



GRUPO II
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

NOVOS GERADORES EÓLICOS ASSÍNCRONOS DUPLAMENTE ALIMENTADOS SEM ESCOVAS

Renato Carlson *	Fredemar Runcos	Hélio Voltolini	Patrick Kuo-Peng	Nelson J. Batistela
GRUCAD/UFSC	WEG S. A - Máquinas	CEFET-PR	GRUCAD/UFSC	GRUCAD/UFSC

RESUMO

A geração de energia elétrica através da utilização da energia dos ventos tem avançado substancialmente na última década. A característica principal desta forma de energia alternativa é o fato dos ventos ao longo da superfície terrestre não apresentarem velocidade constante e, conseqüentemente, a turbina eólica operar com velocidade variável. Para um melhor aproveitamento desta energia, o gerador acoplado à turbina eólica deve ser capaz de gerar energia elétrica com frequência constante numa ampla faixa de variação de velocidade. Entre os diversos tipos de geradores elétricos, o que melhor atende esta condição é o *gerador assíncrono trifásico duplamente alimentado* (GADA).

Será apresentado, em detalhes, o princípio de funcionamento e o método de controle do *gerador assíncrono trifásico duplamente alimentado com escovas* (GADACE). Neste caso, o enrolamento estatórico do gerador é ligado diretamente à rede elétrica e o enrolamento do rotor é ligado à mesma através de conversores estáticos 'back-to-back' que são os responsáveis pelo controle do gerador. Esta solução é utilizada nos modernos geradores eólicos com potências da ordem de até 5 MW. Este sistema de geração, apesar de ser uma solução técnica e economicamente viável, apresenta a desvantagem de exigir a manutenção das escovas. Como na geração eólica o baixo índice de manutenção e a confiabilidade são pontos importantes no sentido de tornar esta forma de energia competitiva, muito se tem pesquisado para conceber o *gerador assíncrono trifásico duplamente alimentado sem escovas* (GADASE). Este gerador além das vantagens do anterior, não necessita de escovas o que o torna mais confiável e reduz os custos de manutenção.

Serão apresentados alguns resultados das pesquisas feitas conjuntamente pela WEG e UFSC no sentido de desenvolver o GADASE. Serão mostrados o princípio de funcionamento, o método de controle e os resultados de desempenho de um protótipo construído pela WEG.

Como conclusão, será apresentada uma análise comparativa entre o desempenho dos dois geradores: GADACE e GADASE.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador de indução, Duplamente Alimentado, Sem Escovas.

1.0 - INTRODUÇÃO

A atividade humana precisa de energia para que possa ser realizada. Qualquer movimento só é possível se existir energia mecânica disponível. Em função desta necessidade, muito cedo na história do desenvolvimento humano, a conversão de formas de energia primária em energia mecânica para a realização de trabalhos motivou o ser humano a estudar e desenvolver técnicas de conversão de energia. Uma das formas de energia primária abundante na natureza é a energia dos ventos. A técnica de conversão da energia dos ventos, ou energia eólica,

em energia mecânica primeiramente foi explorada para utilização em propulsão de navios, moinhos de cereais, bombas de água e na idade média para mover a indústria de forjaria.

A conversão da energia dos ventos em energia mecânica necessita que se disponha de um potencial eólico e de um sistema de conversão que resista aos caprichos da natureza.

No final do século XIX quando o uso da energia elétrica começou a crescer rapidamente no planeta, as primeiras turbinas eólicas foram aplicadas na conversão da energia dos ventos diretamente em energia elétrica. No inverno de 1887-88 Charles F. Brush colocou em operação a primeira turbina eólica automática com diâmetro do rotor de 17m e 144 pás de madeira para gerar energia elétrica com potência de 12 kW.

A geração de energia elétrica em grande escala, alimentando de forma suplementar o sistema elétrico através do uso de turbinas eólicas de grande porte, evoluiu muito nas últimas décadas. Pode-se dizer que a moderna tecnologia das turbinas eólicas surgiu na Alemanha na década de 1950, já com pás fabricadas com materiais compostos, controle de passo e torres na forma tubular e esbelta.

Na década de 1970 até meados da década de 1980, após a primeira grande crise dos preços do petróleo, diversos países, inclusive o Brasil, se preocuparam em desenvolver pesquisas para utilização da energia eólica como uma fonte alternativa de energia. Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado realizadas na Califórnia na década de 1980 e na Dinamarca e Alemanha na década de 1990, que o aproveitamento da energia eólica como alternativa de geração de energia elétrica atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração, eficiência e competitividade. O enorme desenvolvimento tecnológico passou a ser capitaneado pela nascente indústria do setor, em regime de competição e estimuladas por mecanismos institucionais de incentivo. Devido a este avanço tecnológico e ao crescimento da produção em escala foi possível desenvolver novas técnicas de construção dos aerogeradores permitindo aumentar a capacidade unitária das turbinas, obtendo assim reduções graduais e significativas nos custos do kW instalado e, conseqüentemente uma substancial redução no custo da geração da energia elétrica.

O principal problema ambiental inicial, tal como impacto de pássaros nas pás, praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte, com menores velocidades angulares dos rotores.

Por ser uma fonte de energia quase inofensiva ao meio ambiente, os estudos de impacto ambiental são bem mais simplificados e rápidos do que os requeridos por fontes tradicionais de geração de energia elétrica. O fato de ser uma forma limpa de energia associado ao forte crescimento na escala industrial de produção e montagem de turbinas, com custos progressivamente decrescentes, fazem da energia eólica a fonte energética com maiores taxas de crescimento em capacidade geradora, da ordem de 28% nos últimos anos. A Figura 1 mostra a evolução acumulada da capacidade instalada em GW.

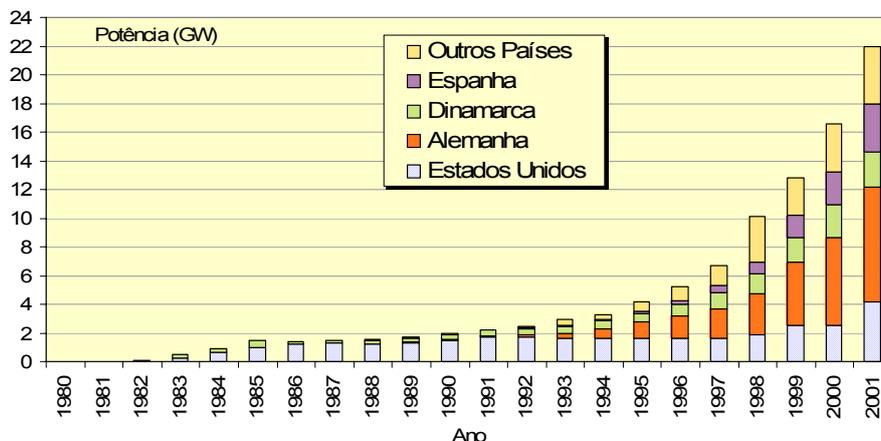


FIGURA 1 – Capacidade instalada mundial de geradores eolielétricos.

2.0 - GERADORES ASSÍNCRONOS PARA TURBINAS EÓLICAS

Existem basicamente duas categorias de sistemas de gerador para turbinas eólicas: de velocidade constante e de velocidade variável. Em aplicações de velocidade fixa, máquinas de indução com rotor de gaiola têm sido usadas como geradores conectados diretamente à rede elétrica em aproveitamentos de energia eólica devido à sua capacidade de manter constante a frequência gerada com a velocidade do vento variável. Sistemas de velocidade variável são mais complexos e exigem a intervenção de conversores estáticos. Dois tipos de geradores são encontrados em aplicações de velocidade variável em turbinas de médio e grande porte: o gerador síncrono e o de indução.

Pode-se obter um melhor aproveitamento da energia do vento, utilizando soluções com velocidade variável. Estas soluções são, geralmente, baseadas em *geradores assíncronos duplamente alimentados com escovas* (GADACE) que são máquinas de indução com rotor bobinado. O rotor é mecanicamente acoplado à turbina eólica através de um multiplicador de velocidade (*gearbox*). O circuito do estator é ligado à rede elétrica de tensão e frequência fixa enquanto o circuito do rotor é ligado à rede através de um conversor de frequência na configuração *back-to-back* permitindo um fluxo de potência bidirecional de acordo com a velocidade da turbina eólica. A vantagem desta solução é o fato que a potência do conversor é da ordem de 30% da do gerador. A presença de escovas no rotor é o ponto fraco desta solução.

A Figura 2 apresenta como exemplo, a curva de operação de um sistema de velocidade variável com gerador de indução de rotor bobinado duplamente alimentado. Neste exemplo, a geração de energia elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de $v_0 \approx 5$ m/s. Abaixo deste valor o conteúdo energético do vento não justifica o seu aproveitamento.

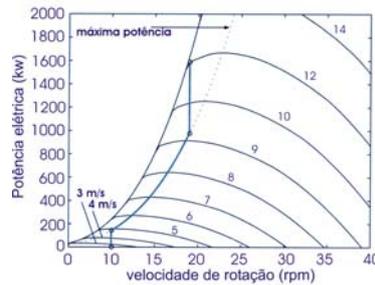


FIGURA 2 – Curva de operação de um aerogerador de velocidade variável.

Na mesma figura, o aerogerador funciona seguindo a curva de máxima potência para velocidades do vento entre $v_0 \approx 5$ m/s e $v_n \approx 9,0$ m/s. Nesta região a potência disponível no eixo do gerador varia com o cubo da velocidade do vento. Para velocidades de vento pouco acima de 9 m/s o limite de velocidade da turbina é atingido e até a velocidade do vento nominal de 12 m/s, o torque entregue ao gerador elétrico depende do cubo da velocidade do vento e a potência cresce linearmente até a máxima potência do gerador. Para velocidades de vento superiores a 12 m/s é ativado o sistema de limitação automática de potência da turbina que pode ser por controle do ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo da turbina. Nesta região a potência disponível no eixo do gerador é constante e igual à máxima potência do mesmo. Para ventos muito fortes com velocidade superior a $v_m \approx 24$ m/s, atua o sistema automático de proteção, reduzindo a rotação das pás e o gerador elétrico é desconectado da rede elétrica.

Para minimizar o problema de manutenção devido ao uso de escovas no GADACE, existe uma solução que conserva as vantagens da máquina duplamente alimentada com conversor de frequência de capacidade menor, sem necessitar de escovas, o *gerador assíncrono duplamente alimentado sem escovas* (GADASE) como será mostrado a seguir.

3.0 - MÁQUINA DE INDUÇÃO COM DOIS ENROLAMENTOS NO ESTATOR E ROTOR DE GAIOLA ESPECIAL

Esta solução consiste de uma máquina de indução com rotor em gaiola e dois enrolamentos no estator, um exercendo a função de enrolamento principal conectado diretamente à rede elétrica e o outro exercendo a função de enrolamento auxiliar conectado à rede elétrica através de um conversor de frequência. A Fig 3 (a) mostra esquematicamente esta estrutura e sua conexão à rede de energia elétrica [1]-[4]. De forma a evitar o acoplamento magnético dos dois enrolamentos trifásicos do estator, os mesmos devem ter número de pólos diferentes. Como os dois enrolamentos dividem o mesmo núcleo, para evitar o empuxo magnético desbalanceado, a diferença entre o número de pares de pólos deve obedecer a relação: $p_p \neq p_a \pm 1$. Os dois enrolamentos do estator, sendo de número de pólos diferentes, não estão acoplados eletromagneticamente entre si, porém ambos estão acoplados via rotor pela gaiola. Esta condição impõe algumas características especiais na construção da gaiola como é mostrado na Fig. 3 (b). A excitação dos enrolamentos da armadura com diferentes números de pólos, p_p e p_a , em frequências diferentes, f_p e f_a , produz campos girantes de diferentes velocidades. Se o rotor meramente reagisse com estes campos como se fossem simplesmente duas máquinas de indução na mesma carcaça, pelo menos um dos sistemas operaria com um escorregamento elevado. Conseqüentemente, a operação deste sistema neste modo 'dupla-indução' seria muito ineficiente. Entretanto, quando ambos os sistemas operam com um escorregamento significativo, com o campo do rotor resultante do enrolamento principal acoplado com o campo do enrolamento auxiliar do estator e vice-versa, um modo 'síncrono' é produzido. Se a frequência das correntes do rotor devido ao campo do enrolamento principal do estator for designada por f_{rp} e a frequência das correntes do rotor devido ao campo do enrolamento auxiliar do estator for designada por f_{ra} , o modo síncrono

ocorre quando $f_{ra} = -f_{rp}$, sendo $\frac{f_p}{p_p} = f_r + \frac{f_{rp}}{p_p}$ e $\frac{f_a}{p_a} = f_r + \frac{f_{ra}}{p_a}$

Então:

$$f_r = \frac{f_p + f_a}{p_p + p_a}$$

Assim, o sistema opera sem nenhum 'escorregamento' e, para uma frequência de alimentação constante, a velocidade da máquina é ditada pela frequência do enrolamento auxiliar, f_a , que pode ser tanto positiva (isto é, a mesma seqüência de f_p) como negativa (isto é, uma seqüência oposta à de f_p) ou nula (isto é, corrente contínua).

Para que o 'acoplamento cruzado' ocorra, pode-se demonstrar que as correntes do rotor devem ser restritas a um número de pólos (laços) p_r , cujo valor mais efetivo é dado por:

$$p_r = p_p + p_a$$

Esta equação define o número de barras da gaiola mostrada na Fig. 3(b).

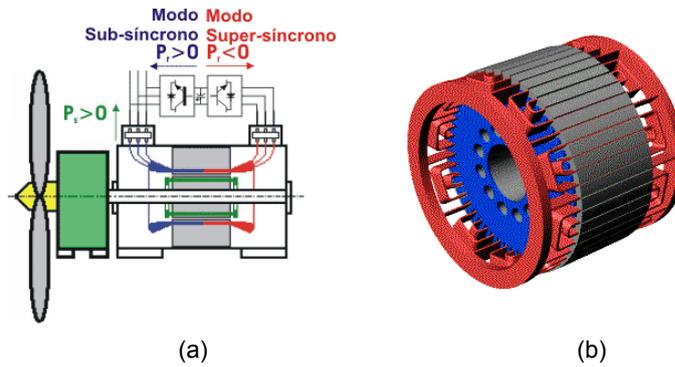


FIGURA 3– (a) Gerador de indução duplamente alimentado, (b) Estrutura do rotor em gaiola.

4.0 - O CONVERSOR CA/CC/CA

O conversor necessário para este sistema, considerando a potência definida para a aplicação em aproveitamentos eólicos, deve ser bidirecional e sua potência é relacionada com a potência do gerador S_m , pela equação:

$$S_c \approx S_m \left(\hat{f}_c / \hat{f}_c + f_p \right),$$

onde \hat{f}_c é a máxima frequência do conversor necessária para cobrir toda a faixa de velocidade de operação. A equação acima permite antecipar a vantagem de custo deste tipo de solução quando comparada com sistemas baseados em máquinas síncronas, máquinas com ímãs permanentes ou mesmo geradores de indução convencionais com rotor em gaiola, para os quais a capacidade do conversor é de 100% da potência da máquina que está sendo utilizada.

O circuito inserido entre o enrolamento auxiliar e a rede é composto de dois inversores PWM acoplados via elo CC como representado na Figura 3 (a). Esta figura indica o fluxo de potência no enrolamento principal e no enrolamento auxiliar para velocidades sub-síncronas e super-síncronas. Para a operação na velocidade síncrona o circuito impõe uma corrente constante no enrolamento auxiliar caracterizando um funcionamento como gerador síncrono. Para uma melhor eficiência do sistema a operação em condições nominais se dá na região super-síncrona, pois nesta região, tanto o enrolamento principal como o auxiliar fornecem potência para a rede. Este ponto de operação pode ser ajustado através da relação do multiplicador de velocidade entre a turbina e o gerador.

O objetivo do circuito de controle entre o enrolamento auxiliar e a rede é manter a velocidade da turbina eólica no ponto de máxima extração de energia do vento e permitir o desacoplamento do controle da potência ativa e reativa entregue à rede.

5.0 - MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO DE GAIOLA DUPLAMENTE ALIMENTADO

5.1 Modelo analítico dinâmico

O modelo dinâmico analítico é obtido transformando as equações escritas em variáveis de máquina em equações escritas em um sistema de eixos de referência arbitrário. A Figura 4 mostra o sistema de eixos de referência usado nesta análise da máquina.

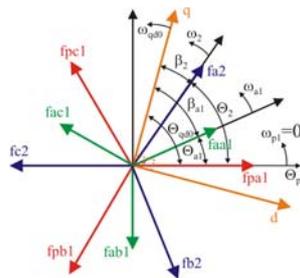


FIGURA 4 - Sistema de eixos de referência arbitrários.

O circuito de estator é considerado fixo ao eixo de referência θ_{p1} e todas as variáveis de máquina (parâmetros do enrolamento principal e do enrolamento auxiliar) são referidas ao enrolamento principal. Na Figura 4 os vetores f representam as tensões ou correntes elétricas da máquina. O circuito do rotor gira com uma velocidade angular de ω_2 rad elétricos/s; os eixos q e d giram com uma velocidade angular de ω_{qdo} rad elétricos/s e o deslocamento angular entre o circuito de rotor e o eixo arbitrário q é β_2 .

Os circuitos do enrolamento auxiliar são fixos fisicamente no estator. Entretanto, para que se possa considerar o efeito cascata neste modelo dinâmico, é necessário admitir que seus eixos giram com uma velocidade angular ω_{a1} rad elétricos/s, a qual representa a frequência angular das grandezas do enrolamento auxiliar e é dada por:

$$\omega_{a1} = (p_p + p_a) \omega_m$$

onde ω_m representa a velocidade angular mecânica do rotor, p_p e p_a são o número de pólos do enrolamento principal e do enrolamento auxiliar, respectivamente.

Transformando o sistema de equações para o sistema de eixos de referência, obtêm-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} [u_{pqd01}] \\ [0] \\ [u'_{aqd01}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_{p1}] & [0] & [0] \\ [0] & [R'_{p2}+R'_{a2}] & [0] \\ [0] & [0] & [R'_{a1}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{pqd01}] \\ [i'_{pqd02}] \\ [i'_{aqd01}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\omega_{qd0}] & [0] & [0] \\ [0] & [\omega_{qd0}-\omega_{p2}] & [0] \\ [0] & [0] & [\omega_{qd0}-\omega_{a1}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\lambda_{pqd01}] \\ [\lambda'_{pqd02}] \\ [\lambda'_{aqd01}] \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [\lambda_{pqd01}] \\ [\lambda'_{pqd02}] \\ [\lambda'_{aqd01}] \end{bmatrix}$$

No sistema matricial acima, os índices p e a são relacionados ao enrolamento principal e ao enrolamento auxiliar, respectivamente. Os índices 1 e 2 são relacionados ao estator e rotor, respectivamente. Os parâmetros das matrizes são: R_{p1} e R'_{a1} as resistências do enrolamento principal e do enrolamento auxiliar, respectivamente; R_{p2} e R'_{a2} , a resistência do rotor refletida aos enrolamentos do estator; λ_{qd0} o fluxo concatenado; u_{qd0} as tensões; i_{qd0} as correntes; ω_{qd0} a velocidade do eixo de referência; ω_{p2} a velocidade do rotor e ω_{a1} a velocidade do enrolamento auxiliar.

O sistema de equações diferenciais, acima apresentado, é resolvido pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem.

5.2 Modelo analítico de regime permanente

O comportamento da máquina em regime permanente é obtido usando o circuito equivalente considerando os dois enrolamentos do estator conectados em cascata (Figura 5). Com este modelo é possível analisar a máquina operando em regime permanente tanto como motor como gerador para qualquer condição de carga.

Os resultados apresentados neste artigo se referem a um protótipo construído de 100kW – 440V/760V – 60Hz, com enrolamento principal de 12 pólos e enrolamento auxiliar de 8 pólos.

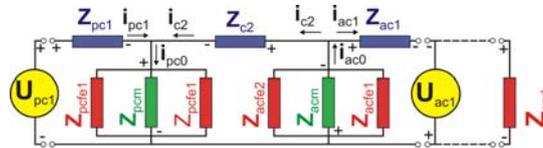


FIGURA 5 – Circuito equivalente em regime permanente.

A Figura 6 mostra as curvas do torque do gerador, em regime permanente. Nesta figura pode-se constatar que o torque total é a soma dos torques dos enrolamentos principal e auxiliar, comprovando o comportamento aditivo desejado.

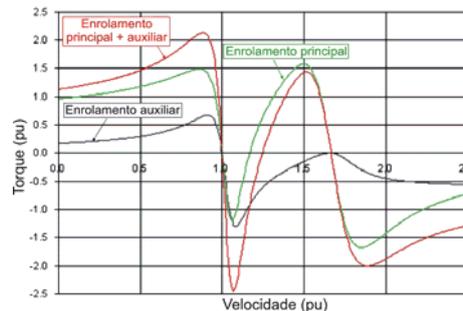


FIGURA 6 – Torque do gerador em regime permanente.

No ponto em que a velocidade de rotação é de 1 pu, os três torques passam por zero indicando que a máquina está em sua velocidade síncrona natural. Na velocidade de rotação de 1,667 pu os três torques passam por zero novamente indicando a velocidade síncrona do enrolamento principal do estator. Na Figura 6 é possível observar que no intervalo de velocidades entre 0 e 1 pu a máquina se comporta como um motor com torque positivo. De 1 pu a 1,667 pu de velocidade a máquina se comporta primeiramente como gerador (torque negativo) até que o torque do enrolamento principal do estator se torna positivo novamente e a máquina passa a funcionar como motor. Para velocidades acima de 1,667 pu, os três torques são novamente negativos e a máquina funciona novamente como gerador. Então, a máquina de indução duplamente alimentada sem escovas pode funcionar perfeitamente como motor ou gerador, quando controlada por um conversor estático, como mostrado na Figura 3 (a), em uma faixa de velocidades de $\pm 30\%$ pu em torno da velocidade síncrona natural de rotação.

5.3 Modelo Numérico com Elementos Finitos

Na modelagem por elementos finitos, a máquina elétrica é representada em um domínio 2D. As equações de Maxwell são usadas para formular o comportamento do campo magnético e o método dos elementos finitos para discretizar o domínio. O movimento é levado em conta por meio da técnica da Banda de Movimento, o tensor de Maxwell e a equação mecânica da oscilação. A modelização por elementos finitos é explicada com detalhes em [5].

6.0 - COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS ANALÍTICOS, NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

Uma comparação de resultados é mostrada na Figura 7 (a) que apresenta as curvas torque-velocidade dinâmicas onde se verifica que os resultados analíticos, numéricos e experimentais têm boa concordância.

A Figura 7 (b) mostra as correntes induzidas nas barras do rotor durante uma aceleração forçada do rotor, calculadas pelo método de elementos finitos. Aqui também, podem se identificar os dois instantes em que a as correntes induzidas passam por um mínimo: um na velocidade síncrona natural ($t \cong 0.35s$) e o outro na velocidade síncrona do enrolamento principal ($t \cong 0.7s$). Diferentemente do que ocorre com as correntes do enrolamento auxiliar, nas barras do rotor a frequência das correntes induzidas passa por zero na velocidade síncrona do enrolamento principal.

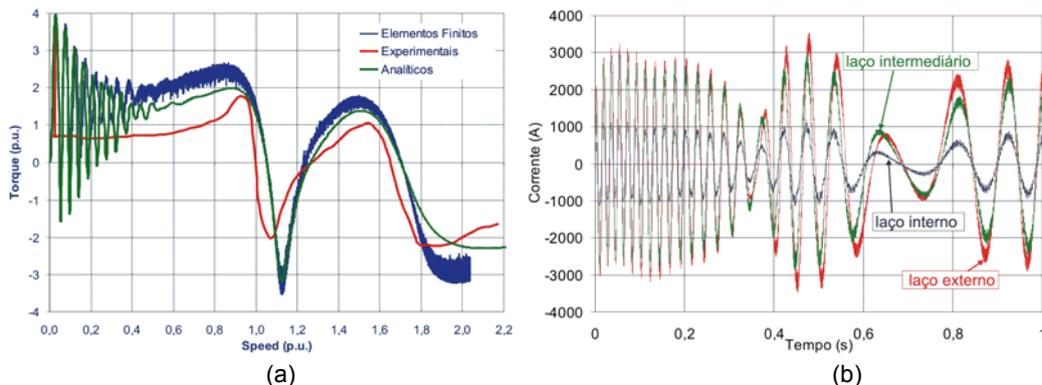


FIGURA 7– (a) Curvas torque-velocidade em regime dinâmico, (b) Correntes nos laços da gaiola.

Na modelagem analítica um enrolamento trifásico equivalente equilibrado obedecendo a uma distribuição senoidal na superfície do rotor representa a gaiola. Na modelagem por elementos finitos, as barras do rotor são representadas tal qual elas são na realidade, tanto no que diz respeito às suas dimensões reais como às suas conexões elétricas. Então, esta modelagem fornece a corrente real de cada barra do rotor tanto em amplitude como em forma de onda.

7.0 - ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Para a análise de vibrações do gerador é necessário determinar as ondas de indução geradas no entreferro [7]. Com estas ondas de indução é possível calcular as vibrações forçadas mecânicas devido à excitação eletromagnética da máquina elétrica. Este tipo de problema pode adequadamente resolvido usando o *Método de Superposição Modal* [7].

As medidas de vibração foram realizadas nos quatro pontos indicados na Figura 8 (a). Analisando os resultados da medição mostrados na Figura 8 (b), vê-se que as frequências de vibração principais são 60,625 Hz, 120 Hz e 415,625 Hz com amplitudes RMS de 6,217 mm/s, 0,863 mm/s, e 1,258 mm/s, respectivamente. A frequência de 60,625 Hz, cujo modo de vibração é $r=2$, produz a máxima amplitude de vibração medida no ponto 1.

Os picos em 60,625 Hz e em 120,0 Hz correspondem uma resposta a uma excitação forçada eletromagnética [7]. Porém, o pico em 415,625 Hz é uma resposta a uma força de excitação mecânica ($70 \times 5,9375\text{Hz}$) e não a uma força eletromagnética produzida pelas correntes da máquina.

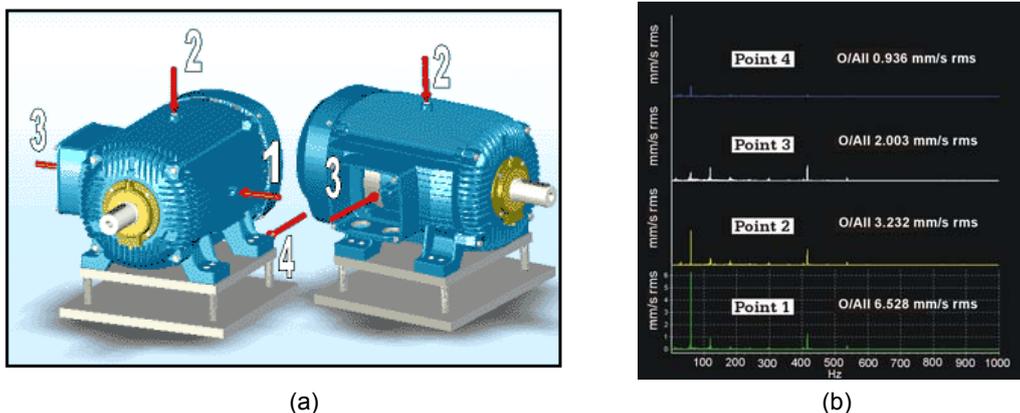


FIGURA 8 (a) Pontos de medição de vibrações, (b) Espectros de velocidades de vibração medidos em RMS.

Analisando todo o espectro de vibração medido, verifica-se que a vibração máxima acontece em 60,625Hz com modo de excitação $r=2$. Esta onda de força de excitação é produzida pela indução fundamental de 60Hz gerada pelo enrolamento principal e pela indução fundamental de frequência de 0,625Hz gerada pelo enrolamento auxiliar. Esta força de excitação é perigosa para o comportamento de vibração estrutural porque depende da condição de carga e deve ser considerada no projeto da máquina.

8.0 - ANÁLISE DE DESEMPENHO

A Figura 9 mostra o desempenho da máquina ao operar como um gerador, com os terminais do enrolamento auxiliar curto-circuitados. Comparando os resultados experimentais com a simulação analítica, observamos que eles apresentam boa concordância.

A análise dos dados de desempenho apresentados na Figura 9, com a máquina operando com o enrolamento auxiliar curto-circuitado, mostra que o problema principal reside no seu fator de potência. O baixo valor do fator de potência é uma consequência direta do baixo número de barras da gaiola do rotor (número de pólos da gaiola). Os laços internos da gaiola existem para minorar este efeito. A boa escolha do número de barras é uma condição necessária à operação desta máquina.

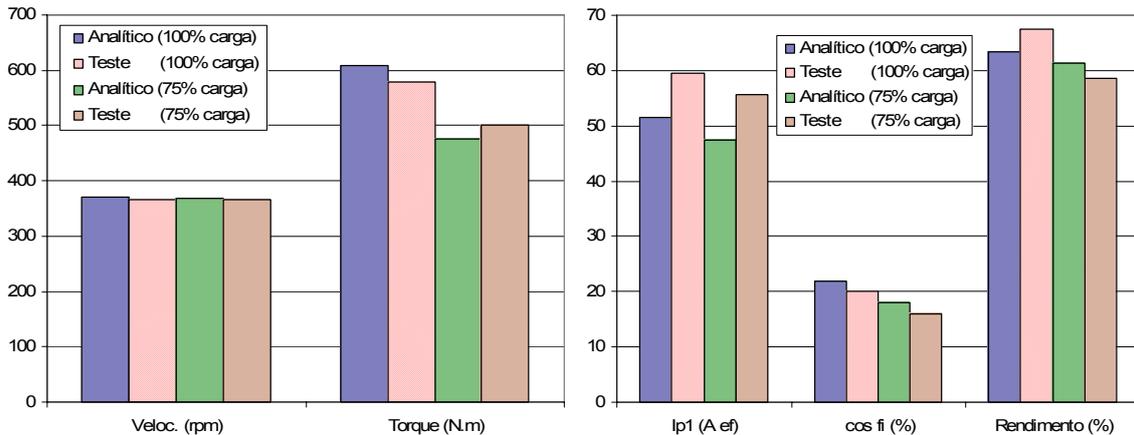


FIGURA 9 – Desempenho da máquina funcionando como gerador com o enrolamento auxiliar curto-circuitado.

Um modo para melhorar o fator de potência é substituir a gaiola do rotor por enrolamentos multi-espiras [8] que é um enrolamento concêntrico com todas as bobinas em série em cada pólo do rotor. Com este enrolamento consegue-se realizar a mesma função da gaiola anteriormente apresentada, porém com um número muito maior de espiras em cada laço. Este fato deve contribuir para melhorar o fator de potência da máquina.

9.0 - CONCLUSÃO

Uma discussão acerca das características operacionais e critérios de projeto de geradores de indução duplamente alimentados sem escovas bem como seus modelos analítico e numérico foi apresentada. Os modelos de simulação foram validados por resultados experimentais obtidos com um protótipo construído. A análise teórica apresentou bons resultados quando comparada com a experimental e também a análise da performance, no que diz respeito ao torque, foi bastante satisfatória confirmando as afirmações iniciais de que esta máquina pode ser uma alternativa vantajosa para a geração de energia elétrica a partir da potência do vento.

A principal dificuldade encontrada durante a fase de testes está relacionada ao elevado conteúdo harmônico gerado no fluxo do entreferro devido ao pequeno número de barras no rotor. Estas harmônicas criam reatâncias de dispersão elevadas. Os laços introduzidos na gaiola do rotor ajudam a minimizar este conteúdo harmônico, mas se mostraram insuficientes no protótipo. Assim, estudos adicionais são necessários para melhorar o projeto da gaiola. Outras possibilidades também estão sendo consideradas. Uma delas é um gerador duplamente alimentado com rotor de relutância variável sem enrolamentos.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Y. Liao, "Design of a Brushless Doubly-Fed Induction Motor for Adjustable Speed Drive Applications". *Proceedings of the 1996 IEEE/IAS Annual Meeting*, pp. 850–855.
- (2) R. Li, R. Spée, A.K. Wallace, and G.C. Alexander, "Synchronous Drive Performance of Brushless Doubly-Fed Motors". *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 30, no. 4, July/August 1994, pp. 963-970.
- (3) S. Williamson, A.C. Ferreira, A.K. Wallace, "Generalized Theory of Brushless Doubly-Fed Machine - Part 1: Analysis". *IEE Proc. - Elect. Power Appl.*, vol. 144, no. 2, Mar. 1997, pp. 111-122.
- (4) S. Williamson, A.C. Ferreira, A.K. Wallace, "Generalized Theory of Brushless Doubly-Fed Machine. Part 2: Model verification and Performance". *IEE Proc.-Elect. Power Appl.*, vol. 144, no. 2, Mar. 1997, pp. 123-129.
- (5) A.M. Oliveira, P. Kuo-Peng, N. Sadowski, F. Runcos, R. Carlson, P. Dular: "Finite Element Analysis of a Double Winding Induction Motor with a Special Rotor Bars Topology", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 40, issue 2, Mar. 2004, pp: 770- 773.
- (6) C.G.C. Neves, R. Carlson, N. Sadowski, J.P.A. Bastos, N.S. Soeiro, S.N.Y. Gerges, "Experimental and Numerical Analysis of Induction Motor Vibrations". *IEEE Trans. Magnetics*, 1999, Volume 35, Issue 3, pp: 1314-1317.
- (7) R. Carlson, F. Runcos, A. M. Oliveira, P. Kuo-Peng, N. Sadowski, C.G.C. Neves, "Vibration Analysis of a Doubly-Feed Twin Stator Cage Induction Generator", *Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion - Speedam*, 2004, Italy.
- (8) C. Fräger, "Neuartige Kaskadenmaschine für Burstenlose Drehzahlstell-Antriebe mit geringen Stromrichter Aufwand", Doctor Ingenier Thesis, Dusseldorf, 1995, (in German).