

GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA – TECNOLOGIAS ATUAIS E FUTURAS

F. Rüncos², R. Carlson¹, P. Kuo-Peng¹, H. Voltolini¹, N.J. Batistela¹

¹ GRUCAD-EEL-CTC-UFSC, C.P. 476, 88040-900–Florianópolis-SC-BRASIL

² WEG MÁQUINAS, C.P. 3000, 89250-900–Jaraguá do Sul-SC-BRASIL

Abstract

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. Conseqüentemente a turbina eólica opera com velocidade variável. Isto exige que o gerador acoplado à turbina eólica seja capaz de gerar energia elétrica com frequência constante numa certa faixa de variação de velocidade. Entre os diversos tipos de geradores elétricos atualmente utilizados, um dos que melhor atendem esta condição é o Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado com Escovas [GATDACE]. Neste gerador o enrolamento estático é ligado diretamente à rede elétrica, e o enrolamento do rotor é ligado à rede através do conversor que é responsável pelo controle da máquina. Esta solução é utilizada em modernos geradores eólicos com potências da ordem de até 5MW. O gerador [GATDACE], apesar de ser uma solução viável, apresenta a desvantagem da manutenção devido ao desgaste das escovas. Como na geração eólica, o baixo índice de manutenção e a confiabilidade são pontos importantes no sentido de torná-la competitiva, muito se tem pesquisado para desenvolver o gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado Sem Escovas [GATDASE]. Este gerador, além das vantagens do anterior, não necessita de escovas tornando-o mais confiável e diminuindo os custos de manutenção.

Neste artigo, serão mostrados primeiramente as diversas tecnologias de geradores aplicados na geração eólica, o princípio de funcionamento e o controle do Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado através de Escovas [GATDACE]. Em seguida, serão apresentados os resultados das pesquisas feitas pela WEG e UFSC no sentido de desenvolver o [GATDASE]. Serão mostrados o princípio de funcionamento, o controle e os resultados de performance do protótipo construído para este objetivo.

Como conclusão mostraremos uma análise comparativa entre o desempenho dos dois geradores.

1. - INTRODUÇÃO

Toda 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, denominada energia **Eólica**. A técnica de conversão da energia dos ventos 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 industria de forjaria (figura 1).

A conversão da energia dos ventos em energia mecânica consiste numa técnica relativamente simples, bastando apenas que se tenha um potencial eólico disponível e que resista aos caprichos da natureza.



Figura 1 - Moinho eólico medieval

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 1887-1888 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, (figura 2).

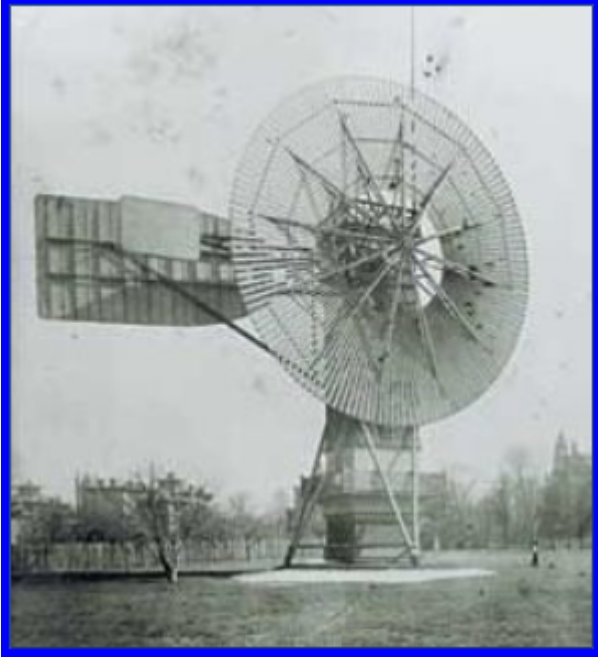


Figura 2 – Moinho com rotor de 17m e 144 pás de madeira

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, (figura 3).



Figura 3 – Moderna turbina eólica

Na década de 1970 até meados da década de 1980, após a primeira grande crise do petróleo, diversos países, inclusive o Brasil, se preocuparam em desenvolver pesquisas na 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 se desenvolver novas técnicas de construção dos aero-geradores permitindo aumentar a capacidade unitária das turbinas, obtendo assim reduções graduais e significativas nos custos do quilowatt instalado e, conseqüentemente, uma substancial redução no custo da geração da energia elétrica. A figura 4, extraída da revista Windpower Monthly de Janeiro de 2004, mostra a tendência da evolução descendente dos custos de geração da energia elétrica a partir de turbinas eólicas, enquanto que o custo da energia gerada a partir do carvão e do gás é constante ou ascendente.

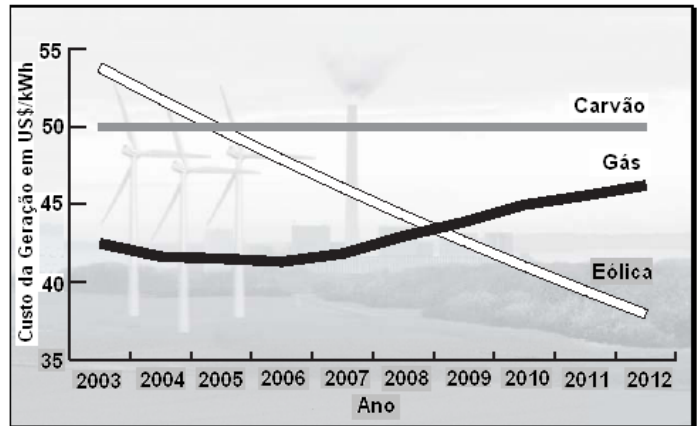


Figura 4 – Redução do custo da geração eólico - elétrica no tempo.

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 simplificados e mais rápidos, que os requeridos por fontes tradicionais de geração de energia elétrica.

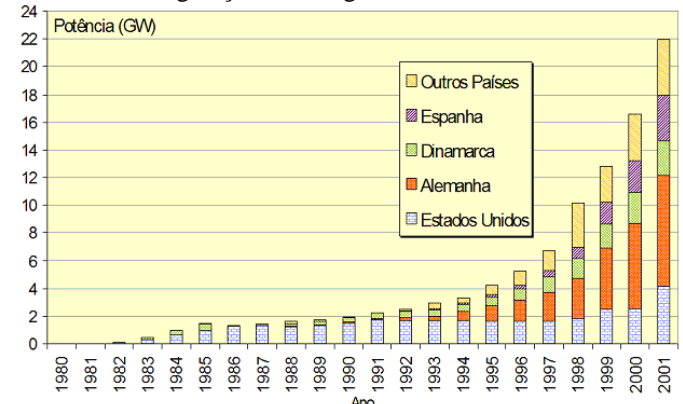


Figura 5 – Crescimento da geração eólico - elétrica.

Por ser uma forma limpa de gerar energia e associada ao forte crescimento na escala industrial de produção e montagem de turbinas, com custos progressivamente decrescentes, a energia eólica tornou-se uma fonte energética com uma das maiores taxas de crescimento em capacidade geradora de energia elétrica (da ordem de 28% nos últimos anos). A figura 5 mostra a evolução acumulada da capacidade instalada em gigawatt.

2. - TECNOLOGIAS APLICADAS NA GERAÇÃO EÓLICA

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia mecânica de rotação. O eixo do rotor acionando o gerador elétrico transforma uma parte desta energia mecânica de rotação em energia elétrica.

A potência elétrica gerada em watts é uma função da velocidade ao cubo do vento, [1] dada por:

$$P = \frac{1}{2} \eta \cdot C_p \cdot \rho \cdot (\pi R^2) \cdot v^3 \quad (1)$$

Onde η representa a eficiência do aero-gerador, isto é, o rendimento considerando as perdas no conjunto das transmissões mecânicas e as perdas no gerador. O termo C_p representa o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor, cujo valor máximo é $C_{p_m} = 0,593$ e o valor usual assume $C_p = 0,45$. O termo ρ representa a massa específica do ar, que a $15^\circ C$ e ao nível do mar vale $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$. O termo R representa o raio do rotor da turbina em metros e v a velocidade dos ventos em metros por segundo.

Com a acentuada expansão das estações eólicas no mundo nos últimos anos, os geradores eólicos se encontram em franco desenvolvimento tecnológico, tendo como objetivo o aumento progressivo nas dimensões e capacidades de geração das turbinas. Na figura 6 são ilustradas as dimensões de turbinas disponíveis atualmente no mercado mundial, comparando-as com o Boeing 747. As turbinas eólicas de potência até 2MW podem ser consideradas tecnologicamente desenvolvidas. As de potência maior que 2MW, apesar de já disponíveis no mercado, ainda podem ser consideradas como em desenvolvimento.

Os rotores das turbinas eólicas são fabricados em materiais compósitos, com tecnologias e requisitos de peso, rigidez e aerodinâmica, características de estruturas aeronáuticas.

A velocidade angular ω_r do rotor da turbina em radianos por segundo é inversamente proporcional ao seu raio R , e pode ser calculada, aproximadamente, por:

$$\omega_r = \frac{\rho}{30} \left(6.90 + \frac{445}{R} \right) \quad (2)$$

Usualmente a rotação é otimizada no projeto para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. À medida que a

tecnologia propicia dimensões maiores para as turbinas a rotação se reduz.

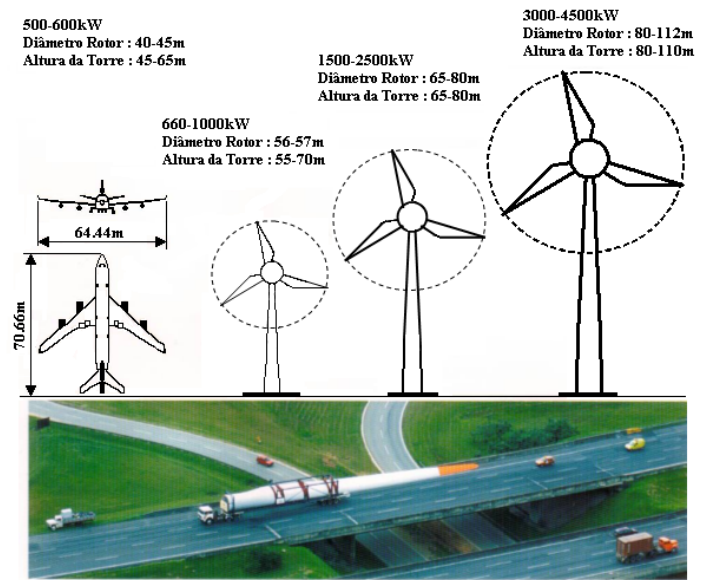


Figura 6- Dimensões típicas das turbinas eólicas no mercado atual comparando com as dimensões do Boeing 747.

As baixas rotações atuais tornam as pás visíveis e evitáveis por pássaros em voo. As turbinas eólicas construídas aerodinamicamente satisfazem as exigências de ruído, mesmo quando instaladas a distância da ordem de 300m de áreas residenciais. Estes aspectos tornam a tecnologia eólico-elétrica ecologicamente correta, tornando-a assim uma fonte alternativa e limpa de energia, com capacidade de geração da ordem de megawatts.

A geração de energia elétrica se inicia com velocidades de ventos da ordem de $v_0 = 2,5 \text{ m/s}$. Abaixo deste valor o conteúdo energético do vento não justifica o seu aproveitamento. Esta faixa de velocidade corresponde a região I na figura 7.

Na região II na figura 7 a velocidade do vento varia de $v_0 = 2,5 \text{ m/s}$ até $v_n = 12,0 \text{ m/s}$. Nesta região a potência disponível no eixo do gerador varia com o cubo da velocidade do vento e corresponde a região onde se inicia o processo de conversão eletromecânica da energia do vento. Para velocidades de vento superiores a $v_n = 12,0 \text{ m/s}$ e menores que $v_m = 25,0 \text{ m/s}$, região III na figura 7, é ativado o sistema de limitação automático 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.

Para ventos muito fortes com velocidade superior a $v_m = 25,0 \text{ m/s}$, região IV na figura 7, atua o sistema automático de proteção, reduzindo a rotação das pás e o gerador elétrico é desconectado da rede elétrica.

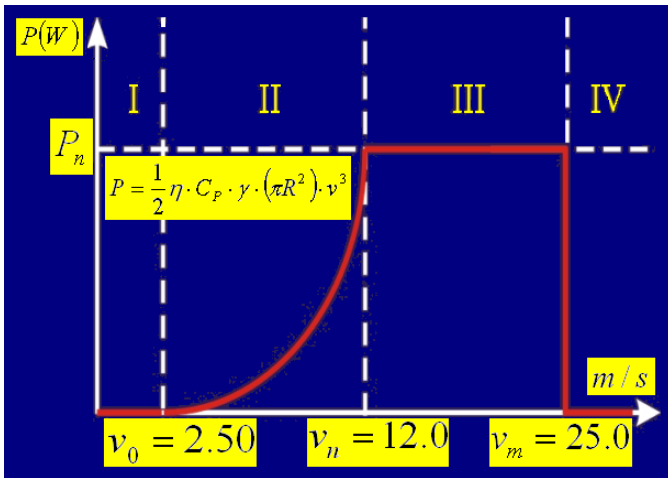


Figura 7- Curva de geração de energia elétrica extraída da turbina eólica.

A turbina eólica, devido à característica de velocidade variável do vento, não consegue transformar a energia do vento em energia mecânica mantendo a rotação do eixo constante. Em função desta característica é necessário construir um grupo gerador eólico-elétrico que seja capaz de gerar energia elétrica e entregar a rede com frequência constante. Outra característica importante do grupo gerador eólico-elétrico é a baixa rotação desenvolvida pela turbina eólica. Estas características fazem com que a tecnologia de Projeto e fabricação do grupo eólico-elétrico apresente particularidades diferentes dos grupos convencionais de geração de energia elétrica.

Existem, basicamente, duas filosofias tecnológicas aplicadas atualmente aos grupos eólico-elétrico, ou seja:

1- Grupos Eólico-Elétricos Assíncronos

Nestes grupos o eixo da turbina eólica está acoplado ao eixo de um gerador assíncrono trifásico, que pode ser com rotor de gaiola ou rotor bobinado. Como os geradores assíncronos são máquinas elétricas que apresentam velocidade de operação bem superior a da turbina, exigem que entre a turbina eólica e o gerador seja acoplado um amplificador de velocidade. O grupo eólico-elétrico assíncrono quando conectado a rede através de um conversor de frequência ou quando duplamente alimentado se torna bastante flexível atendendo perfeitamente as duas características da conversão eólico-elétrica da energia cinética dos ventos, ou seja, opera perfeitamente nas regiões II e III do gráfico mostrado na figura 7.

2- Grupos Eólico-Elétricos Síncronos

Nestes, o eixo da turbina eólica está acoplada ao eixo de um gerador síncrono trifásico, que pode ser com circuito de excitação independente no rotor ou ímãs permanentes

no rotor. Nesta tecnologia, nos grupos de menor potência (menor do que 1MW), o gerador síncrono apresenta velocidade de operação bem superior à da turbina exigindo um amplificador de velocidade acoplado entre a turbina e o gerador. Porém nos grupos de maior potência (maior do que 1MW) normalmente o gerador síncrono é fabricado com um número muito grande de pólos e para uma frequência nominal baixa, fazendo com que sua velocidade de operação seja da mesma ordem da turbina, não necessitando do multiplicador de velocidade, mas sim de um acoplamento planetário entre a turbina e o gerador.

Passaremos agora a mostrar esquematicamente os principais grupos eólico-elétrico utilizados atualmente ao redor do planeta na conversão eletromecânica da energia cinética dos ventos. Mostraremos em cada caso o tipo de gerador, a conexão à rede, as principais vantagens e desvantagens de cada caso.

a) O gerador está conectado diretamente à rede elétrica operando com velocidade fixa

Este grupo eólico-elétrico pode ser constituído de um gerador assíncrono ou um gerador síncrono, conforme mostrado esquematicamente na figura 8.

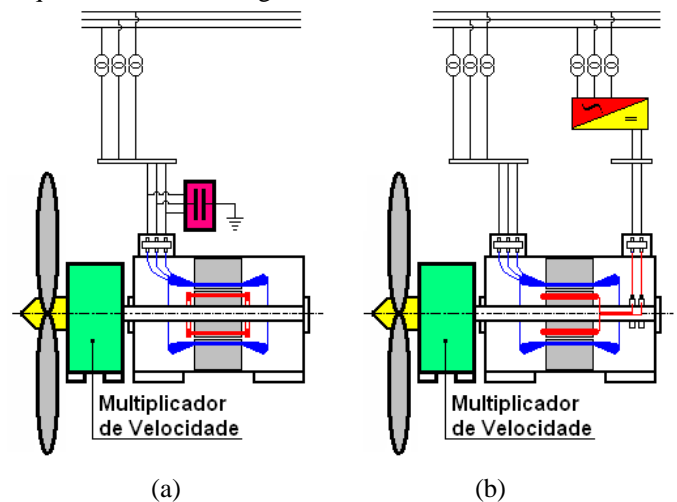


Figura 8- Grupo eólico-elétrico conectado diretamente à rede elétrica. a) Gerador assíncrono de gaiola. b) Gerador síncrono com excitação independente

Ambos trabalham com velocidade de rotação acima dada turbina exigindo um multiplicador de velocidade, normalmente de vários estágios. O gerador síncrono deve trabalhar com rotação constante, tornando o grupo rígido, exigindo sincronização com a rede e, conseqüentemente, não permitindo nenhuma regulação de velocidade. Já o gerador assíncrono permite uma pequena variação de velocidade

devido a sua característica de funcionamento, ou seja, o escorregamento, fazendo com que o grupo seja um pouco mais flexível. Para aumentar esta flexibilidade, em alguns casos é aplicado um gerador assíncrono de gaiola com duplo enrolamento no estator com polaridades diferentes. O grupo assíncrono demanda o uso de um sistema de compensação de reativos, enquanto o grupo síncrono compensa os reativos na excitação independente. Esta configuração pode ser aplicada para potências de até 1MW, em regiões onde a velocidade dos ventos é razoavelmente constante. O grupo assíncrono apresenta a vantagem de ser robusto, ter menor custo e não emitir componentes harmônicos para a rede. Ambos apresentam baixa eficiência na transformação da energia devido a sua rigidez, no que se refere a regulação de velocidade.

b) O gerador está conectado à rede elétrica através de um conversor

Nesta configuração o grupo eólico-elétrico pode ser constituído de um gerador assíncrono ou um gerador síncrono, conforme mostrado esquematicamente na figura 9.

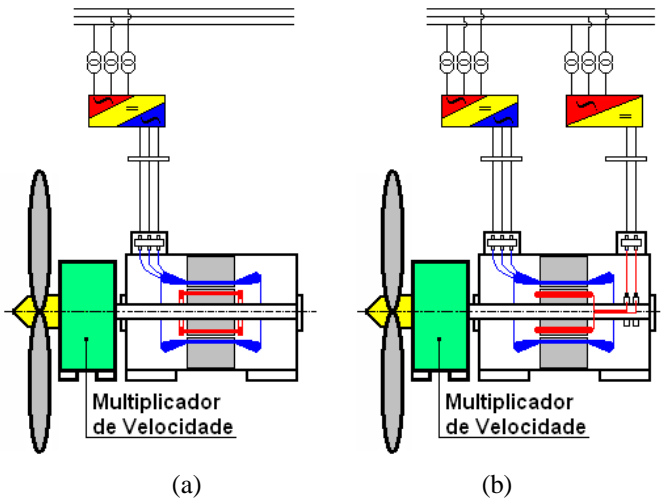


Figura 9- Grupo eólico-elétrico conectado à rede elétrica através de um conversor. a) Gerador assíncrono de gaiola. b) Gerador síncrono com excitação independente

Ambos operam com velocidades acima da turbina exigindo um multiplicador de velocidades. O link DC do conversor desacopla o gerador da rede permitindo uma grande flexibilidade na regulação de velocidade.

Esta filosofia de grupo eólico-elétrico apresenta uma boa eficiência na transformação de energia quando comparada com a do grupo comentado no parágrafo a). Aqui também a solução do grupo eólico-elétrico com gerador assíncrono apresenta a vantagem de ser robusto e de menor custo.

O gerador síncrono compensa os reativos através da excitação

independente. A demanda dos reativos necessários para excitar o gerador assíncrono provém do conversor, não exigindo um banco adicional de capacitores. Nas duas soluções o conversor CA/CA apresenta um grande impacto no custo, já que toda a potência, do grupo eólico-elétrico passa para a rede através do conversor.

Esta solução não apresenta limite de potência podendo ser empregada para qualquer potência respeitando apenas a critérios técnicos econômicos.

c) Gerador Assíncrono Trifásico de Rotor Bobinado Duplamente Alimentado com Escovas [GATDACE]

Nesta configuração o grupo eólico-elétrico é constituído de um gerador assíncrono trifásico com rotor bobinado duplamente alimentado através de escovas [GATDACE], conforme mostrado esquematicamente na figura 10.

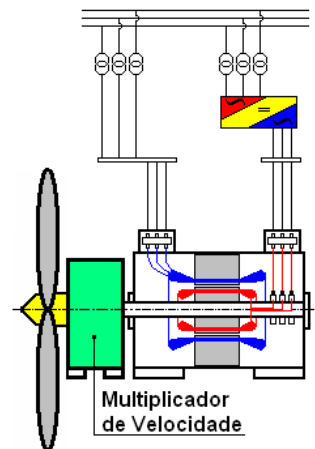


Figura 10- Grupo eólico-elétrico constituído de gerador assíncrono trifásico duplamente alimentado com escovas [GATDACE]

Este gerador permite uma ampla faixa de regulação de velocidade da ordem de $\pm 30\%$ em torno de sua rotação síncrona. O controle da velocidade é feito através do conversor conectado ao circuito rotórico. Devido a esta característica de regulação de velocidade, esta solução é utilizada nas regiões onde a velocidade dos ventos é bastante variável. Aqui também como nas soluções anteriores o gerador trabalha numa rotação acima da turbina, exigindo um multiplicador de velocidade, que normalmente é de vários estágios. Projetando-se o circuito rotórico adequadamente, o conversor de frequência para este grupo eólico-elétrico, necessita ser dimensionado para no máximo 30% da potência do grupo, devendo ser bidirecional para permitir o fluxo de potência nos dois sentidos, isto é, do gerador para a rede e da rede para o gerador, dependendo do ponto de operação. Esta é uma grande vantagem de custos, fazendo com que esta solução seja bastante competitiva. Esta filosofia apresenta uma grande eficiência na transformação eletromecânica da energia

dos ventos, porque devido a sua característica de regulação de velocidade que permite o aproveitamento energético em toda a faixa de velocidade dos ventos, ou seja, região I, II e III mostradas na figura 7. A outra grande vantagem, é devido ao fato do estator estar ligado diretamente à rede gerando uma onda senoidal pura. Dessa forma não introduz no sistema elétrico poluição harmônica, conseqüentemente não exige o uso de filtros harmônicos.

Esta configuração é largamente utilizada pela maioria dos fabricantes de grupos eólico-elétricos para potências da ordem de até 5MW, por apresentar custo inicial baixo, robustez e grande eficiência na transformação eletromecânica da energia dos ventos. Porém, apresenta dois pontos fracos que são o uso do multiplicador de velocidades e o uso de escovas, onde principalmente o segundo aumenta a manutenção do grupo.

d) Gerador Síncrono Trifásico conectado à rede através de um conversor sem multiplicador de velocidade

Nesta configuração o grupo eólico-elétrico é constituído de um gerador síncrono trifásico com excitação independente ou com rotor de ímãs permanentes, conforme mostrado esquematicamente na figura 11.

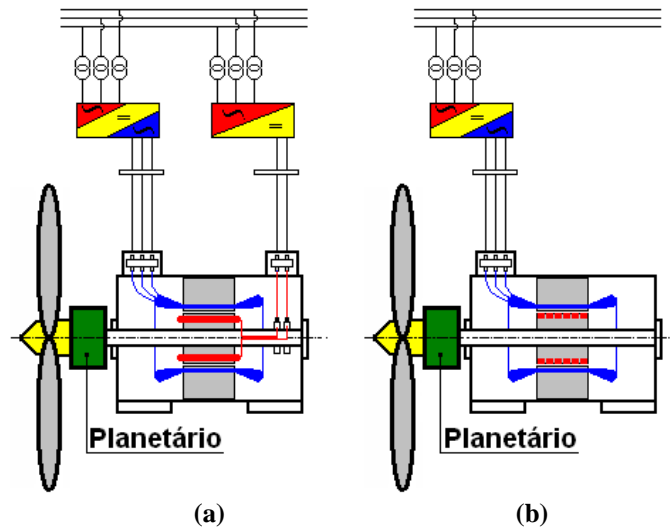


Figura 11- Grupo eólico-elétrico conectado à rede elétrica através de um conversor. a) Gerador síncrono com excitação independente b) Gerador síncrono de ímãs permanente.

Nesta solução tanto a configuração (a) como a (b) requerem um gerador de grande número de pólos gerando em frequência baixa e variável de acordo com a velocidade da turbina. O conversor desacopla o gerador da rede permitindo a conversão eletromecânica da energia numa ampla faixa de velocidade dos ventos, conforme mostrado na figura 7. Como os geradores apresentam um grande número de pólos, trabalham em rotação mais baixa não exigindo um multiplicador de

velocidade, mas apenas um planetário de um único estágio com custo e manutenção menor.

Na configuração (a) a regulação da tensão gerada é feita através da excitação independente, enquanto que na (b) não é permitida a regulação da tensão gerada devido ao rotor ser de ímãs permanentes. Porém a solução com ímãs permanentes no rotor apresenta um rendimento maior por que praticamente não tem perdas no rotor.

Esta filosofia é utilizada por alguns fabricantes de grupos eólico-elétricos para potências da ordem de até 5MW, por apresentar uma grande eficiência na transformação eletromecânica da energia dos ventos e por não necessitar do multiplicador vários estágios de velocidade. Porém apresenta um custo inicial elevado e necessita de filtros para evitar a poluição da rede através dos harmônicos provenientes do conversor.

3. - GERADOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO DUPLAMENTE ALIMENTADO COM ESCOVAS [GATDACE]

Fisicamente este gerador é constituído no estator por um enrolamento trifásico que está conectado diretamente à rede elétrica e no rotor por um enrolamento trifásico que está conectado ao conversor através de um conjunto de anéis coletores e escovas, ver figura 10.

O escorregamento s_p de uma máquina de indução é dado por:

$$s_p = \frac{f_{sp} - f_m}{f_{sp}} = 1 - p_{p1} \frac{f_m}{f_{p1}} \quad (3)$$

Onde:

f_{p1} é a frequência da rede de alimentação da máquina em Hz;

p_{p1} é o número de pares de pólos do enrolamento do estator;

$f_{sp} = \frac{f_{p1}}{P_{p1}}$ é rotação síncrona da máquina dada em Hz;

f_m é a frequência mecânica do eixo da máquina em Hz.

A frequência induzida f_{p2} no circuito rotórico, usando a equação (3) pode ser escrita como:

$$f_{p2} = s_p f_{p1} = f_{p1} - p_{p1} f_m \quad (4)$$

Isolando f_m na equação (4), obtemos:

$$f_m = \frac{f_{p1} - f_{p2}}{P_{p1}} \quad (5)$$

Como a frequência f_{p1} da rede de alimentação do estator é constante e o número de pares de pólos também não varia, baseado na equação (5) podemos controlar a rotação f_m da

máquina impondo adequadamente uma frequência f_{p2} ao circuito rotórico.
 Na figura 12(a) é mostrado a variação da frequência imposta f_{p2} em função da rotação mecânica f_m .

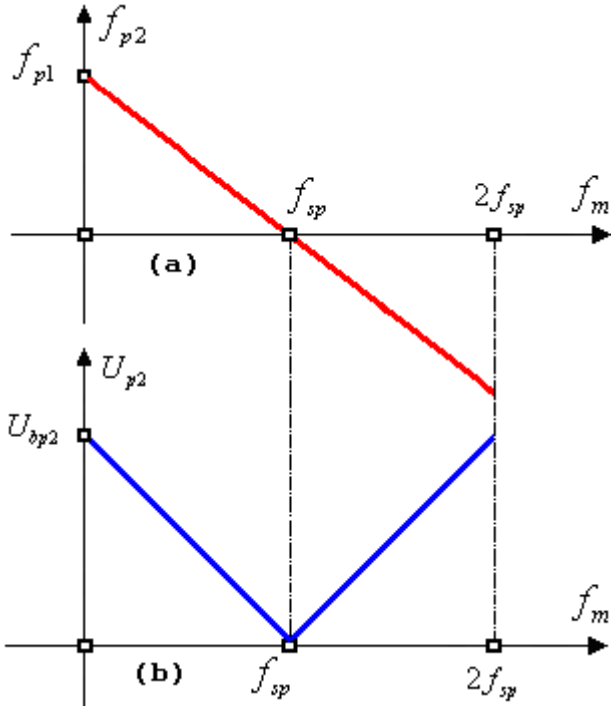


Figura 12- Variação da frequência induzida no circuito rotórico em função da rotação mecânica da máquina.

A figura 12 (b) mostra a variação do módulo da tensão nos terminais do enrolamento rotórico U_{p2} . O termo U_{bp2} representa a tensão nos terminais do circuito rotórico com o rotor bloqueado.
 O regime permanente do GATDACE pode ser analisado a partir do circuito equivalente clássico de uma máquina de indução [figura 13].

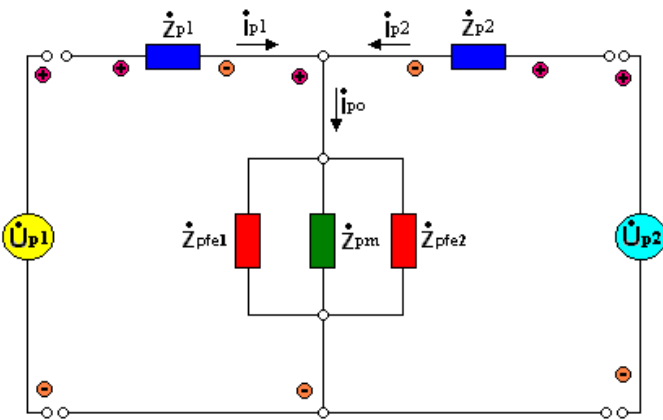


Figura 13 – Circuito Equivalente do GATDACE.

Onde os parâmetros do circuito equivalente são:

U_{p1} é a tensão de fase de alimentação no estator do gerador;
 U_{p2} é a tensão de fase de alimentação no rotor do gerador;
 i_{p1} é a Corrente de fase do estator do gerador;
 i_{p2} é a Corrente de fase do rotor do gerador;
 i_{p0} é a Corrente no ramo magnetizante do gerador;
 $Z_{p1} = R_{p1} + j X_{p1}$ é a impedância do enrolamento do estator;
 $Z_{p2} = R_{p2} + j X_{p2}$ é a impedância do rotor já referida ao estator;
 $Z_{pm} = o + j X_{pm}$ é a impedância do ramo magnetizante da máquina;
 $Z_{pfe1} = R_{pfe1} + j 0$ é a impedância de perdas no ferro do estator;
 $Z_{pfe2} = R_{pfe2} + j 0$ é a impedância de perdas no ferro do rotor já referida ao estator;
 Resolvendo o circuito equivalente desde $-1pu$ até $2pu$ da rotação síncrona, obtemos a performance da máquina em regime permanente neste intervalo. A figura 14 mostra uma curva de torque no eixo e corrente no estator do GATDACE.

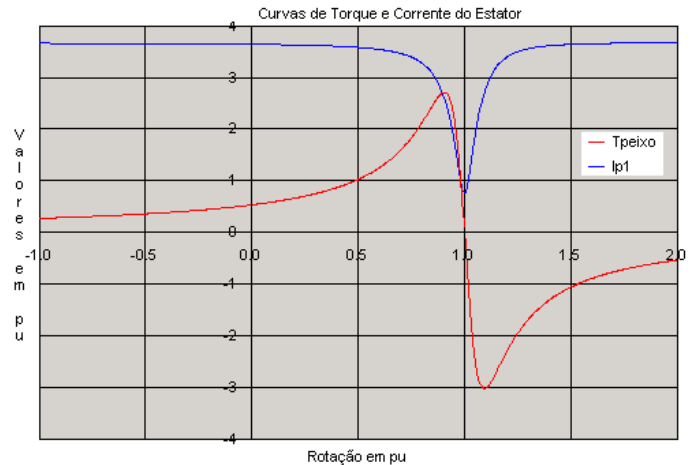


Figura 14 – Curva de torque e corrente no estator do GATDACE.

Observa-se claramente pela curva de desempenho da figura 14 que o comportamento do GATDACE corresponde ao comportamento de máquina de indução com a vantagem que o torque pode ser controlado pelo conversor impondo a tensão U_{p2} de frequência variável ao circuito rotórico conforme mostrado no gráfico da figura 12. O conversor conectado entre o circuito rotórico e a rede conforme mostrado esquematicamente na figura 10 deve ser bidirecional, isto é, de quatro quadrantes, permitindo o fluxo de potência em ambos os sentidos. Na figura 15 é mostrado esquematicamente o controle da GATDACE em duas malhas fechadas, uma de corrente e uma de rotação. Observa-se claramente que a tensão do rotor é desacoplada da rede através do link DC.

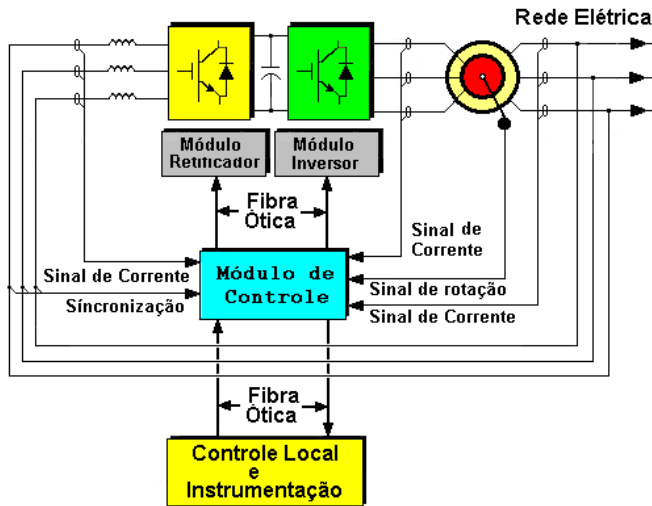


Figura 15 – Funcionamento esquemático do GATDACE e o conversor

O modelo analítico para o regime dinâmico é obtido pela transformação das equações escritas em variáveis da máquina em equações escritas no sistema de referência arbitrário. A figura 16 mostra o sistema de referência arbitrário do GATDACE.

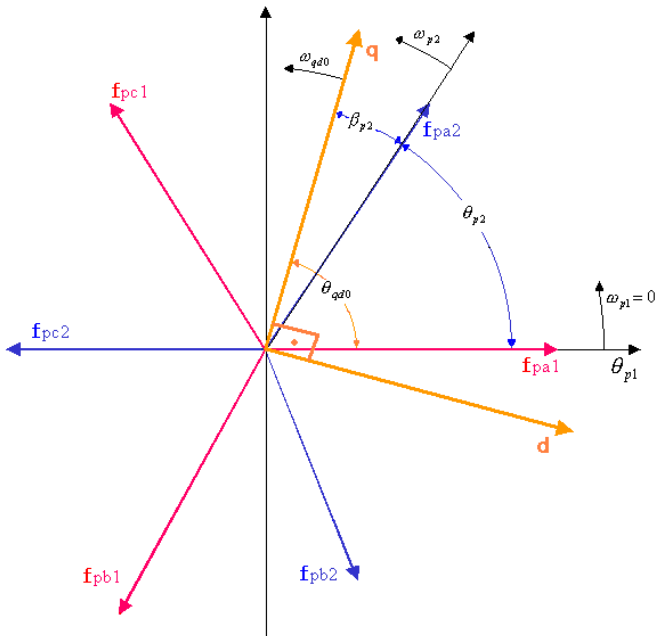


Figura 16 – Sistema de referência arbitrário para o GATDACE

O circuito do estator é considerado fixo ao eixo estacionário Q_{p1} e todas as variáveis do rotor são referidas ao estator. Na figura 16 os vetores f representam tensões ou correntes da máquina. O circuito rotórico gira com uma velocidade angular W_{p2} radianos elétricos por segundo; os eixos q e d giram com uma velocidade angular W_{qd0} radianos elétricos por

segundo e o deslocamento angular entre o circuito rotórico e o eixo arbitrário q é β_{p2} .

Transformando o sistema de equações diferenciais escritas em variáveis da máquina para o sistema de referência arbitrário, obtemos o conjunto de seis equações diferenciais dadas por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{u}_{pqd01} \\ \dot{u}_{pqd02} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{p1} & 0 \\ 0 & R_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pqd01} \\ i_{pqd02} \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} W_{qd0} & 0 \\ 0 & W_{qd0} - W_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{pqd01} \\ l_{pqd02} \end{bmatrix} + \\ &+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{pqd01} \\ l_{pqd02} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

No sistema de equações acima, os índices 1 e 2 são relacionados ao estator e ao rotor respectivamente. Os termos l_{pqd01} e l_{pqd02} representam os enlaces de fluxo, i_{pqd01} e i_{pqd02} as correntes, R_{p1} e R_{p2} as resistências, u_{pqd01} e u_{pqd02} as tensões, do estator e rotor respectivamente, W_{qd0} representa a velocidade dos eixos de referência arbitrário, W_{p2} a Velocidade do eixo do enrolamento do rotor. Todos os parâmetros do rotor na equação (6) estão referidos ao estator. A equação dinâmica que rege o movimento da máquina pode ser escrita como:

$$T_{Externo} = T_{peixo} - J_{Total} \cdot \frac{d}{dt}(W_m) - B_{av} \cdot W_m \quad (7)$$

O termo J_{Total} representa a inércia total do sistema dado pela soma da inércia do gerador e das partes externas acopladas, B_{av} representa o coeficiente de atrito viscoso do sistema, $T_{Externo}$ representa o torque externo aplicado ao eixo do gerador.

A velocidade angular mecânica W_m é dada por:

$$W_m = \frac{d}{dt}(q_m) \quad (8)$$

O sistema de equações diferenciais dadas por (6), (7) e (8) são resolvidas simultaneamente pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, obtendo assim o comportamento dinâmico do GATDACE. Nas figuras 17.a, 17.b e 17.c estão mostrados os torques, a corrente no rotor e a velocidade Mecânica respectivamente considerando que o GATDACE é acionado por um torque externo.

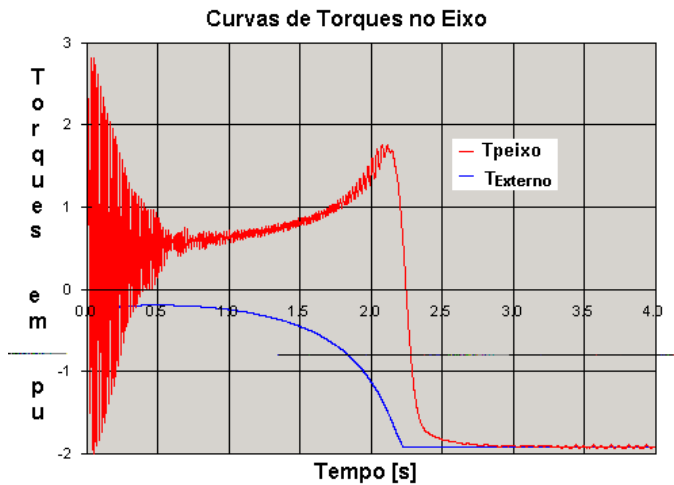


Figura 17.a- Torque no eixo do GATDACE

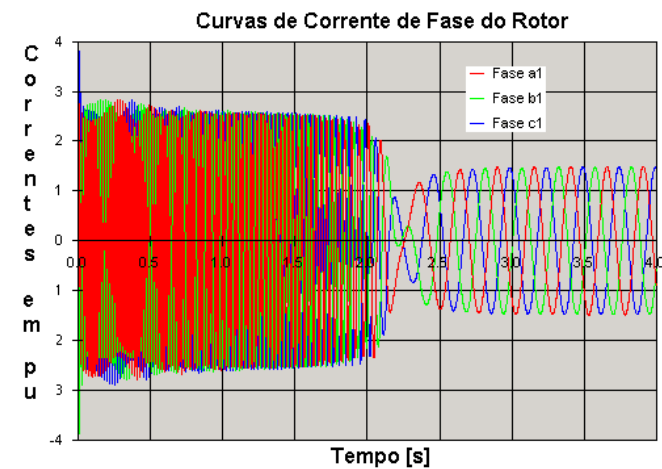


Figura 17.b- Correntes de fase no rotor do GATDACE

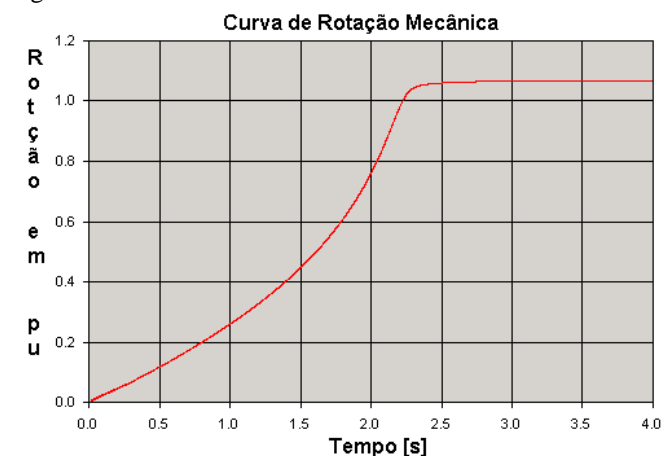


Figura 17.c- Rotação mecânica do GATDACE

Conforme já comentado no parágrafo 2.c o GATDACE é uma solução largamente utilizada pela maioria dos fabricantes de grupos eólico-elétricos até a faixa de potência de 5MW, devido a sua grande flexibilidade de controle e baixo custo, porém necessitam de um multiplicador de vários estágios de velocidade e o sistema de escovas e porta escovas os quais são componentes que requerem manutenção.

4. - GERADOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO DUPLAMENTE ALIMENTADO SEM ESCOVAS [GATDASE]

No parágrafo 2 mostramos as diversas tecnologias utilizadas atualmente na fabricação dos grupos eólico-elétricos. As soluções com máquinas síncronas apresentam custos mais elevados e as soluções com máquinas assíncronas apresentam custos menores, porém, mais manutenção, devido a necessidade do multiplicador de velocidades e do sistema de escovas. O maior problema devido as escovas é a necessidade de inspeções periódicas ao gabinete das mesmas para garantir que o funcionamento esteja se processando adequadamente. Esta inspeção é onerosa devido ao fato do número de grupos eólico-elétricos em parques eólicos ser grande e o acesso ao gerador no topo da torre nem sempre ser fácil, principalmente em aplicações onde o parque eólico se localiza no mar [Offshore]. Os geradores que necessitam de escovas apresentam um outro problema que é a redução do nível de isolamento provocado pelo pó das escovas proveniente do desgaste das mesmas. O desgaste das escovas é mais acentuado quando não há uma formação adequada da pátina que é uma película de grafite que deve se formar na superfície do anel coletor onde as escovas formam o contato. A formação da pátina é fortemente influenciada pelas condições ambientais e de carga do gerador. Como na geração eólica a carga, isto é, potência gerada, varia praticamente de zero até o valor nominal em função da velocidade dos ventos a pátina pode ficar prejudicada, levando ao desgaste mais rápido das escovas.

Uma alternativa para eliminar os problemas decorrentes do uso de escovas é o Gerador Assíncrono Trifásico Duplamente Alimentado Sem Escovas [GATDASE].

A WEG, em conjunto com a Universidade Federal de Santa Catarina [UFSC], elaboraram um projeto no sentido de desenvolver o GATDASE. Este gerador é uma máquina assíncrona trifásica onde o núcleo magnético do estator compartilha dois enrolamentos trifásicos. Ao enrolamento de potência chamaremos de enrolamento **principal** e é conectado diretamente à rede elétrica. O enrolamento de controle ao qual chamaremos de enrolamento **auxiliar** é ligado à rede através do conversor de controle vetorial regenerativo de quatro quadrantes. A figura 18 mostra esquematicamente o GATDASE. O Enrolamento principal com p_p pares de pólos

está representado em cor azul e o auxiliar com p_a pares de pólos em cor vermelha. O sistema mostrado na figura 18 permite controlar o torque, a velocidade e o fator de potência do enrolamento principal através do conversor conectado no enrolamento auxiliar.

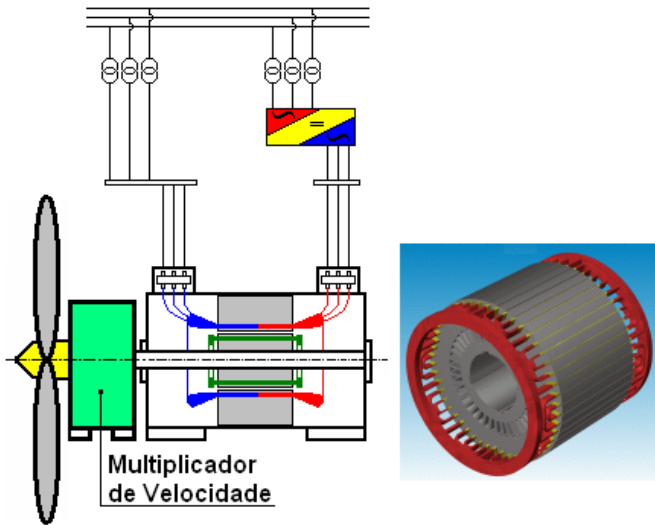


Figura 18- Grupo eólico-elétrico constituído de gerador assíncrono trifásico duplamente alimentado sem escovas [GATDASE]

A gaiola especial mostrada na figura 18 é projetada com loop's internos para reduzir o conteúdo harmônico das ondas de induções no entreferro geradas pela gaiola [4], [5]. A vantagem deste sistema é de ser compacto e não necessitar de escovas. A performance desta máquina depende fortemente da construção da gaiola especial do rotor [6], [7], [8]. A melhor performance é obtida quando as barras do rotor geram N_{p2} pólos que acoplam eletromagneticamente os enrolamentos principal e auxiliar produzindo torques aditivos. Nesta condição dizemos que a máquina está operando na condição de CASCATA MAIS, onde N_{p2} é dado por:

$$N_{p2} = p_p + p_a \quad (9)$$

A equação (9) nos fornece a condição de como escolher o número de barras da gaiola do rotor na condição cascata mais. Para minimizar o conteúdo harmônico das ondas de induções no entreferro geradas pela gaiola, cada pólo da gaiola pode ser construído não só por uma barra, mas sim por vários loop's conforme mostrado na figura 18.

A onda fundamental da indução no entreferro gerada pelo enrolamento principal induz uma densidade de corrente na gaiola com frequência f_{p2} calculada por:

$$f_{p2} = f_{p1} - p_p f_m \quad (10)$$

Onde f_{p1} é a frequência do enrolamento principal e f_m a frequência mecânica do eixo ambas em Hertz.

No enrolamento auxiliar é induzida uma densidade de corrente com a sequência de fase negativa com a frequência f_{a1} em Hertz, dada por:

$$f_{a1} = -[f_p - (p_p + p_a)f_m]. \quad (11)$$

Isolando a frequência mecânica do eixo f_m em hertz da equação (11), obtemos:

$$f_m = \frac{f_{p1} + f_{a1}}{p_p + p_a} \quad (12)$$

A equação (12) mostra que é possível controlar a velocidade do GATDASE variando a frequência da tensão imposta no enrolamento auxiliar [3]. O conversor de frequência conectado ao enrolamento auxiliar, conforme mostrado na figura 18 pode variar não só a frequência, mas também, a amplitude e a fase da tensão imposta, controlando desta maneira o torque e a rotação da máquina.

A figura 19 mostra a variação das frequências das correntes induzidas na gaiola f_{p2} e no enrolamento auxiliar f_{a1} em função da frequência mecânica f_m no eixo da máquina.

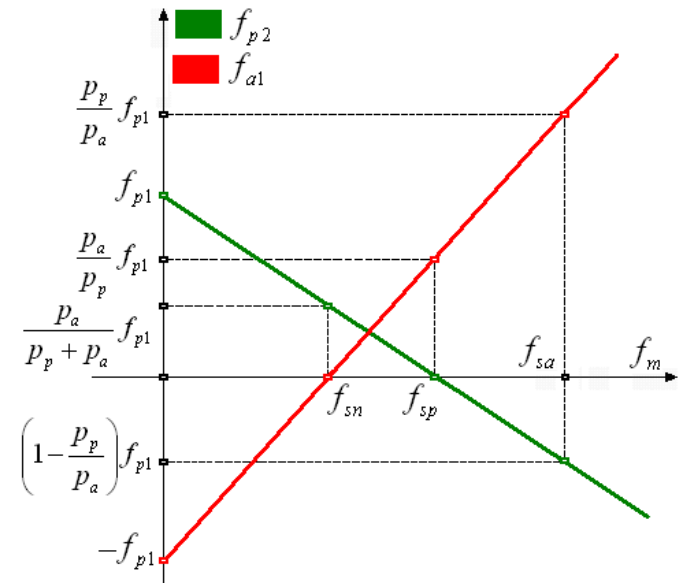


Figura 19- Variação da frequência induzida na gaiola e no enrolamento auxiliar em função da rotação mecânica da máquina.

Quando a frequência da corrente induzida no enrolamento auxiliar f_{a1} é nula, a máquina está rodando na sua frequência síncrona natural f_{sn} que de acordo com a equação (12) pode ser escrita como [6], [7], [8]:

$$f_{sn} = \frac{f_{p1}}{p_p + p_a} \quad (13)$$

No ponto da rotação síncrona natural a frequência e a amplitude da corrente induzida no enrolamento auxiliar são nulas.

A rotação síncrona da máquina principal f_{sp} é dada por:

$$f_{sp} = \frac{f_{p1}}{p_{p1}} \quad (14)$$

A rotação síncrona da máquina auxiliar f_{sa} é dada por:

$$f_{sa} = \frac{f_{p1}}{p_{a1}} \quad (15)$$

O comportamento em regime permanente é obtido usando o circuito equivalente da máquina considerando a condição de operação em cascata mais, mostrado na figura 20. Com este modelo é possível analisar a máquina operando em regime permanente tanto como motor ou como gerador para qualquer condição de carga com fator de potência indutivo ou capacitivo.

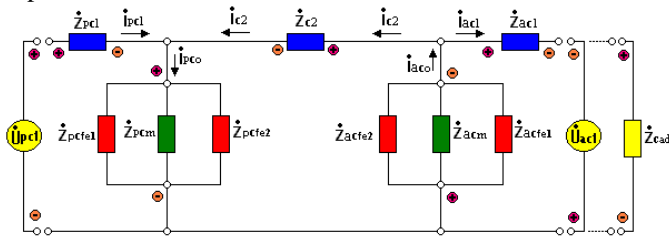
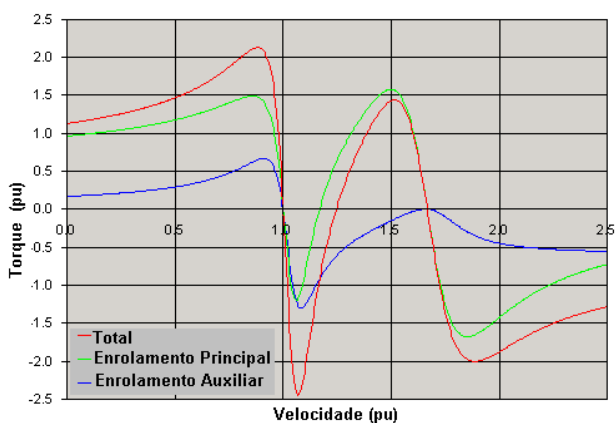


Figura 20- Circuito equivalente do GATDASE em cascata mais

Na figura 20 os sub-índices “p” e “a” estão relacionados com o enrolamento principal e auxiliar respectivamente. As impedâncias do circuito equivalente são Z_{-c1} , a impedância do estator, Z_{-c2} , a impedância do rotor, Z_{-cfe1} , a impedância de perdas no ferro do estator, Z_{-cfe2} a impedância de perdas no ferro do rotor e Z_{-cm} a impedância magnetizante. Z_{cad} é a impedância externa conectada em série com o enrolamento auxiliar. A tensão U_{acl} representa a tensão imposta pelo conversor estático. Resolvendo o circuito equivalente mostrado na figura 20 obtemos o comportamento do GATDASE em regime permanente.

A figura 21 mostra as curvas de torque em regime permanente. A curva azul representa o torque desenvolvido pelo enrolamento auxiliar (8 pólos), a curva verde o torque do enrolamento principal (12 pólos), e a vermelha representa o torque total, isto é, a soma dos dois torques comprovando que nesta construção de gaiola os torques são aditivos, ou seja a máquina opera em cascata mais.



Figuras 21 – Curvas de torques em regime permanente

No ponto de velocidade de 1pu, os três torques passam por zero indicando que a máquina se encontra na rotação síncrona natural f_{sn} mostrada na figura 19. Em 1,667pu de rotação, novamente os três torques passam por zero. Neste ponto temos a rotação síncrona da máquina principal f_{sp} conforme

mostrado na figura 19. Na figura 21 é também possível observar que no intervalo de 0 até 1pu de velocidade a máquina se comporta como motor, os três torques são positivos. De 1pu até 1,667pu de velocidade a máquina se comporta primeiro como gerador, torques negativos, até que o torque da máquina principal se torna positivo novamente. Então o torque total se torna positivo e a máquina se comporta como motor novamente. Para velocidades acima de 1,667pu os três torques são negativos novamente e a máquina trabalha como gerador uma vez mais.

A figura 22 mostra um conjunto de curvas de torque em regime permanente a t_e 2,5 pu de velocidade com um reostato de 5 tap's conectados em série com o enrolamento auxiliar.

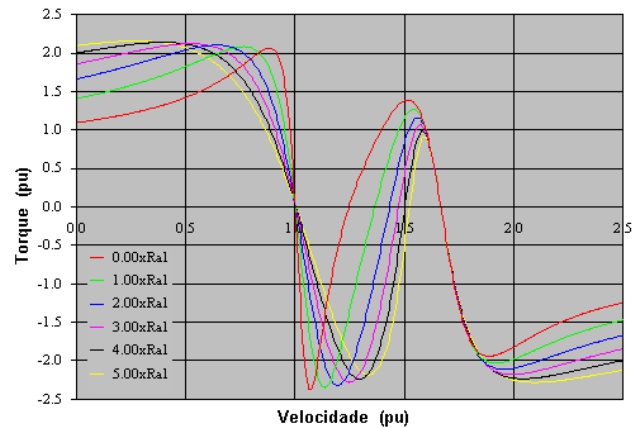


Figura 22- Curvas de torque total em regime permanente com resistência externa em série com o enrolamento auxiliar.

O GATDASE pode trabalhar perfeitamente como motor ou como gerador quando controlado por um conversor estático, conforme mostrado na figura 18.

O modelo dinâmico do GATDASE é obtido pela transformação das equações em variáveis da máquina para o sistema de referência arbitrário. A figura 23 mostra o sistema de referência arbitrário usado na análise dinâmica da GATDASE.

O enrolamento principal do estator é considerado fixo ao eixo estacionário Q_{p1} e todas as variáveis da máquina, como do rotor e do enrolamento auxiliar são referidas ao enrolamento principal do estator. Na figura 23 os vetores f representam as tensões e correntes da máquina. O circuito do rotor gira com uma velocidade angular W_{p2} . Os eixos q e d giram com uma velocidade W_{qd0} e o deslocamento angular do circuito do rotor e o eixo arbitrário é b_{p2} .

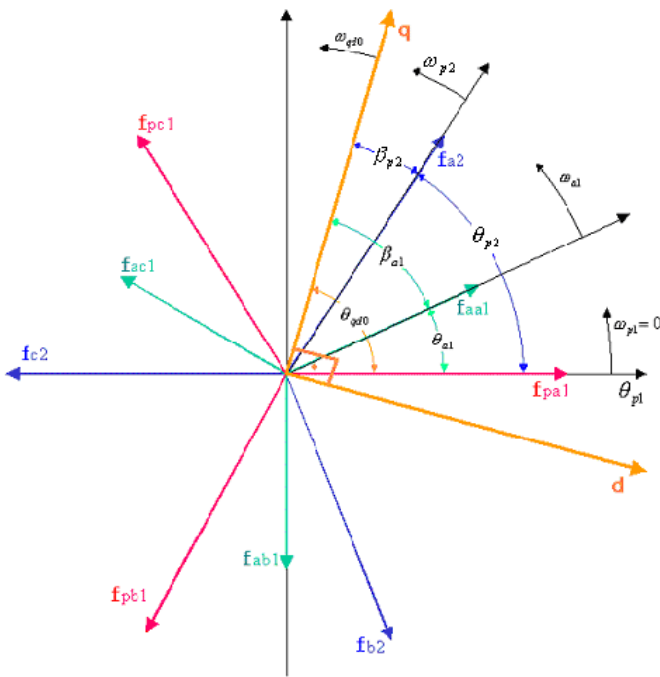


Figura 23- Sistema de referência arbitrário para o GATDASE

Sabemos que o enrolamento auxiliar está fisicamente fixo ao estator, isto é, ao eixo estacionário q_{p1} , mas para considerar o efeito cascata no nosso modelo dinâmico, somos forçado a admitir que o eixo do enrolamento auxiliar q_{a1} gira com uma velocidade angular W_{a1} dada por:

$$W_{a1} = (p_{p1} + p_{a1})W_m \quad (16)$$

Onde W_m representa a velocidade mecânica do eixo da máquina, p_{p1} e p_{a1} o número de pares de pólos do enrolamento principal e auxiliar respectivamente.

Transformando o sistema de equações diferenciais escritas em variáveis da máquina para o sistema de referência arbitrário, obtemos o conjunto de nove equações diferenciais dadas por:

$$\begin{bmatrix} u_{pqd01} \\ 0 \\ u_{aqd01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{p2} + R_{a2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{a1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pqd01} \\ i_{pqd02} \\ i_{aqd01} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{qd0} & 0 & 0 \\ 0 & W_{qd0} - W_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & W_{qd0} - W_{a1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{pqd01} \\ l_{pqd02} \\ l_{aqd01} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{pqd01} \\ l_{pqd02} \\ l_{aqd01} \end{bmatrix} \quad (17)$$

No sistema de equações acima, os índices 1 e 2 são relacionados ao estator e ao rotor respectivamente. Os termos l_{pqd01} e l_{pqd02} representam os enlaces de fluxo, i_{pqd01} e i_{pqd02} as correntes, R_{p1} e R_{p2} as resistências, u_{pqd01} e u_{pqd02} as tensões, do estator e rotor respectivamente, W_{qd0} representa a velocidade dos eixos de referência arbitrário, W_{p2} a Velocidade do eixo do enrolamento do rotor, W_{a1} a velocidade do eixo do enrolamento auxiliar do estator. Todos os parâmetros do rotor e do enrolamento auxiliar do estator na equação (17) estão referidos ao enrolamento principal do estator.

Associando as equações dinâmicas (7) e (8) às nove equações diferenciais dadas por (17) e resolvendo o sistema pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem obtemos o comportamento dinâmico da máquina.

A figura 24 mostra o torque dinâmico em função do tempo obtido pela simulação de uma aceleração do GATDASE, acima da velocidade síncrona natural, através de um torque externo aplicado ao eixo da máquina.

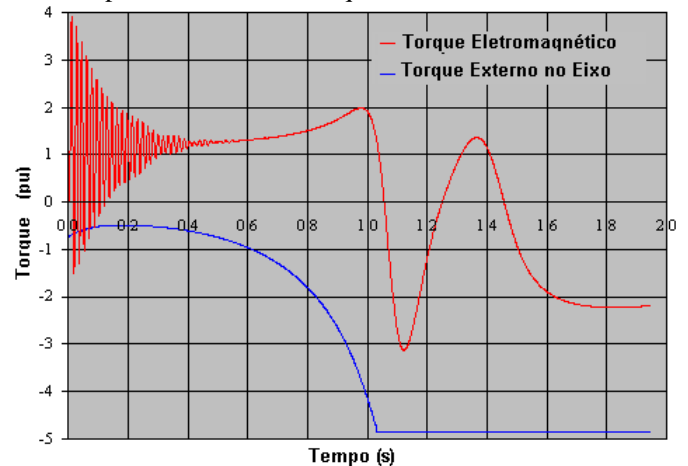


Figura 24- Torque dinâmico da GATDASE

Podemos identificar na figura 24 o instante em que o rotor passa pela velocidade síncrona natural $t \cong 1,08s$ e pela rotação síncrona do enrolamento principal $t \cong 1,45s$. Estes pontos característicos do GATDASE já foram identificados na figura 21 para o regime permanente.

4.1 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar o modelo em regime permanente e o modelo dinâmico, primeiramente foi criado um modelo em elementos finitos. Os resultados comparativos dos três modelos foram analisados na referência [6].

Como segunda etapa de validação dos modelos foi construído um protótipo de 15kW-440V/760V-60Hz com 12 pólos no enrolamento principal e 8 pólos no enrolamento auxiliar. Os ensaios foram realizados com o enrolamento principal conectado em Y-760V-60Hz. O enrolamento auxiliar também conectado em Y, com os terminais externos em curto circuito ou ligados em série com uma resistência externa.

As tabelas I e II mostram os resultados teóricos e experimentais do GATDASE operando como motor e como gerador com o enrolamento principal alimentado por 760V e o enrolamento auxiliar sem resistência externa $R_{ad} = 0,00R_{a1}\Omega$ e os terminais em curto circuito. A tabela I apresenta os valores para 100% de carga e a tabela II para valores de 75% de carga.

Tabela I – Valores para 100% de carga

	Motor		Gerador	
	Teórico	Ensaiado	Teórico	Ensaiado
Rotação (rpm)	351,3	355,1	370,8	366,3
Torque (N.m)	433,6	403,0	609,0	578,0
I_{p1} (A)	43,1	48,1	51,5	59,4
Fator Potência	0,37	0,330	0,22	0,20
Rendimento (%)	74,1	74,2	63,4	67,6

Tabela II – Valores para 75% de carga

	Motor		Generator	
	Teórico	Ensaiado	Teórico	Ensaiado
Rotação (rpm)	354,3	356,6	368,3	365,9
Torque (N.m)	308,7	300,0	474,8	500,0
I_{p1} (A)	41,1	46,4	47,5	55,7
Fator Potência	0,31	0,270	0,18	0,16
Rendimento (%)	69,1	68,9	61,4	58,7

O ensaio dinâmico é realizado aplicando um torque negativo ao eixo do GATDASE. Este torque imposto acelera a máquina até aproximadamente 2,5 vezes a rotação síncrona natural.

A medição do torque é feita através de um sensor de torque rotativo instalado entre o eixo do gerador e o eixo do dinamômetro, cujo sinal é registrado diretamente num ploter analógico.

Analisando os resultados experimentais com os teóricos, observamos que eles apresentam uma boa concordância. A figura 25 mostra os valores medidos de corrente no enrolamento principal em função da velocidade com o enrolamento auxiliar em curto.

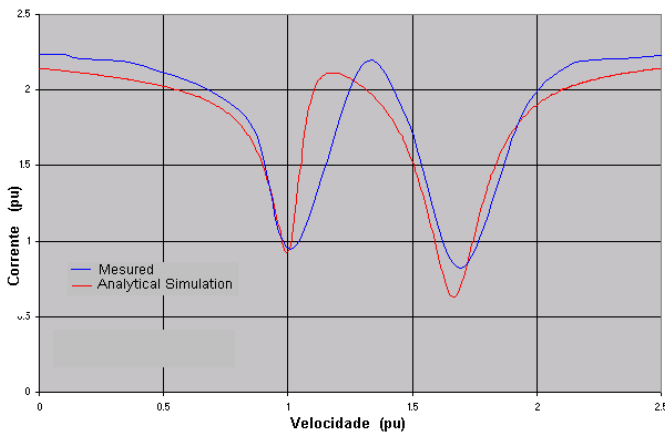


Figura 25- Corrente no enrolamento principal com o auxiliar em curto $R_{ad} = 0,00R_{a1}\Omega$

Na figura 26 é mostrado o valor medido de corrente no enrolamento principal com resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar.

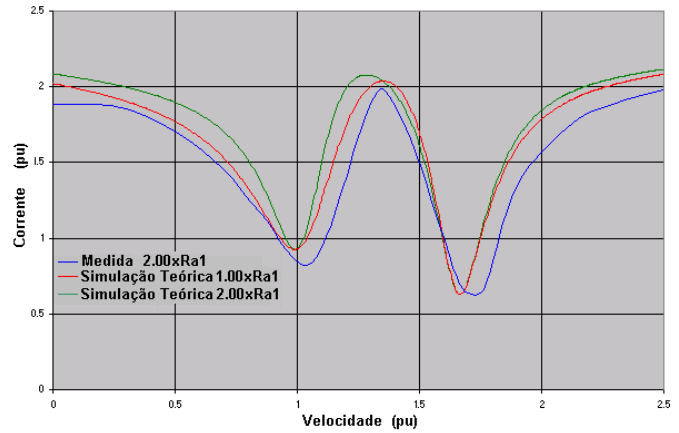


Figura 26- Corrente no enrolamento principal para uma resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar $R_{ad} = 2,00R_{a1}\Omega$

A figura 27 mostra os dados medidos de potência em função da velocidade no enrolamento principal sem resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar.

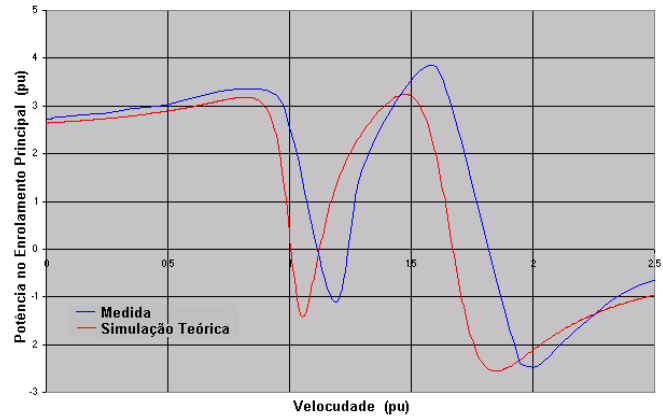


Figura 27 Potência no enrolamento principal com o auxiliar em curto $R_{ad} = 0,00R_{a1}\Omega$

A figura 28 mostra os dados medidos de potência em função da velocidade no enrolamento principal com resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar.

Analisando as figuras de 25 a 28 notamos que as curvas medidas estão deslocadas para a direita quando comparadas com as curvas teóricas obtidas pelo regime permanente. Este fato é causado pelo método de ensaios dinâmicos. Este deslocamento não é observado nas figuras 29 e 30 porque as curvas medidas são comparadas com as teóricas obtidas pelo modelo dinâmico.

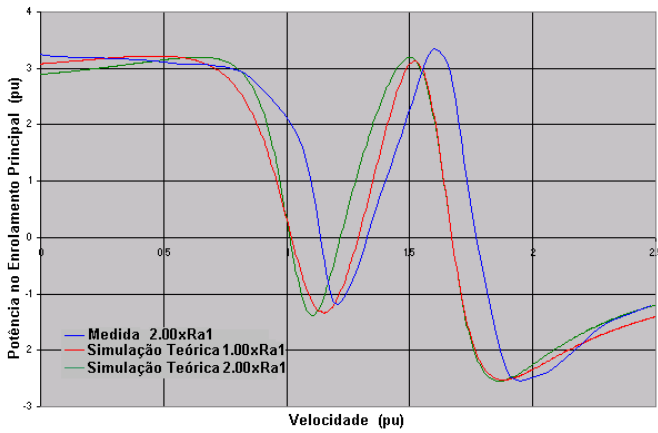


Figura 28- Potência no enrolamento principal para uma resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar $R_{ad} = 2,00R_{a1}\Omega$.

A figura 29 mostra o torque medido em função da velocidade, sem resistência externa, conectada ao enrolamento auxiliar. Comparando os resultados experimentais com o teórico, obtido pela simulação dinâmica, observamos uma boa concordância.

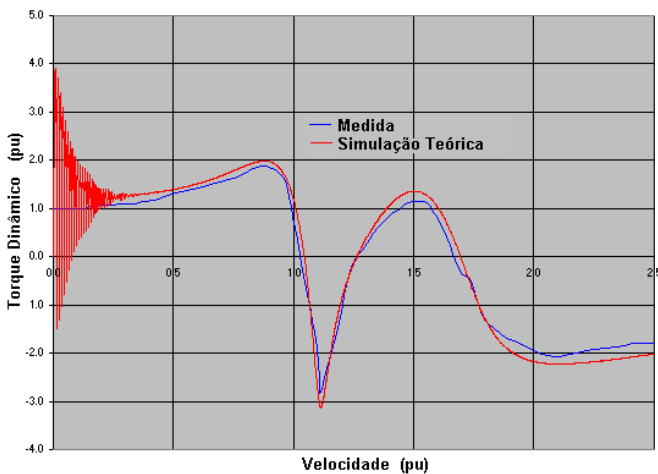


Figura 29- Torque dinâmico sem resistência externa.

Na figura 30 é mostrado o torque medido com uma resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar, comparando com a simulação teórica. Nesta figura também se observa a boa concordância entre os valores medidos e calculados.

A tabela III mostra alguns valores de performance do protótipo medidos com 50%, 75% e 100% de carga como motor e como gerador com uma resistência externa $R_{ad} = 2,00R_{a1}\Omega$ conectada ao enrolamento auxiliar.

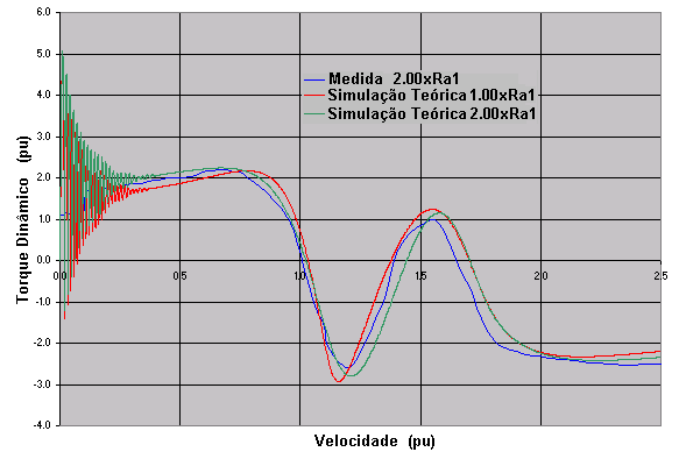


Figura 30- Torque dinâmico com resistência externa conectada ao enrolamento auxiliar $R_{ad} = 2,00R_{a1}\Omega$.

Tabela III - Valores Medidos com resistência externa $R_{ad} = 2,00R_{a1}\Omega$

	Motor			Gerador		
	50%.	75%	100%t	50%.	75%	100%
Rotação (rpm)	357,0	353,9	349,6	399,5	412,7	424,7
Torque (N.m)	200,0	304,0	410,0	389,0	508,0	598,0
I_{p1} (A)	44,8	46,4	48,9	52,3	56,5	61,6
Fator Potência	0,223	0,284	0,343	0,12	0,17	0,21
Rendimento (%)	57,2	64,3	67,2	46,1	51,2	56,3

Analisando todos os dados de performance calculados e medidos fica bem claro que a única desvantagem do GATDASE é o baixo fator de potência. Este valor baixo é consequência direta do baixo número de barras (pólos) N_{p2} da gaiola do rotor. Este número de barras é dado pela equação (9) e é a condição necessária para a máquina funcionar em Cascata MAIS.

O baixo fator de potência é corrigido quando a máquina passa a ser controlada pelo conversor.

5.- CONCLUSÃO

Neste artigo apresentamos um resumo sobre a evolução histórica da conversão eletromecânica da energia dos ventos em energia elétrica. Mostramos também que a tecnologia de fabricação das turbinas eólicas evoluiu muito nas duas últimas décadas, aumentando a sua capacidade e eficiência na captação da energia do vento. Junto com esta evolução ocorreu a aplicação dos modernos métodos de controle de velocidade e torque, tanto da turbina quanto do gerador, ao projeto permitindo a fabricação de grupos eólico-elétricos de maior capacidade, reduzindo drasticamente os custos por quilowatt instalado, confirmando desta maneira a energia eólica como uma alternativa limpa e viável de energia.

Mostramos também as diversas tecnologias de gerador elétrico atualmente aplicados na geração eólica de energia elétrica. Comentamos as vantagens e desvantagens de cada solução e realçamos que a solução com a MATDACE apresenta o menor

custo, porém a desvantagem do uso de escovas. O uso de escovas implica em vários problemas, conforme comentado no início do parágrafo 4. O estudo do GATDASE pode se constituir numa boa alternativa para aplicação em geração eólica, principalmente se levarmos em conta o fato de não necessitar de escovas e permitir uma grande flexibilidade no controle do torque e na velocidade, numa ampla faixa de $\pm 30\%$ em torno de sua velocidade síncrona natural através do conversor. Os resultados experimentais medidos no protótipo de 15kW fabricado mostraram que os modelos teóricos aqui apresentados, ou seja, o modelo em regime permanente, o modelo em regime dinâmico e o modelo em elementos finitos [6], são ferramentas satisfatórias para se fazer o projeto e análise do comportamento do GATDASE. Apesar da grande vantagem apresentada pelo gerador aqui analisado, o estudo teórico e as medições experimentais mostraram que a limitação desta solução é o seu baixo fator de potência, aumentando a corrente nas condições de operação e como consequência aumentando as perdas Joules nos condutores reduzindo o rendimento da máquina. O rendimento é uma característica de performance muito importante que pode ser melhorada durante a fase de projeto, bastando para isto dimensionar os condutores do circuito estático e rotórico adequadamente.

Quanto ao fator de potência baixo, visto pela rede, pode ser corrigido dimensionando adequadamente um banco de capacitores no link CC do conversor. Utilizando a técnica do controle vetorial é possível, através do conversor, fazer o sistema gerador – conversor operar com o fator de potência desejado.

Para podermos ser mais conclusivos com relação à aplicação do GATDASE, em estações eólicas reais, é necessário aprofundar-se mais no controle da máquina. Neste sentido o trabalho em conjunto da WEG com a UFSC prevê mais duas etapas importantes:

1- Fabricação de um novo protótipo de 75kW.

Este protótipo tem como objetivo validar em detalhes os critérios de projeto, visando melhorar a performance, principalmente o fator de potência. De posse dos resultados experimentais do protótipo analisar e comparar com a performance obtida através dos modelos analíticos.

2- Elaborar e Implementar o Algoritmo de controle vetorial da máquina

O objetivo desta fase do trabalho é estudar teoricamente e experimentalmente, através da fabricação de um conversor protótipo, o controle vetorial do protótipo do gerador de 75kW em fabricação. O objetivo principal do algoritmo é fazer o controle e corrigir o fator de potência do sistema.

Os resultados obtidos até agora mostram que o GATDASE pode ser uma boa alternativa para o uso em geração de energia elétrica através de turbinas eólicas, faltando para isto apenas que o conversor corrija o fator de potência.

6. -REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Atlas Eólico – Estado do Rio de Janeiro-Secretaria de Estado de energia.
- [2] Yuefeng Liao. “Design of a Brushless Doubly-Fed Induction Motor for Adjustable Speed Drive Applications”. GE - Corporate Research Development Center, Building K1 - EP118, P.O. Box 8, Schenectady, NY 12301, USA.
- [3] Ruqi Li , Spée R., Wallace A.K., and Alexander G.C.: “Synchronous Drive Performance of Brushless Doubly-Fed Motors”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, NO 4, July/August 1994.
- [4] Williamson S., Ferreira A.C., Wallace A.K.: “Generalized Theory of Brushless Doubly-Fed Machine - Part 1: Analysis”. IEE Proc-Elect. Power Appl. Vol 144, No 2, March 1997.
- [5] Williamson S., Ferreira A.C., Wallace A.K.: “Generalized Theory of Brushless Doubly-Fed Machine . Part 2: Model verification and Performance”. IEE Proc.-Elect. Power Appl. Vol 144, No 2, March 1997.
- [6] F. Rüncos , R. Carlson, A.M.Oliveira , P. Kuo-Peng , N. Sadowski, “Performance Analysis of a brushless Double Fed Cage Induction Generator ” . Nord Wind Power Conference, 1-2 March, 2004 , Chalmers University of Technology .
- [7] F. Rüncos ,R. Carlson, A.M.Oliveira , P. Kuo-Peng , N. Sadowski, C.G.C. Neves. “Vibration Analysis of a Doubly-Feed Twin Stator Cage Induction Generator” . Speedam , Italy , June 2004.
- [8] F. Rüncos, A. M. Oliveira, P. Kuo-Peng, N. Sadowski, R. Carlson. “Performance Analysis of a Double Fed Twin Stator Cage Induction Generator”, 6th International Conference on Electrical Machines [ICEM] , Institute of Mechatronics and Information Systems, Technical University of Lodz, Poland – 5-8,September 2004, Cracow, Poland.
- [9] WindPower Monthly – January 2004.