

MODELAGEM E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO EÓLICA DOTADO DE GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃ PERMANENTE UTILIZANDO A PLATAFORMA ATP

D. A. Caixeta¹, G. C. Guimarães¹, M. L. R. Chaves¹, J. C. de Oliveira¹, G. H. B. Cunha¹, A. F. Bonelli²

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia-MG (Brasil).

² LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Centro politécnico da UFPR, Curitiba-PR (Brasil)

Endereço de contato: daniel_engeletrica@yahoo.com.br

Resumo - Nas últimas décadas a geração eólica vem ganhando grande destaque em diversas partes do mundo. Portanto, é necessário o desenvolvimento de estudos a respeito do comportamento dinâmico dos modernos aerogeradores. Neste sentido, este artigo apresenta uma modelagem matemática e computacional através de técnicas no domínio do tempo de um sistema de conversão eólica alimentando uma carga isolada. A eficácia do modelo construído é verificada através do software ATP por meio de resultados de simulações computacionais de turbulências do vento.

Palavras-Chave – ATP, Energia Eólica, Rajada, Rampa, Simulação Computacional.

MODELING AND ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF A WECS EQUIPPED WITH PMSG USING ATP

Abstract - In recent decades wind energy has gained great prominence in various parts of the world. Therefore, it is necessary to develop studies on the dynamic behavior of modern wind turbines. This paper presents a mathematical and computational modeling through time domain techniques of a wind energy conversion system feeding an isolated load. The effectiveness of the constructed model is verified through software ATP by results of computer simulations of wind turbulences.

Keywords – ATP, Computer Simulations, Gust, Ramp, Wind Energy.

I. INTRODUÇÃO

A energia eólica, por ser considerada uma fonte limpa, renovável e de baixo custo de implantação e operação, tem representado um importante papel no processo de expansão das malhas energéticas de diversos países, chegando a inclusive a representar 25% do crescimento total da capacidade energética mundial ao final de 2009 [1].



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

Acerca dos geradores eólicos modernos, as máquinas síncronas excitadas por ímã permanente (PMSG, do inglês “Permanent Magnet Synchronous Generator”) têm sido freqüentemente empregadas em sistemas de conversão eólica de velocidade variável pois, dentre outras vantagens: dispensam a instalação de caixa de engrenagens, diminuindo assim peso, custo e manutenção do equipamento; apresentam alta confiabilidade e pouca emissão de ruído durante a operação sob baixas velocidades.

Além disso, quando conectadas a um sistema eletrônico de conversão de freqüência, dispensam a utilização de reguladores de tensão e de velocidade ligados ao gerador síncrono e permitem o controle de potência ativa e reativa injetada na rede mediante o uso de dispositivo eletrônico conversor de freqüência [2].

Este trabalho visa apresentar a modelagem matemática e computacional de um real sistema de conversão de energia eólica conectado a uma carga isolada no *Alternative Transients Program* (ATP). De modo a verificar a eficácia do modelo implementado, estudos computacionais são efetuados tanto em condição de regime permanente quanto sob alterações na velocidade do vento.

II. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DO (WECS)

A figura 1 apresenta o arranjo eletromecânico do sistema de conversão eólica representado neste trabalho. A figura ilustra ainda as seguintes etapas envolvidas no processo de conversão de energia: cinético-mecânica e mecânico-elétrica.

A descrição de cada um dos módulos do WECS (Wind Energy Conversion System) citados é realizada a seguir, com destaque para as equações que descrevem o comportamento dos dispositivos em questão.

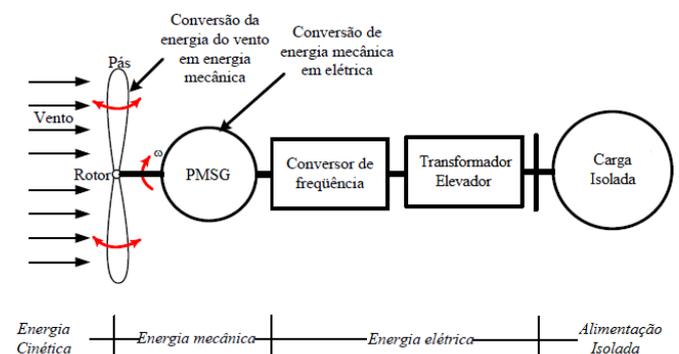


Fig. 1. Arranjo básico do sistema de conversão eólico proposto

A. Modelagem do vento

A representação da velocidade do vento adotada é efetuada com base numa formulação composta pela soma de quatro componentes, a saber: velocidade base do vento (componente principal), rajada, rampa de velocidade e ruído [3]. Esta será omitida, pois se encontra bem difundida na literatura atinente à área.

B. Modelagem da turbina eólica

O rotor eólico é responsável pela extração da energia transportada pelo vento, convertendo-a em energia mecânica rotacional e transferindo-a ao eixo do gerador elétrico. A potência disponível na turbina e o conjugado elétrico por ela desenvolvido são representados pelas equações (1) e (2), respectivamente [4]:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) v_{vento}^3 \quad (1)$$

$$T_{mec} = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) \frac{v_{vento}^3}{\omega} \quad (2)$$

Sendo:

- ρ : massa específica do ar (m/s)
- A : área varrida pelas pás (m²)
- C_p : coeficiente de potência ou (função de λ e β)
- λ : razão de velocidade da pá
- β : ângulo de passo das pás (graus)
- v_{vento} : velocidade do vento (m/s)
- ω : velocidade angular da pá (rad/s)

Vale ressaltar que os estudos aqui conduzidos incluem uma turbina dotada de controle *pitch*, o qual tem por finalidade delimitar a potência mecânica transferida para o eixo do gerador. Assim sendo, fica garantido, no máximo, a potência nominal fornecida ao gerador, fato este que mantém os limites operacionais do complexo para o caso da manifestação de ventos com velocidades muito altas [4].

C. Modelagem da máquina síncrona de ímã permanente

O gerador elétrico tem por função transformar a energia mecânica rotacional fornecida pelo rotor eólico em energia elétrica. Dentro deste contexto, vale ressaltar que geradores eólicos possuem algumas particularidades em relação aos convencionais, graças à dinâmica imposta pela fonte primária de energia.

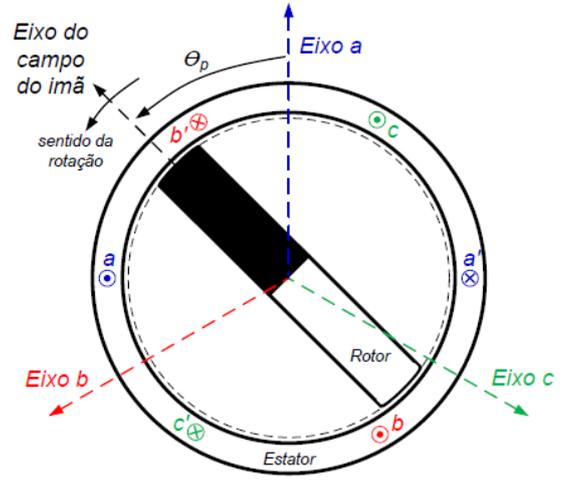
O gerador contemplado neste trabalho é do tipo síncrono multipólos, com estator constituído por bobinas trifásicas e o rotor por ímã permanente. Esta última característica determina, pois, que o fluxo magnético responsável pela produção das forças eletromotrizes apresenta-se com valor constante.

O gerador supracitado tem seu arranjo físico apresentado na figura 2. A máquina em pauta contém um número de pólos elevado, fato este imposto pelas baixas velocidades de rotação oriundas da conexão direta com o eixo da turbina eólica. Esta característica é bastante atrativa visto viabilizar a eliminação da caixa de velocidades, como já discutido.

Para a representação do gerador tomou-se por base o modelo geral fundamentado nas expressões de fluxos concatenados da máquina síncrona convencional [5, 6]. A estratégia empregada utilizou as técnicas de modelagem no

domínio do tempo, em que pese algumas adaptações para representar a geração do fluxo magnético do rotor através de um ímã permanente. Isto substitui as estruturas convencionais para as quais os campos magnéticos são produzidos por excitatrizes controladas.

Assim procedendo, foi obtida uma representação computacional para o gerador síncrono que permite avaliações de fenômenos de regime permanente e dinâmico.



aa' , bb' , cc' : enrolamentos de armadura (estator)

Fig. 2. Arranjo físico do gerador síncrono a ímã permanente

As expressões que relacionam tensões, fluxos e correntes da máquina síncrona são:

$$[V] = -[R_e] \cdot [I] - \frac{\partial [\lambda_e]}{\partial t} \quad (3)$$

$$[\lambda_e] = \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & k_{af} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & k_{bf} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & k_{cf} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ F_{IP} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Onde:

$[V]$, $[I]$ e $[\lambda_e]$: matrizes coluna das tensões, correntes e fluxos concatenados das fases a , b e c do estator;

$[R_e]$: matriz diagonal das resistências dos enrolamentos a , b e c do estator;

λ_a , λ_b e λ_c : fluxo concatenado das fases a , b e c ;

i_a , i_b e i_c : correntes das fases a , b e c ;

F_{IP} : fluxo magnético relativo ao ímã permanente.

Os demais elementos exigidos na formulação são:

- Autoindutâncias do estator ($i = a, b$ ou c):

$$L_{ii} = -L_s + L_m \cos[2(\theta_e + \alpha_{ii})] \quad (5)$$

- Indutâncias mútuas do estator (i ou $j = a, b$ ou c e $i \neq j$):

$$L_{ij} = -M_s + L_m \cos[2(\theta_e + \alpha_{ij})] \quad (6)$$

- Fator de acoplamento entre o campo e a armadura considerando a posição do rotor ($i = a, b$ ou c):

$$k_{iF} = F_{acop} \cos(\theta_e + \alpha_{iF}) \quad (7)$$

Sendo:

θ_e : ângulo elétrico entre o eixo da fase a do estator e o eixo do rotor;

L_S e M_S : parcelas constantes das autoindutâncias e indutâncias mútuas do estator;

L_m : parcela variável das autoindutâncias e indutâncias mútuas do estator;

F_{acop} : fator de acoplamento máximo entre o campo e a armadura;

Os valores dos ângulos α_{ij} , apresentados na tabela I são determinados de acordo com as posições relativas entre os enrolamentos do estator e rotor.

TABELA I - Valores dos ângulos α_{ij}

α_{ij}		$j =$			
		a	b	c	F
$i =$	a	0	$\pi/6$	$5\pi/6$	0
	b	$\pi/6$	$-2\pi/3$	$-\pi/2$	$-2\pi/3$
	c	$5\pi/6$	$-\pi/2$	$2\pi/3$	$2\pi/3$

Os valores de $[Re]$, L_S , M_S e L_m são calculados a partir de dados de placa fornecidos pelo fabricante do gerador. Para a resistência do estator, utiliza-se a equação a seguir:

$$R_e = R_{e_pu} \frac{V_n^2}{S_n} \quad (8)$$

Onde:

R_e : resistência de uma das fases em ohm;

R_{e_pu} : resistência em pu fornecida pelo fabricante;

V_n : tensão nominal da máquina;

S_n : potência nominal da máquina

A parcela constante das autoindutâncias L_S é dada por:

$$L_S = L_{S_pu} L_{est_b} \quad (9)$$

Sendo L_{S_pu} representado pela equação (10) e a indutância base do estator L_{est_b} pela (11).

$$L_{S_pu} = \frac{1}{3} (X_d + X_q - 2X_l) \quad (10)$$

$$L_{est_b} = \frac{V_n / S_n}{2\pi f_n} \quad (11)$$

Onde:

X_d : reatância de eixo direto, em pu;

X_q : reatância de eixo em quadratura, em pu;

X_l : reatância de dispersão de uma fase do estator, em pu;

f_n : frequência nominal do gerador

Por sua vez, a parcela constante das indutâncias mútuas do estator M_S é:

$$M_S = M_{S_pu} L_{est_b} \quad (12)$$

Sendo:

$$M_{S_pu} = \frac{1}{12\pi f_n} (X_d + X_q - 2X_l) + \frac{1}{3} (X_d - X_q) \quad (13)$$

O valor da parcela variável das autoindutâncias e indutâncias mútuas do estator L_m é dado por:.

$$L_m = L_{m_pu} L_{est_b} \quad (14)$$

Onde:

$$L_{m_pu} = \frac{1}{3} (X_d - X_q) \quad (15)$$

O conjugado eletromagnético desenvolvido pelo gerador elétrico é obtido através da equação (16) abaixo:

$$T_{elet} = \frac{n_p}{2} F_{IP} \sum_i i \frac{\partial L_{iF}}{\partial \theta_e} \quad (16)$$

Onde $i = a, b$ ou c e N_p é o número de pólos da máquina.

Finalizada a parte pertinente às equações elétricas do gerador, volta-se à formulação mecânica do mesmo, a qual é amplamente difundida e conhecida na literatura. Nesse contexto, a expressão (17) relaciona o conjugado mecânico T_{mec} , o conjugado eletromagnético T_{elet} , a velocidade ω e o momento de inércia J .

$$T_{mec} - T_{elet} = J \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (17)$$

D. Modelagem do retificador e elo CC

O retificador trifásico de onda completa é composto por uma ponte trifásica de 6 pulsos, não controlada, com um capacitor conectado à saída representando o elo CC. Maiores detalhes deste equipamento não serão apresentados visto que todos seus componentes estão prontamente disponibilizados nas bibliotecas do ATP e amplamente difundidos na literatura relacionada ao tema. Utilizando tais recursos, elaborou-se o arranjo sintetizado na figura 3, a qual apresenta o modelo computacional implementado.

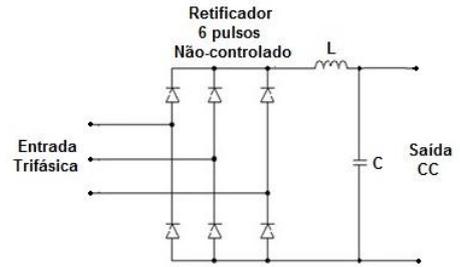


Fig. 3. Estrutura do retificador e elo CC

E. Modelagem do inversor de frequência

O inversor de frequência constitui-se no dispositivo que, a partir de uma tensão contínua, produz um sistema trifásico de tensões que serão conectadas à rede local. Por ser uma unidade destinada à integração do parque eólico com a rede elétrica, seu controle é configurado objetivando a interligação apropriada tanto no que tange à questão da transmissão de energia da fonte primária para a rede, como também a viabilização de meios para um controle nos termos requeridos pelas condições de operação em regime permanente, dinâmico e transitório.

Como fundamento utilizou-se do controle vetorial como técnica para o processamento e definição dos requisitos necessários à lógica de disparo [7]. A partir desta informação, empregando-se o controle PWM, também largamente aplicado neste campo de trabalho, são produzidos os pulsos de disparo que determinam as características das tensões trifásicas na saída do conversor, as quais consistem nos pontos físicos de conexão do sistema eólico com a rede trifásica existente.

Para tal procedimento, a definição da sequência de abertura e fechamento de cada uma das chaves semicondutoras que formam o inversor é realizada pela

comparação de um sinal senoidal com uma onda triangular de elevada frequência, conforme ilustrado na figura 4. Dessa forma sempre que a tensão v_r (senóide de referência) for maior que a tensão v_c (triangular), a saída do comparador emite o sinal de ativação de forma que a chave semicondutora correspondente entre em condução. Na situação contrária, ou seja, quando v_r é menor que v_c , a chave é bloqueada.

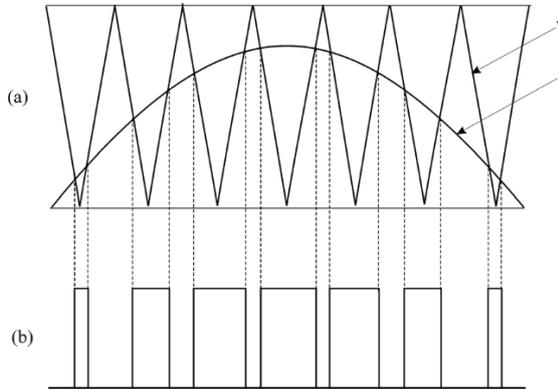


Fig. 4. Formas de onda de controle para o inversor PWM senoidal
(a) sinais de entrada no comparador
(b) sinal de saída do comparador, a ser aplicada no *gate* do semicondutor de potência

A figura 5 abaixo mostra as tensões de saída de um inversor PWM senoidal trifásico. A figura 5(a) ilustra as tensões senoidais de referência (trifásicas balanceadas) e a onda triangular com a qual são comparadas. As figuras 5(b), 5(c) e 5(d) correspondem às saídas de cada um dos três comparadores e também as chamadas tensões de polo do inversor, que, combinadas, resultam nas tensões de linha de saída, mostradas na figura 5(e).

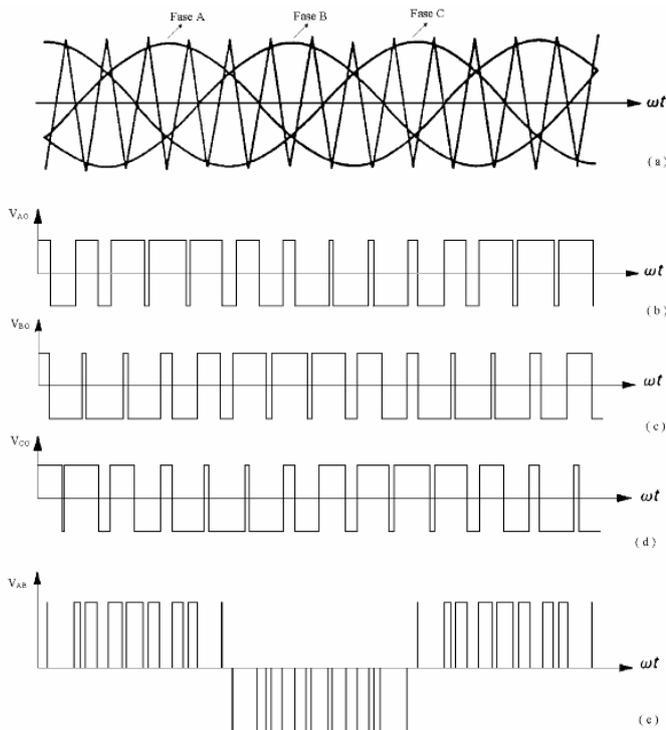


Fig. 5. Formas de onda de controle para o inversor PWM senoidal

F. Modelagem do transformador elevador

Este equipamento foi representado por um transformador trifásico Δ -Y, 660/13800 V. Não há necessidade de um maior detalhamento a respeito da modelagem deste elemento, uma vez que este já se encontra disponível na biblioteca do ATP e seu princípio de operação já é bastante conhecido na área.

III. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Esta seção visa apresentar os estudos computacionais efetuados para a verificação do adequado funcionamento do aerogerador quando conectado a uma carga isolada. Serão apresentados parâmetros importantes relativos à operação do gerador eólico excitado por ímã permanente, como a velocidade angular do rotor, o coeficiente de potência da turbina e as tensões no elo CC e na carga, além da velocidade do vento e suas turbulências.

Para tal, foi utilizado o *software Alternative Transients Program (ATP)*, versão de distribuição livre de seu precursor *EleTroMagnetics Transients Program (EMTP)*. Esta plataforma disponibiliza funções adequadas à modelagem do sistema de conversão eólica em estudo principalmente graças à utilização de técnicas baseadas no domínio do tempo. Destaca-se ainda que o ATP possui excelentes recursos gráficos, além de uma interação amigável com o usuário, atributos estes que tem motivado sua ampla utilização em âmbito comercial, acadêmico e científico em diversos países do mundo.

Os parâmetros da máquina síncrona de ímã permanente utilizada nas simulações computacionais estão listados na tabela II a seguir.

TABELA II - Parâmetros da Máquina Síncrona e Turbina

P_N	Potência nominal em kW	600
V_N	Tensão nominal em V	600
f	Frequência nominal em Hz	60
p	Número de pólos	60
R_{est}	Resistência do estator em p.u.	0,00631
X_d	Reatância de eixo direto em p.u.	0,01225
X_q	Reatância de eixo em quadratura em p.u.	0,01330
X_l	Reatância de dispersão de 1 fase do estator em p.u.	0,00150
J	Momento de inércia da turbina ($kg\ m^2$)	50.000

A. Aerogerador sob condição ótima de operação e vento sem turbulência

Este caso foi representado pela operação do aerogerador sob condição ótima de vento e de carga, 11,72 m/s e 350 Ω , respectivamente. Ressalta-se que esta situação representa um caso otimista de funcionamento do gerador eólico, mas que detém grande importância na verificação da coerência na modelagem dos componentes do equipamento. Destaca-se ainda que os primeiros 4 segundos de simulação referem-se à partida do aerogerador.

A figura 6 apresenta a velocidade do vento, com valor constante de 11,72 m/s, sem a presença de turbulência, enquanto que a figura 7 ilustra a velocidade angular ótima do rotor do aerogerador, com valor próximo a 3,3 rad/s. Nota-se que, sob magnitudes ótimas de vento e carga, o modelo alcança o regime permanente em cerca de 4 segundos,

mantendo este valor constante após este período. Já a figura 8 retrata o coeficiente de potência da turbina eólica, que nesta situação de funcionamento manteve-se em seu valor máximo, cerca de 0,44.

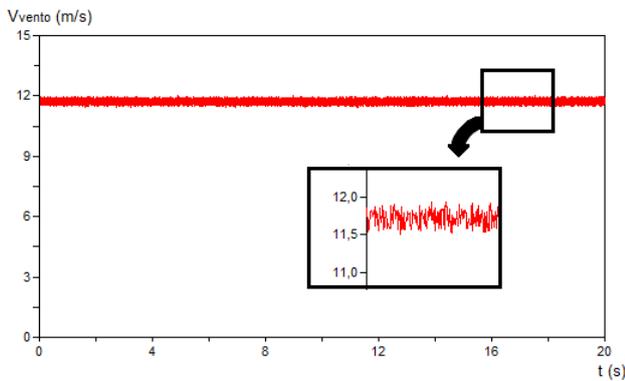


Fig. 6. Velocidade do vento

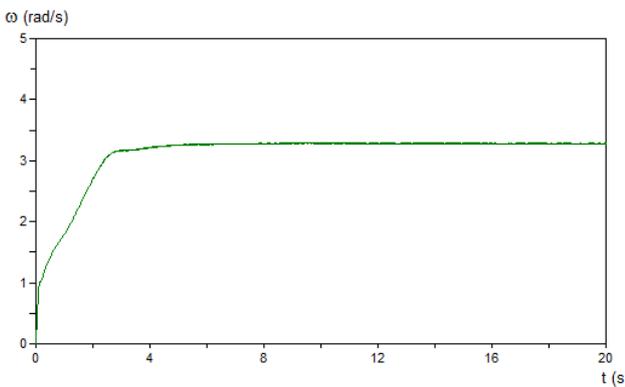


Fig. 7. Velocidade angular do rotor da turbina eólica

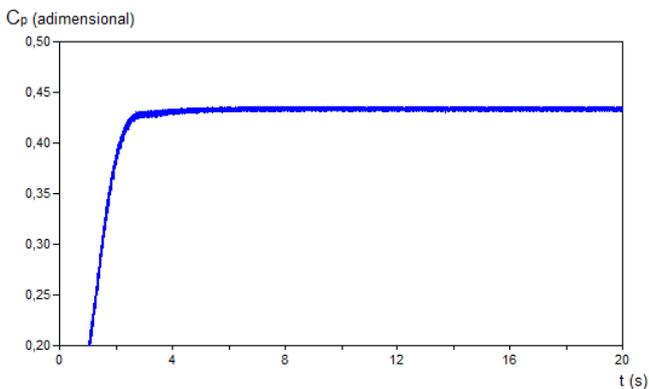


Fig. 8. Coeficiente de potência da turbina eólica

As figuras 9 e 10 mostram a tensão no elo CC, pós-retificador, e na carga, respectivamente. Nota-se que a primeira curva apresenta valor contínuo de 870 V ao longo do tempo, enquanto que a segunda possui variação temporal característica do sistema trifásico de tensão alternada, representada em azul, mas com magnitude RMS por fase constante (7,967 kV), plotada na cor preta, durante todo período de simulação.

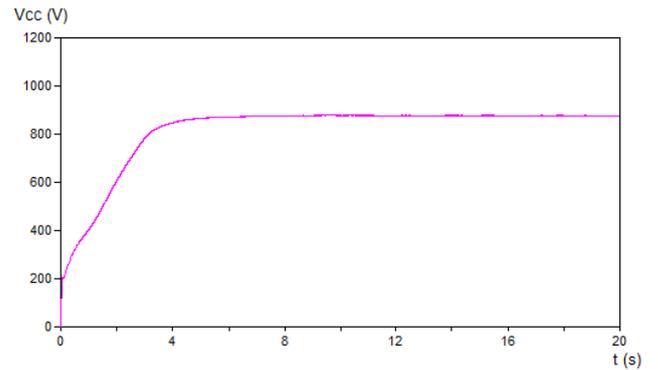


Fig. 9. Tensão no elo CC

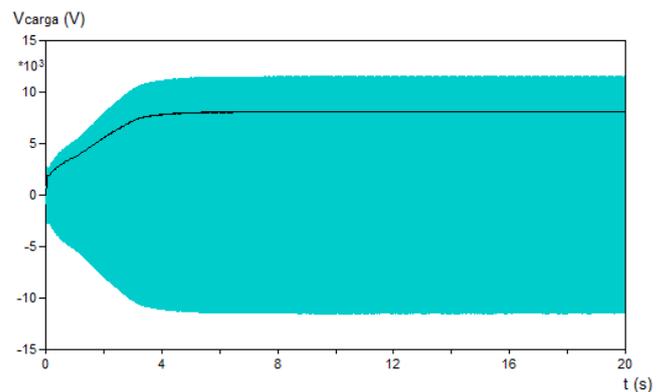


Fig. 10. Tensão na carga

B. Aerogerador sob condição ótima de operação e vento com turbulência

Este caso representa a operação do aerogerador sob condição ótima de vento base e carga, mas com presença de turbulências do tipo rajada (intensidade de 3m/s e duração de 4 segundos) e rampa (intensidade de 2 m/s e duração de 2 segundos). A figura 11 apresenta a velocidade do vento, enquanto que as figuras 12 e 13 retratam a velocidade angular do rotor e o coeficiente de potência da turbina, respectivamente.

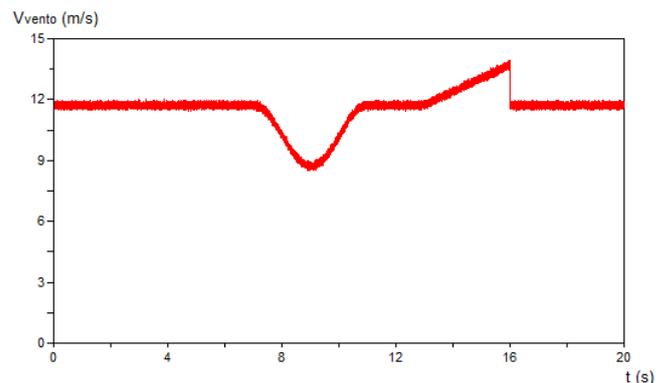


Fig. 11. Velocidade do vento

Percebe-se que a diminuição da intensidade do vento provocada pela rajada refletiu em uma redução da velocidade de giro da turbina (chegando a 2,78 rad/s) e também do coeficiente de potência, fato este justificado pela saída do equipamento de sua condição ótima de funcionamento. Já a

presença da rampa provocou uma elevação na velocidade do aerogerador, o que também ocasionou em uma perda de rendimento por parte do equipamento.

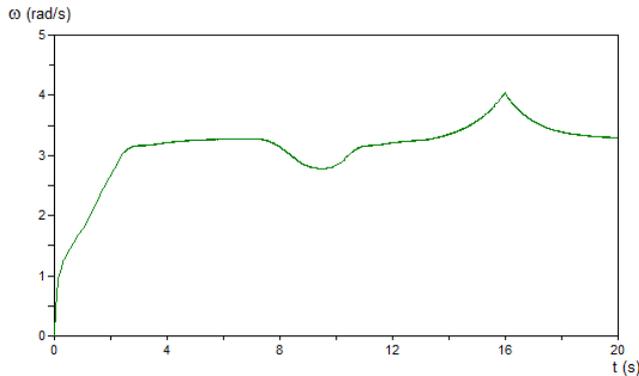


Fig. 12. Velocidade angular do rotor da turbina eólica

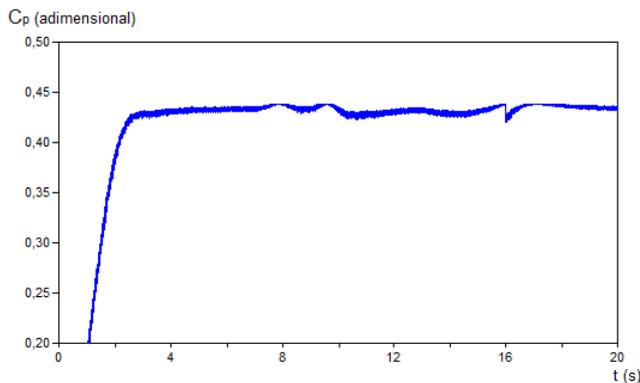


Fig. 13. Coeficiente de potência da turbina eólica

As figuras 14 e 15 apresentam a tensão no elo CC e carga isolada. Nota-se que ambas as curvas seguem a trajetória do vento, retornando ao valor original após a ocorrência das turbulências. A primeira atinge o valor mínimo de cerca de 640 V com a rajada e 1010 V com a rampa, enquanto que a segunda chega a 5800 V e 9300 V, por fase.

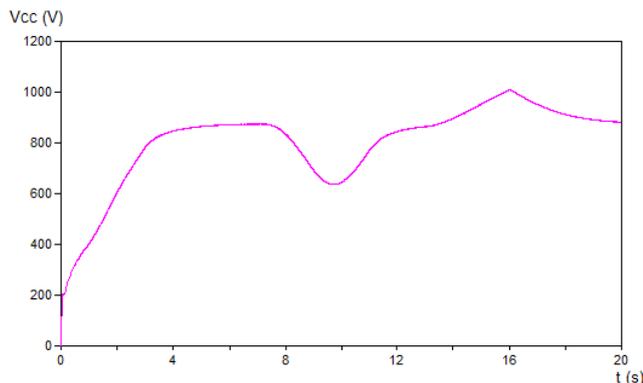


Fig. 14. Tensão no elo CC

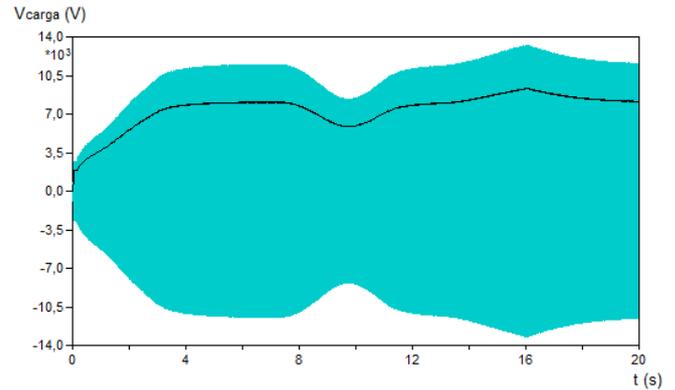


Fig. 15. Tensão na carga

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi apresentada a modelagem matemática e computacional de um sistema de conversão de energia eólica real conectado a uma carga isolada no ATP. Para tal, técnicas no domínio do tempo foram adotadas de modo a permitir a elaboração de modelos representativos de diversos componentes de um aerogerador síncrono excitado por ímã permanente.

De modo a verificar a eficácia do modelo implementado, simulações computacionais foram realizadas abordando distintas modificações na intensidade do vento. Os resultados obtidos demonstram coerência no comportamento do aerogerador frente a alterações súbitas na intensidade da fonte primária de energia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro proporcionado pela CAPES para elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Meegahapola, D. Flynn, "Impact on Transient and Frequency Stability for a Power System at Very High Wind Penetration", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July/2010.
- [2] P. Li, J. Tang, L. Zhang, C. Lian "Independent Control of Active and Reactive Power of the Grid-Connected Inverter", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, October 2008.
- [3] P. M. Anderson, A. Bose, "Stability Simulation of Wind Turbine System, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3791-3795, December 1983.
- [4] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion System*, John Wiley & Sons, England, 1998.
- [5] P. M. Anderson, A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, USA, 1977.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [7] C. Schauder, H. Mehta, "Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators" *IEEE Proceedings-C*, vol. 40, n° 4, July, 1993, pp. 299 – 306.