  $V_{CA}$  são positivas enquanto  $V_{BC}$  é negativa, no segundo intervalo  $V_{AB}$  é positiva enquanto que  $V_{BC}$  e  $V_{CA}$  são negativas, e assim por diante. A Tabela V apresenta o ciclo de trabalho das chaves para cada um dos seis intervalos do ciclo de tensão.

TABELA 5  
Pulsos Aplicados às Chaves a cada Intervalo de Tempo.

Intervalo	$S_1$	$S_2$	$S_3$
I	$t_1$	ABERTA	$t_2$
II	LIGADA	$t_2$	$t_1$
III	$t_2$	$t_1$	ABERTA
IV	$t_1$	LIGADA	$t_2$
V	ABERTA	$t_2$	$t_1$
VI	$t_2$	$t_1$	LIGADA

Considerando-se apenas o intervalo I pode-se concluir que as tensões senoidais trifásicas podem ser moduladas, durante este intervalo, mantendo-se  $S_2$  constantemente aberta e operando em alta frequência apenas  $S_1$  e  $S_3$ . Neste caso tem-se que: a) o valor médio de  $V_{BC}$  é negativo e proporcional ao tempo em que  $S_3$  permanece fechada; b) o valor médio de  $V_{AB}$  é positivo e proporcional ao tempo em que  $S_1$  permanece fechada; c) o valor médio de  $V_{CA}$  é proporcional à diferença entre os tempos, em estado fechado,

de  $S_1$  e  $S_3$ . A tensão  $V_{CA}$  será positiva de  $S_3$  permanecer mais tempo fechada que  $S_1$ , caso contrário será negativa.

Os tempos  $t_1$  e  $t_2$  que definem a modulação são dados pelas equações (20) e (21), respectivamente.

$$t_1 = D \cdot T \cdot \sin(t), \quad 0 < t < \pi/3 \quad (20)$$

$$t_2 = D \cdot T \cdot \sin(t + \frac{\pi}{3}), \quad 0 < t < \pi/3 \quad (21)$$

Sendo  $D$  é um número entre 0 e 1, que representa o índice de modulação e  $T$  é o período da onda portadora. Os tempos  $t_1$  e  $t_2$  são os mesmos para cada um dos seis intervalos. Os intervalos diferem entre si pela maneira em que esses tempos são aplicados às chaves. Para cada intervalo, a distribuição destes tempos é mostrada na Tabela V. Nota-se que o período completo pode ser obtido apenas a partir da informação contida em um sexto da senóide.

## V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram realizados acionando-se o gerador de indução à velocidade constante de 300 rpm, velocidade nominal do sistema proposto. O valor de escorregamento utilizado foi de -0,11, valor do escorregamento que maximiza o rendimento do gerador a esta velocidade [3].

A corrente do banco de baterias é mostrada na Figura 16. O sinal negativo indica que a corrente está fluindo em direção à bateria, carregando-a. Nota-se ainda que esta corrente não apresenta praticamente componente reativa. Isto mostra que o fluxo de potência reativa, necessária ao funcionamento da máquina de indução como gerador, está confinado no percurso entre o motor e inversor. Dessa forma, nenhum elemento externo de armazenamento de energia é necessário à operação do gerador. Conclui-se então que para um gerador de indução operar, é necessário apenas fornecer um caminho para circulação das correntes reativas que são geradas por ele mesmo.

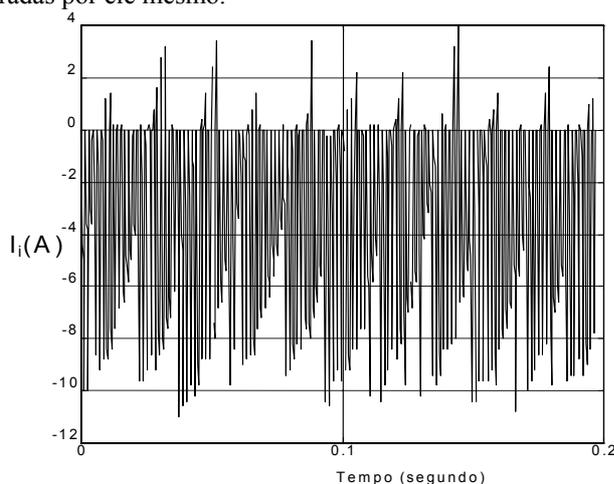


Fig. 16. Forma de onda da corrente do bando de baterias.

A Figura 17 mostra a forma de onda da tensão sobre o banco de baterias. É importante observar que a tensão do banco está em torno de 100 V e não em torno da sua tensão nominal, que é de 84 V. Isto acontece porque o banco está sendo carregado, o que, normalmente, implica no aumento da

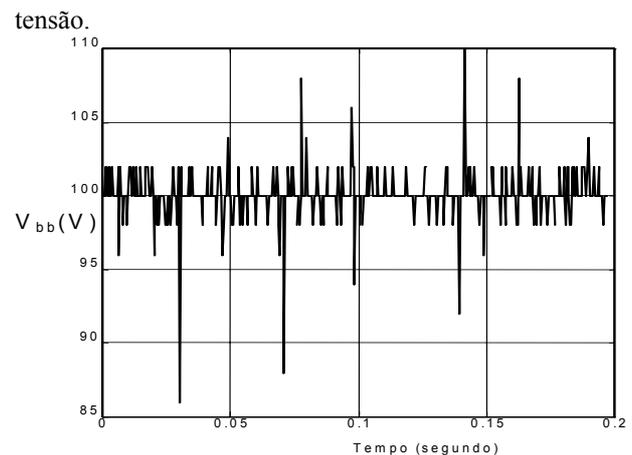


Fig. 17. Tensão sobre o banco de baterias.

A Figura 18 mostra as formas de onda da tensão sobre as chaves  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ . Pode-se observar que o período da onda fundamental, modulada através de pulsos de alta frequência, está em torno de 0,11 s. Devido ao tipo de técnica de modulação PWM utilizada, pode-se ver que cada chave permanece constantemente fechada durante um sexto do período, permanece constantemente aberta durante outro um sexto do período, e chaveia na frequência do PWM durante o intervalo restante (dois terços do período).

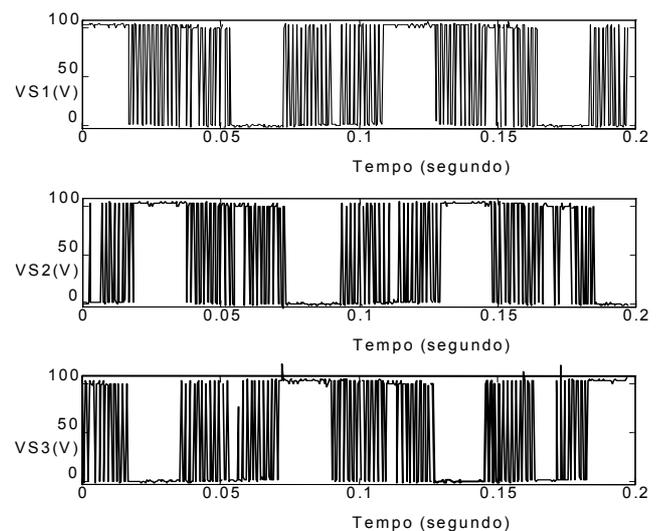


Fig. 18. Tensões sobre as chaves  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ .

A Figura 19 mostra as formas de onda da corrente nas chaves  $S_1$  e  $S_4$ , que formam um braço do inversor. Nesta Figura pode-se distinguir claramente os intervalos em que as chaves ficam permanentemente fechadas ou abertas. Também se observa que a soma dessas duas correntes resulta em uma corrente que varia suavemente (sem chaveamento); isto é mais claramente observado nos intervalos em que não há chaveamento. De fato, a corrente  $I_B$  que alimenta o motor é igual à soma das corrente que passam através das chaves  $S_1$  e  $S_4$ .

A Figura 20 mostra as formas de onda da corrente na fase B e da tensão  $V_{BC}$ . Observa-se também que, apesar da tensão aplicada ao gerador não ser senoidal, a corrente que circula por ele o é. Isto acontece porque o gerador age como uma carga indutiva, e apenas correntes de frequências mais

baixas, como a frequência da fundamental modulada, circulam com facilidade nas fases do gerador.

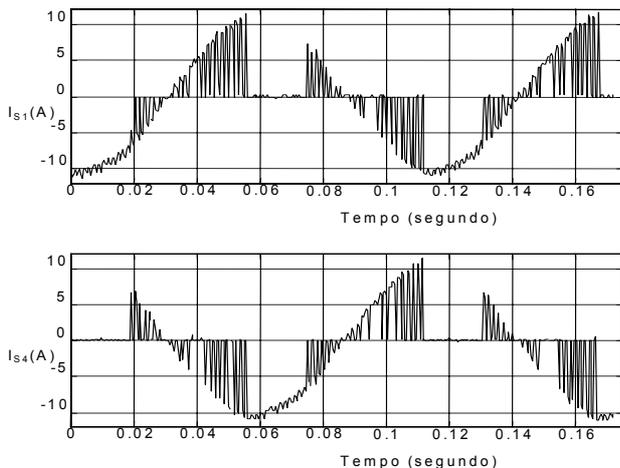


Fig. 19. Correntes nas chaves S<sub>1</sub> e S<sub>4</sub>.

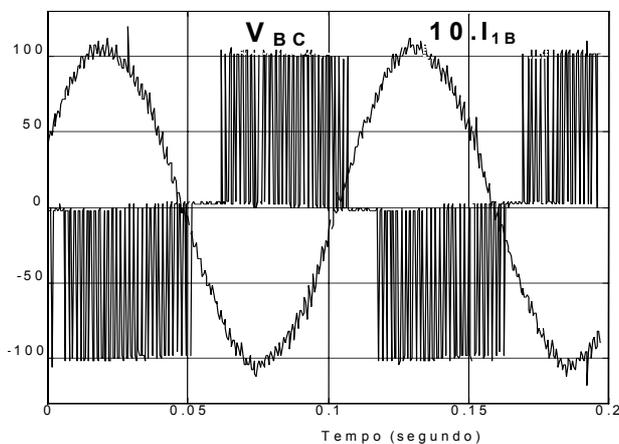


Fig. 20. Tensão de linha V<sub>BC</sub> e corrente na fase B I<sub>1B</sub>

A tensão de saída do inversor foi ajustada de forma a gerar a maior potência possível sem que fosse ultrapassado o valor da corrente nominal no motor cc (máquina primária). Nestas condições, obteve-se os seguintes dados: corrente na fase A do gerador I<sub>1</sub> = 7,2 A; potência mecânica entregue ao gerador P<sub>c</sub> = 650 W; tensão do banco de baterias V<sub>bb</sub> = 100 V; corrente no banco de baterias I<sub>bb</sub> = 3,42 A; corrente no motor cc = 13 A.

Considerando-se o rendimento do inversor igual a 90%, pode-se calcular o rendimento do gerador através da equação (22).

$$\eta = \frac{P_g}{P_c \cdot \eta_{ie}} = \frac{V_{bb} \cdot I_{bb}}{P_c \cdot \eta_{ie}} = \frac{100 \cdot 3,42}{650 \cdot 0,9} = 0,584 \quad (22)$$

A fim de se verificar o comportamento do rendimento ao variar-se a potência convertida, foi realizado um ensaio mantendo-se s=-0,11 e n=300 rpm. O resultado deste ensaio é mostrado na Figura 21. Pode-se ver que o rendimento tende a decrescer com o aumento da potência convertida, embora os resultados obtidos através do modelo estático mostrem que o rendimento do gerador não varia com a potência convertida.

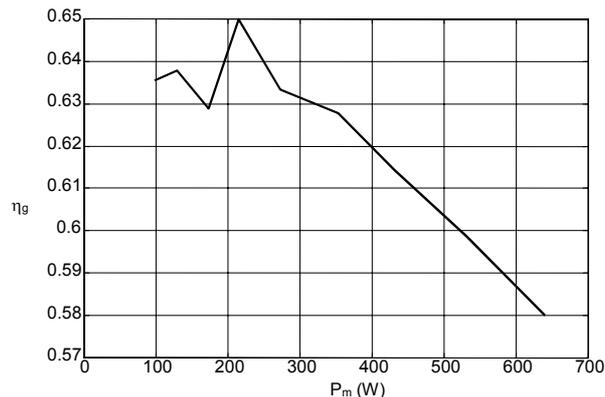


Fig. 21. Rendimento Versus Potência Convertida para Operação com n=300 rpm e s=-0,11.

Considerando-se valores reduzidos de potência convertida, na faixa de 100 W a 400 W, realizou-se um ensaio do sistema, para diversos valores de velocidade rotórica, utilizando-se os valores ótimos de escorregamento. O resultado deste ensaio é mostrado na Figura 22, onde se pode ver que a curva experimental se aproxima bastante da curva calculada.

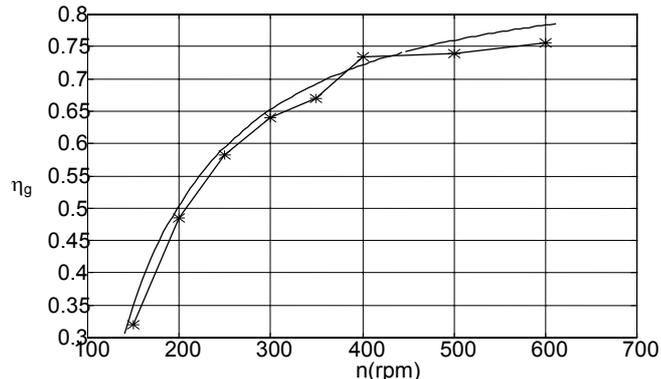


Fig. 22. Rendimento versus velocidade do rotor para operação com escorregamento ótimo, calculada e experimental.

A Figura 23 mostra as curvas experimental e calculada do rendimento do gerador em função da velocidade do rotor.

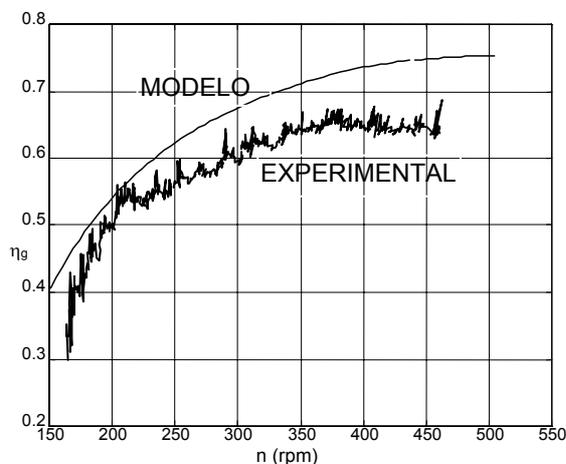


Fig. 23. Rendimento versus velocidade do rotor.

Pode-se ver que os erros obtidos aumentam com a velocidade. Isto pode ser atribuído ao aumento da potência gerada que, por sua vez, aumenta com a velocidade.

De uma maneira geral, os resultados experimentais estão de acordo com o esperado e mostram que o GIT é capaz de operar em baixas velocidades, utilizando-se o sistema proposto.

## VI. CONCLUSÕES

Foi proposto neste artigo um sistema de conversão eólico-elétrico baseado em uma máquina de indução trifásica comercial. Este sistema foi projetado para operar isoladamente e atender às necessidades de consumo de uma pequena residência rural. A potência nominal foi especificada em 300 W, e uma máquina de indução trifásica comercial, gaiola de esquilo, de 7,5 cv e 4 pólos foi utilizado como gerador. De acordo com dados sobre a intensidade do vento na região rural, adotou-se o valor de 6 m/s como velocidade nominal de vento do sistema. Um rotor moderno de 2 pás com raio de 2,2m foi dimensionado para este projeto.

O protótipo, que compreende o gerador de indução, inversor, circuitos de controle e banco de baterias, foi montado em laboratório. Os resultados obtidos mostraram que o sistema funciona de acordo com as características previstas. Conclui-se então que um motor de indução trifásico comercial pode ser utilizado como gerador de indução operando em baixas velocidades. Vale ressaltar que o tipo de sistema aqui proposto, onde se utiliza o acoplamento direto entre rotor e gerador, apresenta limitações quanto à potência gerada. Isto ocorre porque, para se aumentar a potência produzida, é preciso aumentar o raio do rotor que, por sua vez, implica na diminuição da sua velocidade de rotação. Se a velocidade de rotação for muito baixa, o rendimento do gerador cairá podendo inviabilizar o projeto.

## AGRADECIMENTOS

Este projeto recebeu apoio financeiro da Fundação Cearense de Amparo à Pesquisa - FUNCAP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M.S. Godoy, and F.A. Farret, *Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, Florida, 2004.
- [2] J. Jayadev, "Harnessing the wind", *IEEE Spectrum*, pp. 78-83, November 1995
- [3] S. Daher, *Um Sistema Baseado em Gerador de Indução Trifásico para Aproveitamento da Energia Eólica*. Dissertação de Mestrado. PPGEE, UFC, 1997.
- [4] S.P Singh, P. Singh, and M.P. Jain, "Comparative Study on the Performance of Commercially Designed Induction Generator with Induction Motors Operating as Self-Excited Induction Generator", *IEE Proceedings C*, Vol. 140, No.5, pp. 374-380, September. 1993.
- [5] N. Mohan, T.M. Underland and W.P. Robbins, *Power Electronics: converters, applications and design*, John Wiley and Sons – Nova Iorque, 2002.
- [6] A.K. Al Jabri and A.I. Alolah., "Limits on the Performance of the Three-Phase Self-Excited Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 05, No. 2, pp. 350-356, June 1990.
- [7] T.F. Chan, "Analysis of Self Excited induction Generators Using an Interactive Method.", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, pp. 502-506, September 1995.
- [8] O. Ojo, "Minimum Airgap Flux Linkage Requirement for Self-Excitation in Stand-Alone Induction Generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, pp. 484-492, September 1995.
- [9] K. Natarajan, A.M Sharaf, A. Sivakumar and S. Naganathan, "Modeling and Control for Wind Energy Power Conversion Scheme Using Self-Excited Induction Generator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2, No. 3, pp. 506-512, September 1987.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Sérgio Daher**, formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (1995) e recebeu grau de MSc pela Universidade Federal do Ceará em 1997. Seu projeto de mestrado foi na área de Eletrônica de Potência. Atualmente está em fase de conclusão do curso de doutorado em engenharia elétrica pela Universidade de Kassel – Alemanha. Suas áreas de interesse são: instrumentação e controle, eletrônica de potência e fontes de energia renovável.

**Fernando Luiz Marcelo Antunes**, bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (1978), bacharel em Administração de Empresas pela Universidade Estadual do Ceará (1983), mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1980) e PhD pela 'Loughborough University of Technology', Inglaterra (1991). É professor adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará onde coordena o grupo de eletrônica de potência. Suas áreas de interesse incluem conversores multiníveis e aplicações da eletrônica de potência no uso de fontes renováveis de energia para produção de energia elétrica.

**Ruth Pastora Saraiva Leão**, graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará (1978) e em Administração de Empresas pela Universidade Estadual do Ceará (1983). É especialista em Automação de Sistemas pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (1981), com PhD pela 'University of Technology' em Loughborough, Inglaterra (1996). É professora adjunta no Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, atuando nas áreas de Qualidade de Energia Elétrica, Automação de Sistemas Elétricos e Integração à Rede Elétrica de Fontes Renováveis de Energia.

**René Pastor Torrico Bascopé**, recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela "Universidad Mayor de San Simon" na Bolívia em 1992, e os graus de mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina no Brasil em 1994 e 2000, respectivamente. Atualmente é professor no Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Ceará no Brasil. Suas principais áreas de pesquisa compreendem, fontes de energia elétrica para telecomunicações, técnicas de correção de fator de potência em sistemas elétricos, sistemas ininterruptos de energia elétrica (ups) e sistemas com energias alternativas.