



Variable Speed Wind Turbine Modeling Using ATPDraw

Antonio S. Neto, Francisco A. S. Neves, Pedro A. C. Rosas
Universidade Federal de Pernambuco
UFPE – Recife - PE
Email: asneto01@yahoo.com.br,
fneves@ufpe.br, prosas@ufpe.br

Eduardo L. R. Pinheiro, Selênio R. Silva
Universidade Federal de Minas Gerais
UFMG – Belo Horizonte - MG
Email: edulrp@yahoo.com,
selenios@eee.ufmg.br

Abstract — This paper presents a variable speed wind turbine model with frequency converters that contributes to the studies of transient analysis and dynamic operation. The model is implemented in ATPDraw program which is widely used by power system engineers to study the electromagnetic transient problems. The variable speed wind turbine model includes: the control system of the wind turbine and of the frequency converters, as well as the wind acting on the wind rotor, the mechanical conversion and transmission system and the grid connection with the distribution utility.

Index Terms — Wind turbines, Stability, Power quality, Frequency converters.

I. INTRODUÇÃO

Nos próximos anos, o aumento da oferta de energia elétrica no Brasil deverá ocorrer com grande participação de turbinas eólicas. O Brasil encontra-se no momento para iniciar a instalação de pelo menos 1100MW de turbinas eólicas para atender ao PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de energia [1]. Seja por razões ambientais, políticas ou econômicas, as turbinas eólicas estarão presentes na matriz energética brasileira em breve.

As turbinas eólicas podem interagir de diversas formas no sistema elétrico, causando desde interferências nos padrões de qualidade de energia até na estabilidade do sistema elétrico. Desta maneira, a instalação em larga escala de turbinas eólicas demanda estudos especiais para determinar o nível de impacto das mesmas sobre a estabilidade e a qualidade do suprimento da energia elétrica.

Neste sentido, este trabalho colabora com o desenvolvimento de modelos computacionais que possam auxiliar na avaliação do impacto das turbinas eólicas nas redes elétricas. A turbina eólica modelada é do tipo de velocidade variável que utiliza conversores de frequência para efetuar a conexão elétrica. O modelo foi implementado no ATPDraw o que possibilita observar as formas de onda de tensão e corrente inseridas na rede elétrica e avaliar os impactos na qualidade do suprimento local. Adicionalmente, a ferramenta de simulação permite investigações da estabilidade eletromecânica das turbinas e da rede elétrica.

II. SISTEMA MODELADO

A modelagem e simulação dos impactos elétricos em sistemas de potência com turbinas eólicas levam em consideração diversos fatores, eles podem abranger desde a estabilidade até a qualidade da energia ofertada. Genericamente, pode-se afirmar que o modelo deve representar de forma suficientemente precisa os fenômenos físicos envolvidos na conversão da energia e na inserção da mesma na rede elétrica. O nível de complexidade do modelo depende dos objetivos das simulações[2].

O modelo aqui apresentado visa os estudos de estabilidade transitória devidos a faltas no sistema elétrico. Deste modo, pode-se limitar os estudos a tempos de simulação da ordem de alguns segundos. Modelos para estudos transitórios permitem algumas simplificações referentes à representação das turbinas eólicas [3]. Os modelos de turbinas eólicas simulam o comportamento dos componentes elétricos como: geradores, conversores estáticos de potência, a rede elétrica juntamente com as cargas e o sistema de controle, assim como os elementos mecânicos da turbina, contemplando o efeito da conversão eólica-mecânica para estudos de transitórios eletromecânicos.

A turbina eólica simulada tem potência nominal de 1MW e é do tipo de velocidade variável utilizando conversores de frequência para efetuar a conexão elétrica. No sistema modelado, apesar do transformador ser uma parte integrante da turbina eólica, nas simulações ele está incluído na representação da rede elétrica nos terminais dos conversores a qual representa o transformador de integração e todo o equivalente do sistema elétrico de potência através de uma curta linha para conexão da turbina ao ponto de conexão do concessionário o qual é representado através da impedância de curto circuito e um barramento infinito. O diagrama da Figura 1 apresenta de forma sucinta os componentes da turbina eólica, onde a rede elétrica inclui o transformador de integração.

Na Figura 1, no lado esquerdo, pode-se identificar o rotor aerodinâmico, onde ocorre a conversão eólica, e o multiplicador de velocidade responsável pelo acoplamento

mecânico dos eixos de baixa do rotor aerodinâmico e de alta velocidade do gerador elétrico. O conversor de frequência é composto de duas unidades sendo uma responsável pelo Controle do Lado do Gerador (aquela que controla o gerador de indução) e outra responsável pelo Controle do Lado da Rede (aquela responsável pelo controle da energia injetada na rede). Adicionalmente, existe um barramento em corrente contínua (CC) com um banco de capacitores.

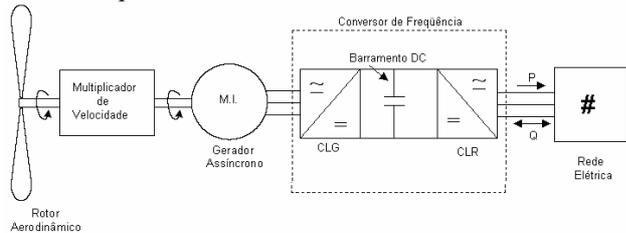


Fig. 1- Conexão do Gerador Assíncrono

Para as simulações e estudos apresentados neste artigo, a versão gráfica do Alternative Transient Program – ATPDraw – é utilizada [4]. O ATP foi escolhido por ser uma ferramenta de simulação amplamente difundida e permitir a adaptação do algoritmo desenvolvido para representar a conexão de turbinas eólicas em redes elétricas reais.

A biblioteca do ATP não dispõe de modelos adequados para a simulação das partes mecânicas da turbina, ventos e conversores. Esses elementos, assim como todo o sistema de controle e modelagem do gerador de indução, foram implementados utilizando-se a ferramenta TACS (Transient Analysis of Control Systems) [4]. Apenas a rede elétrica foi modelada no ATP empregando os elementos de circuitos disponíveis na sua biblioteca, conforme mostrado na Figura 02. Chaves ideais foram usadas para representar o conversor, mas os comandos

dessas chaves foram implementados através de ferramentas TACS.

A rede simulada possui nos terminais dos conversores de frequência uma potência de curto circuito de 12.66 MVA, correspondente a aproximadamente 12 vezes o tamanho da turbina eólica. Esta relação é razoável uma vez que inclui os transformadores abaixadores [2].

Um fato importante a ser observado é que a conexão entre a rede elétrica e o conversor demanda obrigatoriamente um filtro na entrada do conversor para garantir que o chaveamento do conversor do lado da rede não venha a realizar um curto circuito na rede elétrica. No caso em estudo, foi utilizado um filtro LCL na entrada do conversor, dimensionado a partir de [5].

A Tabela 1 apresenta os dados básicos utilizados nas simulações .

TABELA 1
DADOS DA SIMULAÇÃO

Parâmetros elétricos	Valores
Impedância de curto-circuito (na entrada do conversor)	0.011+j0.036Ω
Tensão nominal	690V
Potência de curto circuito	12.66MVA
Corrente nominal dos conversores	400 A
Resistência do filtro	0.01
Indutância total do filtro	0.815e-3 H
Capacitor do filtro	33.4289μF
Resistência em série com o Capacitor	1.5Ω
Capacitor do Barramento CC	0.1337F
Tensão nominal do barramento CC	1400V

III. MODELAGEM DA TURBINA EÓLICA

Nesta seção, são apresentados os modelos da parte mecânica da turbina eólica e o modelo de vento simulado no ambiente do ATPDraw.

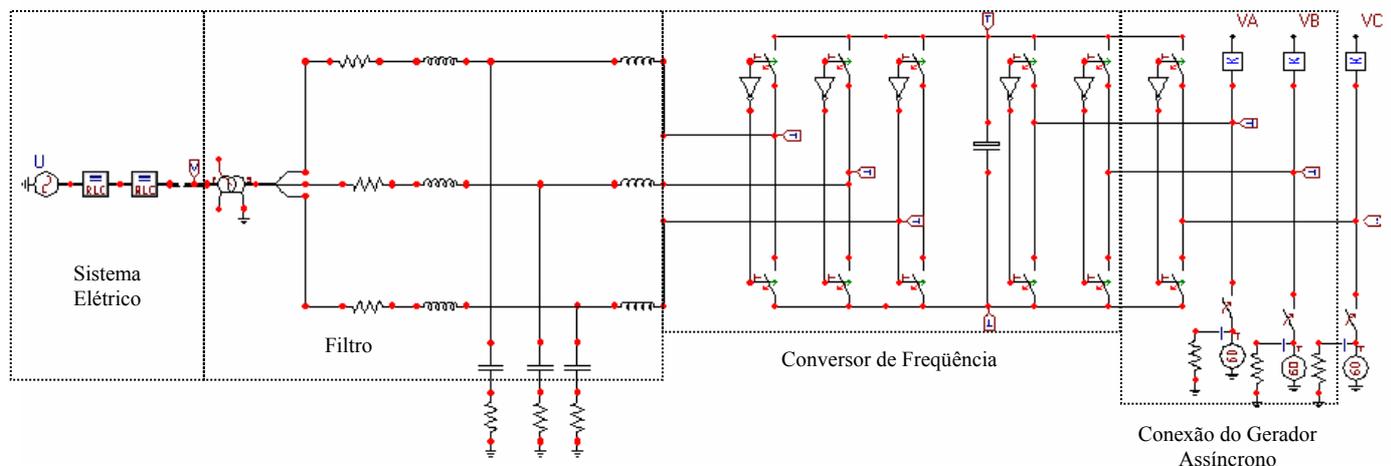


Fig. 2 - Sistema modelado

A. Representação dos ventos

Os ventos podem ser caracterizados como uma complexa estrutura composta de diversos fenômenos. Dentre eles, pode-se destacar os fenômenos determinísticos, relacionados com a velocidade média do vento e efeitos de: sombra da torre, variação vertical das velocidades do vento etc, e os fenômenos estocásticos, relacionados com a turbulência do vento. Porém, para os estudos aqui realizados, as dinâmicas relevantes do sistema elétrico estão em uma faixa de frequência elevada, bem superior a 30Hz e, desta maneira, a turbulência pode ser desprezada [2].

No modelo aqui apresentado, as características da geração da turbina eólica foram estudadas considerando um vento que inclui: rajadas, o seu valor médio e uma rampa, conforme usado em [6]. Adicionalmente, foi incluída uma senoide para representar a turbulência, sendo a frequência da mesma bem reduzida, da ordem de grandeza de 1Hz.

Foi considerado que o vento simulado é o mesmo em todo o rotor e os fenômenos de alisamento devidos à correlação da turbulência são desprezados. Desta maneira, as variações da potência eólica simulada podem ser consideradas mais severas do que as presentes em uma turbina eólica real. A equação (1) mostra a representação do modelo analítico do vento.

$$V_T = V_{Const} + V_R + V_{rajada} + V_{senoide} \quad (m/s) \quad (1)$$

onde V_T é o vento total, V_{Const} representa a velocidade média do vento no intervalo estudado, V_R representa o vento em rampa, V_{rajada} modela uma rajada e $V_{senoide}$ a turbulência.

B. Representação da parte mecânica

A potência mecânica convertida no rotor aerodinâmico de uma turbina eólica pode ser caracterizada através da equação (2):

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V_T^3 \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do ar, A é a área varrida pelas pás da turbina eólica, C_p é o coeficiente de potência da turbina, o qual pode ser interpretado como a eficiência de conversão do rotor aerodinâmico, e V_T é a velocidade de vento simulada na seção anterior.

A partir da potência mecânica no eixo de baixa velocidade calculada de acordo com a equação (2) pode-se determinar o conjugado de “entrada” no sistema de transmissão como sendo:

$$T = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_p \cdot V^3}{\omega_{rotor}} \quad (3)$$

onde ω_{rotor} é a velocidade de rotação do rotor aerodinâmico.

Para representar o coeficiente de potência, foi utilizado um modelo não polinomial conforme indicado em [7].

O sistema de transmissão mecânica do rotor aerodinâmico ao gerador assíncrono basicamente conecta dois eixos mecânicos girantes. No caso presente ele foi tratado de forma ideal, conectando os dois eixos por uma simples relação de velocidade.

C. Modelagem do gerador assíncrono

Uma vez que o objetivo principal do algoritmo é o estudo de fenômenos transitórios de curta duração, a máquina de indução foi representada utilizando-se o modelo vetorial de quinta ordem, conforme mostrado nas equações a seguir, em referencial arbitrário girante à velocidade ω_{eixos} :

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \dot{\vec{\lambda}}_s + j \omega_{eixos} \vec{\lambda}_s \quad (4)$$

$$\vec{v}_r = R_r \vec{i}_r + \dot{\vec{\lambda}}_r + j(\omega_{eixos} - \omega_r) \vec{\lambda}_r \quad (5)$$

$$\frac{2J}{P} \dot{\omega}_r = T_e - T_l \quad (6)$$

onde os subscritos s e r são empregados para designar grandezas de estator e rotor. v , i , e λ , representam tensões, correntes e fluxos e ω_r , ω_{eixos} , T_e e T_l são a velocidade do rotor do gerador, velocidade do sistema de referências dq, e os conjugados eletromagnético e mecânico. P é o número de pólos e J é a inércia do rotor do gerador elétrico. As relações fluxo-corrente e a expressão do conjugado eletromagnético são:

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (7)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{rd} i_{sq} - \lambda_{rq} i_{sd}) \quad (9)$$

No modelo descrito, utilizou-se notação de motor, ou seja, as correntes são consideradas positivas quando entram nos enrolamentos e o conjugado eletromagnético positivo tende a fazer o rotor girar no sentido positivo. Esta convenção precisa ser levada em conta quando do controle do sistema e deve-se considerar o conjugado imposto pelo vento como negativo.

É importante ressaltar que, embora os resultados de simulação apresentados adiante considerem rotor tipo

gaiola, o modelo acima é válido também para a máquina com dupla alimentação. Além disso, através da introdução de pequenas modificações, pode-se chegar a um modelo mais simples, em que se desprezam as dinâmicas mais rápidas, o qual seria adequado para o estudo de fenômenos de maior duração [2].

D. Modelagem dos conversores

Os conversores foram representados por chaves ideais, mas os comandos dessas chaves foram implementados através de ferramentas TACS.

O conversor responsável pela injeção de potência no sistema elétrico possui um sistema de controle especial para evitar sobretensões no barramento CC e, adicionalmente, pode ser usado para o controle do nível de tensão no lado da rede elétrica através do controle da potência reativa.

O conversor responsável pelo controle da geração da turbina eólica possui como característica importante a extração da potência no gerador de indução em CA para o barramento CC e, adicionalmente, é usado para otimizar a produção.

A descrição detalhada dos algoritmos de controle implementados é realizada na seção a seguir.

IV. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

A. Conversor do Lado da Rede - CLR

Denominando as tensões dos capacitores do filtro LCL de v_A, v_B e v_C e as tensões na entrada do CLR de v_{AC}, v_{BC} e v_{CC} , a equação que relaciona as tensões e correntes no indutor de entrada do CLR, desprezando a dinâmica do capacitor, será:

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{AC} \\ v_{BC} \\ v_{CC} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

Desconsiderando-se a componente homopolar e aplicando a transformação de coordenadas ABC para dq em referencial arbitrário, a equação (10) pode ser reescrita utilizando notação vetorial complexa:

$$\vec{v} - \vec{v}_C = R\vec{i} + L \frac{d\vec{i}}{dt} + j\omega_{eixos} L\vec{i} \quad (11)$$

O principal objetivo é controlar os fluxos de potência ativa e reativa entre o CLR e a rede. Para realizar este controle, será utilizado um referencial síncrono, orientado pelo vetor tensão do capacitor do filtro, tornando a componente de eixo q nula ($\vec{v} = v_d$). Com isso, a potência

ativa e a potência reativa entregues pela rede ao conversor serão dadas respectivamente pelas equações (12) e (13):

$$P = \frac{3}{2} v_d i_d \quad (12)$$

$$Q = \frac{3}{2} v_d i_q \quad (13)$$

Nos resultados apresentados, foi considerado que se deseja a injeção de potência reativa nula, fazendo com que o valor de referência da corrente de eixo em quadratura seja também nulo. Porém, o sistema permite que o conversor tenha a função adicional de compensador estático da energia reativa, auxiliando no controle da tensão da rede em níveis adequados. O uso de referencial dq síncrono faz com que as componentes d e q da corrente sejam contínuas em regime permanente, tornando adequado o controle do tipo proporcional-integral (PI).

Desprezando-se as perdas no conversor, a diferença entre a energia entregue pelo gerador ao conversor e a energia entregue pelo conversor à rede é armazenada no capacitor do barramento CC. Assim, a potência ativa entregue à rede é mantida igual à potência gerada realizando-se o controle da tensão do barramento CC. Pela equação (12), verifica-se que uma grandeza adequada para o controle da potência ativa injetada na rede é a corrente de eixo direto. É importante perceber que a manutenção da tensão do barramento CC fixa, significa forçar a injeção imediata na rede de toda a potência gerada. Assim, todas as oscilações de potência gerada devidas às variações na velocidade do vento apareceriam na potência injetada na rede. O algoritmo desenvolvido permite o estudo de estratégias de controle para admitir alguma flutuação na tensão do barramento CC e suavizar as flutuações de potência ativa injetada na rede.

As grandezas empregadas para o controle das componentes de corrente de eixos d e q foram as respectivas componentes de tensão a serem disponibilizadas no lado CA do CLR. Vale salientar que, para que essas tensões sejam capazes de forçar as variações desejadas nas correntes, seus valores devem ser superiores aos das componentes de tensão da rede. Este fato é possível, tendo em vista que o próprio filtro faz o CLR se comportar como um conversor CA/CC do tipo "boost" (ou elevador de tensão). A fim de impor a tensão de referência, realiza-se o comando das chaves empregando um método de modulação por largura de pulso, ou Pulse Width Modulation (PWM).

A Figura 3 apresenta o controle do CLR, conforme implementado em ATPDraw utilizando os blocos disponíveis na biblioteca TACS.

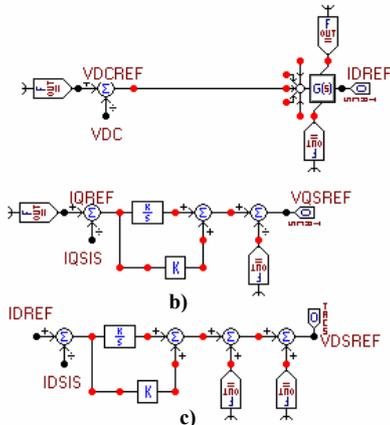


Fig. 3 - Controle do Conversor do Lado da Rede: a) Controle de injeção de potência ativa. b) Controle da corrente de eixo em quadratura. c) Controle da corrente de eixo direto

B. Conversor do Lado da Máquina -CLM

Para permitir a operação ótima da turbina, deve-se controlar a velocidade angular do rotor de modo a maximizar o coeficiente de potência C_p . Para cada valor de velocidade de vento, determina-se a velocidade angular do rotor para a qual C_p é máximo. Tal velocidade angular deve ser usada como valor de referência e qualquer método de controle de velocidade é, então, empregado. No presente caso, implementou-se o método indireto de controle de velocidade em referencial orientado pelo vetor fluxo de rotor [8]. Como forma de amenizar as flutuações de injeção de potência ativa na rede pode-se, ao invés de controlar a velocidade de modo a manter máximo C_p , suavizar as variações na potência ativa convertida pelo CLG, tendo como consequência flutuações na velocidade mecânica do rotor e, portanto, na sua energia cinética. Uma estratégia neste sentido pode ser facilmente incorporada ao algoritmo desenvolvido.

Para modelar o efeito do gerador (modelado através de TACS) sobre a rede elétrica (representada no ATP através de blocos de circuitos de sua biblioteca), foram empregados os blocos tipo fonte de corrente controlada via TACS (um bloco para cada fase). O valor de cada corrente é definido a partir do modelo da máquina de indução, conforme indicado na seção anterior. Estas fontes de corrente estão representadas na Figura 2.

Um método através de PWM foi implementado para a produção das tensões de referência pelo conversor.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados o diagrama de blocos simplificado do controle executado na máquina e as malhas de controle implementadas via TACS.

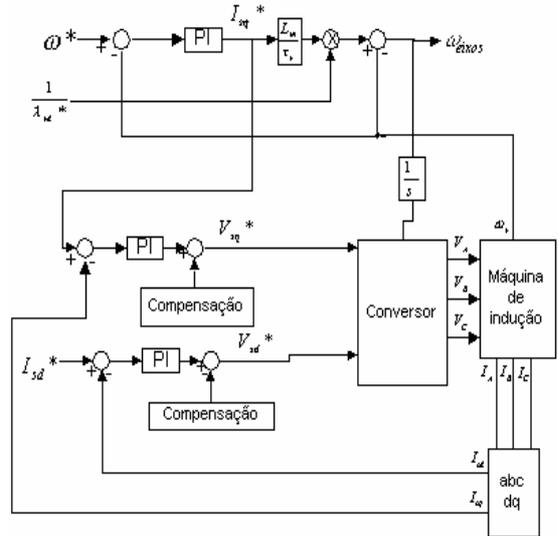


Fig. 4 - Esquema de controle da máquina de indução.

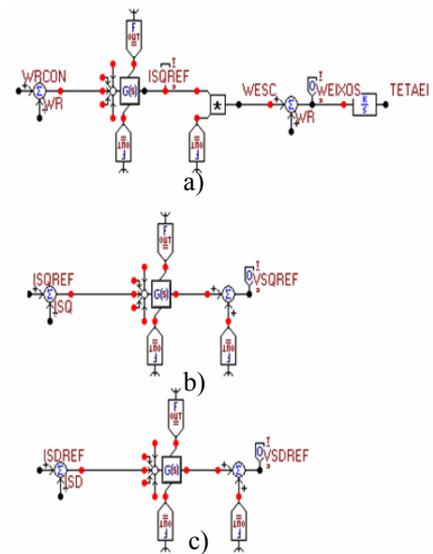


Fig. 5 - Malhas de controle em ATPDraw: a) Controle da velocidade do gerador assíncrono. b) Controle da corrente de eixo em quadratura. c) Controle da corrente de eixo direto.

V. SIMULAÇÃO

A fim de simular a operação da turbina e dos conversores sob diversas condições, o vento simulado aplicado na turbina eólica (conforme descrito na seção 3) será aproveitado de forma ótima se a velocidade acompanhar a curva de máximo C_p . A velocidade correspondente à operação ótima e a velocidade real estão apresentadas na Figura 4. Pode-se verificar que existe um perfeito controle de velocidade, possibilitando a extração máxima de potência devido a sempre se operar na relação ótima de velocidade.

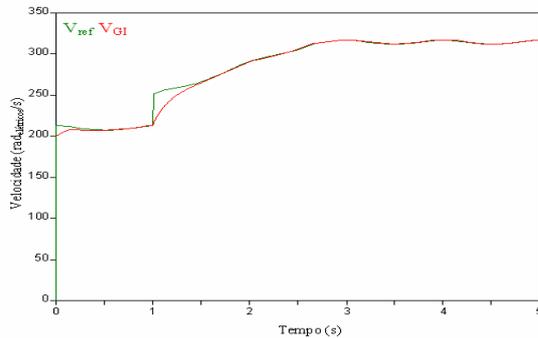


Figura 6 - Velocidade de referência e do controle do gerador de indução

O conjugado imposto à turbina eólica é responsável pela produção de energia. Devido ao comportamento oscilatório do conjugado aplicado ao gerador assíncrono, provocado pelo vento simulado, a potência elétrica injetada na rede também terá o mesmo comportamento conforme verifica-se na Figura 7.

Nas condições de baixa potência é onde se obtêm os maiores ganhos com velocidade variável. Por esse motivo preferiu-se realizar as simulações com baixa potência.

Na figura 8, a corrente em média tensão injetada na rede, esta representada para uma das fases. Verifica-se que a corrente apresentou um uma Distorção Harmônica Total (THD) de 3.31 %. Para a mesma aplicação observou-se uma THD para a tensão de 0.4%. Sendo assim, pode-se considerar os neveis como sendo bastante satisfatórios e que está de acordo com [9].

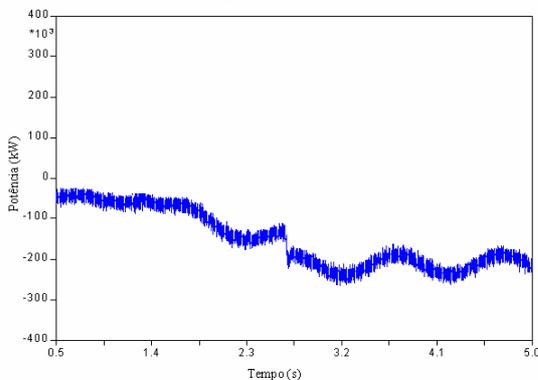


Fig 7 - Potência injetada

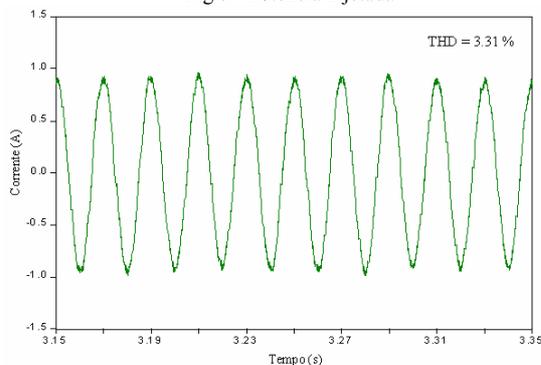


Fig. 8 - Corrente da rede

VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um modelo de turbina eólica de frequência variável implementado no ATPDraw. O modelo tem como principais características reduzir o grau de complexidade e facilitar a avaliação dos impactos da operação das turbinas eólicas na estabilidade e qualidade de energia elétrica.

O algoritmo apresentou reduzido tempo de simulação, mesmo incluindo dinâmicas de 5º ordem na máquina assíncrona.

O programa apresenta-se viável para análises de qualidade de energia em operação normal, bem como para simular a operação das turbinas eólicas durante e após faltas no sistema de potência.

O algoritmo apresentado possibilita também a investigação de estratégias de controle das injeções de potência ativa e reativa geradas, com vistas a melhorar a qualidade da energia.

VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministério de Minas e Energia, página na internet: www.mme.gov.br, janeiro de 2004
- [2] Rosas, P. A. C, Estanqueiro, A. I. “Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas, Vol. I Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica”, Cento Brasileiro de Energia Eólica, disponível na pagina www.eolica.com.br, Recife 2003;
- [3] Vladislav Akhmatov – “Analysis of Dynamic Behaviour of ElectricPower System s with Large Amount of Wind Power ” Tese de doutorado, Universidade Técnica da Dinamarca, Lyngby, 2003;
- [4] CAUE – Comitê Argentino de Usuário EMTP-ATP, Rule Book , 2001
- [5] M. Liserre, F. Blaabjerg, S. Hansen “Design and Control of na LCL-filter based Three-phase Active Rectifier”, Conf. Rec. IAS, Chicago, USA, 2001.
- [6] Selênio R. Silva– “Análise da Integração de Usinas Eólicas na Rede Elétrica” – V SBQEE – Agosto de 2003;
- [7] Slootweg, J.G., Polinder, H. & Kling, W.L.– “Initialization of Wind Turbine Models in Power Systems Dynamics Simulations”, IEEE Porto Power Tech Conference, Portugal, Sep/2001.
- [8] D. Novotny e T. Lipo, “Vector Control and Dynamics of AC Drives”. Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [9] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEE Std 519-1992