

CONSTITUIÇÃO FÍSICA E CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS ASSOCIADAS COM UNIDADES DE GERAÇÃO EÓLICA À MÁQUINA DE INDUÇÃO TRIFÁSICA DUPLAMENTE EXCITADA

L. P. Moura, M. L. R. Chaves, J. C. Oliveira, I. N. Santos, P. H. O. Rezende
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG

Resumo – A crescente busca pela utilização de fontes alternativas de energia tem motivado a comunidade científica a desenvolver e aprimorar técnicas de aproveitamento da energia eólica. De fato, estes aproveitamentos tem merecido fortes incentivos governamentais e privados, tornando-se assim uma fonte de energia alternativa cada vez mais competitiva e atrativa. Situado neste contexto, o presente trabalho encontra-se centrado nas características de funcionamento das máquinas de indução trifásicas de rotor bobinado e em discussões relacionadas às principais características de operação dos sistemas de geração eólica de velocidade variável. Para tanto, é feita uma modelagem simplificada na plataforma ATP de um sistema de geração eólica dotado de um gerador de indução trifásico duplamente excitado, obtendo, assim, uma ferramenta de análise aos fins aqui almejados.

Palavras-chave – Energia eólica, geradores de indução, conversores eletrônicos, modelagem computacional.

CHARACTERISTICS OPERATION OF WIND POWER GENERATION SYSTEMS WITH DOUBLY-FED INDUCTION MACHINES

Abstract – The increasing search for the use of alternative energy sources has motivated the scientific community to develop and improve the exploit techniques of wind energy for electric energy production. Indeed, this exploit have deserved strong government and private incentives, thus becoming an alternative energy source increasingly competitive and attractive. Situated in this context, the present study is focused on the operating characteristics of the three-phase wound rotor induction machine and in discussions related to main operating characteristics of wind generation systems with variable speed. Furthermore, a simplified modeling is performed on ATP, of a wind power generation system provided with a three-phase doubly-fed induction generator, thus, obtaining, an analysis tool to the purpose here intended.

Index Terms – Wind energy, induction generators, electronic converters, computational modeling.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, reconhece-se grandes esforços para o aprimoramento das tecnologias voltadas para os sistemas de geração eólica de velocidade variável [1]. Como a própria designação esclarece, estes arranjos operam com velocidades que dependem do vento e empregam turbinas concebidas para extrair a máxima potência numa ampla faixa de velocidades [2]. Quanto ao acoplamento destas unidades com a rede elétrica, visto que as variações na velocidade do vento são responsáveis por rotações não controladas dos geradores, o que resulta em variações da frequência das tensões geradas, fato este determinante para o emprego de conversores eletrônicos destinados a adequação e conexão dos complexos eólicos e suprimento de cargas [3].

Um outro aspecto relevante está no fato de que em sistemas de geração eólica com as características supra postas, a conversão da energia mecânica em elétrica se apoia no uso de geradores síncronos e de indução. Neste cenário, não obstante a crescente utilização da tecnologia à máquinas síncronas, não se pode ignorar que as máquinas de indução, diante de seus fortes atrativos operacionais, ainda se mantêm competitivas e encontradas em um grande número de empreendimentos eólicos [4].

Em relação as topologias alicerçadas nos geradores de indução, é possível identificar vários arranjos em prática ou propostos na literatura técnica especializada. Muito embora tal reconhecimento, para fins deste trabalho, a topologia selecionada é a do gerador de indução trifásico duplamente excitado, cuja abreviação comumente adotada e advinda do inglês, é DFIG (*Double Fed Induction Generator*). O termo "duplamente excitado", ou "duplamente alimentado", reflete ao fato de que o estator da máquina é alimentado pela rede elétrica e, ao mesmo tempo, seu rotor é suprido por um conversor eletrônico.

Empregando tal arranjo, este artigo se reveste do objetivo de apresentar suas principais características de funcionamento e de operação, bem como apresentar os resultados obtidos de uma modelagem computacional simplificada, a qual foi prontamente detalhada em [5].



II. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

Os principais componentes que perfazem uma unidade de geração eólica com a configuração explorada neste trabalho se apresentam condizentes com a ilustração constante da Fig. 1 [1]. Nesta pode-se identificar os seguintes componentes principais: **1) Pá (ou lâmina):** concebidas com perfil aerodinâmico, são responsáveis pela extração de potência do vento; **2) Atuador do controle do ângulo *Pitch*:** responsável pelo controle do ângulo das pás, as quais giram em torno de seu próprio eixo de maneira a reduzir a extração de potência no caso de ocorrência de ventos com velocidades elevadas; **3) Cubo:** fixa as pás ao eixo principal da turbina, para o qual é transmitida a potência extraída do vento; **4) Eixo principal:** transfere o conjugado primário do rotor da turbina para a caixa de velocidades; possui baixa velocidade de rotação; **5) Caixa de velocidades:** adapta a velocidade do eixo principal aos valores requeridos pelo gerador; **6) Freios mecânicos:** podem parar o rotor da turbina em condições climáticas adversas, além de ser utilizado como "freios de estacionamento" quando a turbina não está em funcionamento; **7) Máquina elétrica de indução de rotor bobinado:** responsável pela conversão eletromecânica de energia; **8) Conversores eletrônicos, sistema de controle e dispositivos de proteção;** **9) Transformador de potência;** **10) Anemógrafo:** registra continuamente a direção e a velocidade instantânea do vento; **11) Atuador do controle do sistema *Yaw*:** mecanismo responsável pela orientação direcional da turbina eólica, mantendo o rotor da turbina alinhado com a direção preferencial do fluxo de ar; **12) Armação da gôndola, ou cabine:** abriga todos os equipamentos suspensos pela torre de apoio; **13) Torre de apoio:** base de sustentação da cabine e da turbina.

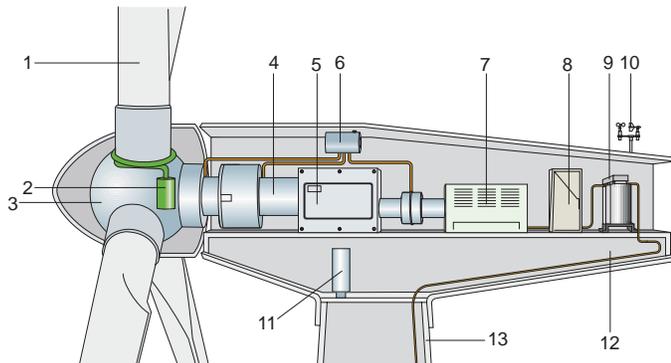


Figura 1 - Disposição típica dos principais componentes de um sistema de geração eólica à máquina de indução duplamente excitada.

A máquina de indução e os conversores eletrônicos são, geralmente, projetados para baixa tensão. Sendo assim, a conexão entre esses componentes e a rede elétrica (em média tensão) é feita, via de regra, a partir de um transformador de potência, bem como a conexão entre as diversas turbinas eólicas de um parque eólico. A conexão elétrica entre estes componentes pode ser verificada através da Fig. 2 [6].

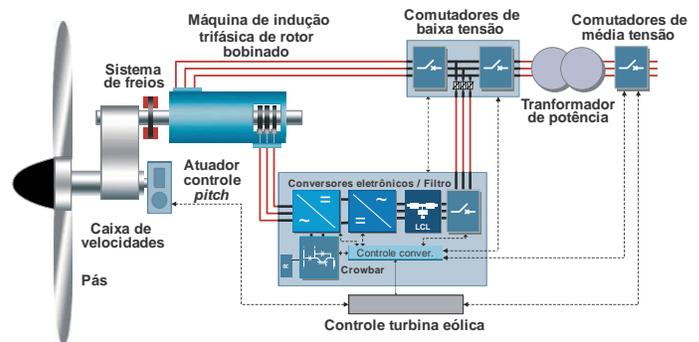


Figura 2 – Conexão elétrica dos principais componentes de um sistema de geração eólica à máquina de indução duplamente excitada com estator em baixa tensão.

Em sistemas cuja máquina de indução possui tensão nominal inferior à 1 kV, o estator da mesma é conectado diretamente ao conversor eletrônico e este ao primário do transformador. O secundário do transformador, por sua vez, é ligado ao ponto de conexão do parque de geração e a concessionária local.

No que diz respeito aos conversores eletrônicos, os mesmos são necessários para que a máquina de indução opere como gerador independente da velocidade do eixo mecânico. Basicamente, a principal função do conversor eletrônico conectado do lado do rotor é controlar o conjugado eletromagnético da máquina de indução. Por outro lado, o dispositivo eletrônico do lado da rede tem por objetivo fornecer ou extrair potência do rotor da máquina, em função da velocidade do eixo mecânico.

Os conversores eletrônicos, tanto do lado do rotor quanto do lado da rede, conforme destacados na Fig. 3, geralmente empregam o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) em sua concepção. Na topologia indicada, é possível identificar vários outros componentes, cujas funcionalidades são amplamente conhecidas no campo da eletrônica de potência. São eles: capacitores do elo de corrente contínua (*link CC*), filtros LCL e dispositivos de proteção e de manobra [6].

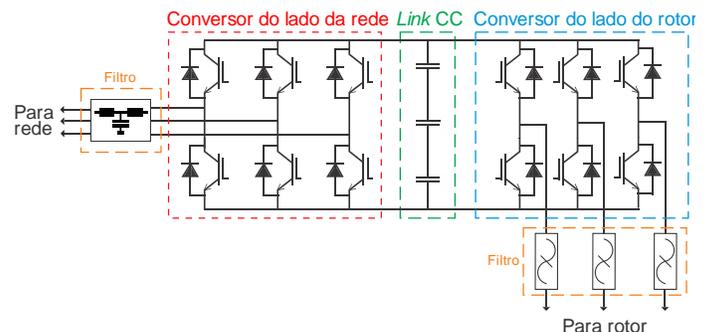


Figura 3 - Arranjo típico dos conversores eletrônicos.

Somado aos componentes supracitados, as unidades de geração em foco ainda compreendem componentes auxiliares para prevenir sobrecargas e garantir que a tensão no *link* de corrente contínua (*link CC*) não ultrapasse sua capacidade nominal. Um destes elementos auxiliares corresponde ao circuito *Crowbar*, o qual se caracteriza por um conjunto de resistências conectadas no

rotor do gerador de indução durante variações de tensão na rede elétrica ou durante operações com velocidades acima da velocidade síncrona, termo associado com a frequência nominal da rede elétrica de conexão e com o número de polos do gerador. Ainda, em alguns sistemas, são empregados conversores CC-CC cujo objetivo é aprimorar o controle de tensão do *link CC* [6, 7].

Um outro aspecto meritório de destaque é que os conversores eletrônicos têm uma potência nominal significativamente menor do que a total da máquina de indução empregada. De fato, usualmente, a potência dos conversores correspondem apenas a um terço da potência nominal da máquina, o que torna este sistema de conversão atrativo do ponto de vista de econômico. No entanto, vale ressaltar que a fração de potência dos conversores eletrônicos em relação à máquina de indução depende da faixa de velocidade de operação do conjunto, ou seja, quanto mais ampla a faixa de velocidade, maior deverá ser a potência nominal dos conversores eletrônicos e maior será o custo de implantação do sistema de geração em foco [3].

III. FLUXO DE POTÊNCIA E CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DOS CONVERSORES ELETRÔNICOS

Tendo em vista que o fluxo de potência de um gerador de indução duplamente excitado depende da velocidade de operação da máquina, a Fig. 4 apresenta uma ilustração típica para a relação entre a potência ativa produzida em função da velocidade do eixo da máquina [6].

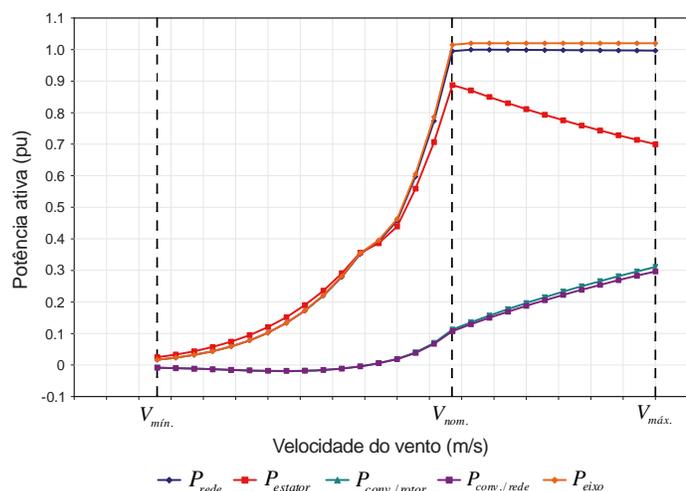


Figura 4 - Fluxo de potência ativa típico de um gerador de indução duplamente excitado.

Na figura anterior pode-se observar que, para determinadas condições de vento, a potência que se estabelece no estator é maior que a disponibilizada no eixo da máquina. Tal condição é perfeitamente compreensível, uma vez que os conversores eletrônicos injetam potência ativa ao circuito do rotor da máquina de indução. De fato, é possível constatar que, a medida que a velocidade do vento aumenta, a potência que flui através do circuito do estator diminui, enquanto que os conversores extraem potência da máquina por meio do circuito do rotor. Ainda, observa-se que a potência ativa que flui através do conversor do

lado da rede é menor que a potência que flui pelo conversor do lado do rotor, devido a dissipação de potência no circuito *Crowbar*.

No que tange as possibilidades operativas, uma das situações compreende o funcionamento do complexo com velocidades dos ventos relativamente baixas. Nestas circunstâncias a máquina opera com velocidade sub-síncrona, ou seja, com velocidades de rotação do eixo inferiores à velocidade síncrona ($\omega_{eixo} < \omega_{H_E}$). Tal situação é ilustrada pela Fig. 5.

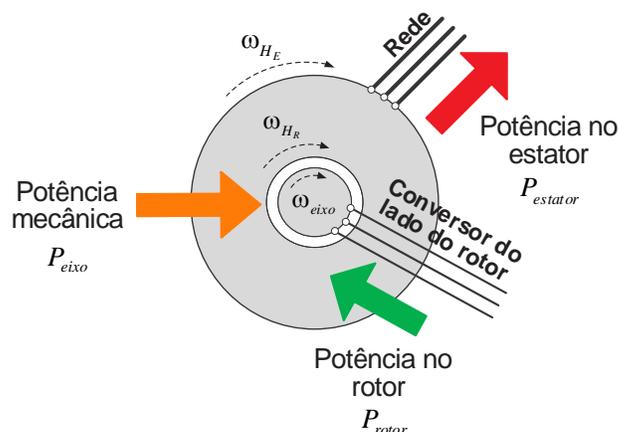


Figura 5 - Operação do gerador em velocidade sub-síncrona.

Para a extração da máxima potência do vento neste modo de operação, as tensões fornecidas aos enrolamentos do rotor pelo conversor eletrônico têm sequência de fases tal que o sentido de rotação do campo magnético produzido pelas correntes (indicado por ω_{H_R}) seja igual ao sentido de rotação do campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos do estator (indicado por ω_{H_E}). Satisfeita essa condição, pode-se observar que:

- O fluxo de potência ativa no rotor dar-se-á no sentido conversor-rotor, potência fornecida pelo capacitor presente no *link CC*;
- A potência entregue ao rotor pelo conversor diminui a energia armazenada no capacitor, o que corresponde à uma tendência de diminuição da tensão no *link CC*;
- O conversor do lado da rede deve manter o nível de tensão no *link CC* a fim de garantir o fluxo de potência ativa para o rotor.

A partir das condições supracitadas, compreende-se que o conversor eletrônico do lado do rotor trabalha como um conversor CC-CA enquanto que o conversor do lado da rede trabalha como um conversor CA-CC.

Por outro lado, para as situações associadas com velocidades de vento relativamente altas, a máquina opera em velocidade sobre-síncrona, ou seja, com rotações do eixo superiores à velocidade síncrona ($\omega_{eixo} > \omega_{H_E}$). Tal situação é ilustrada na Fig. 6.

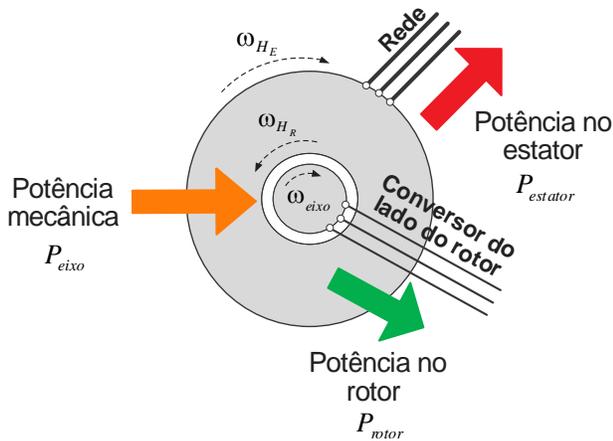


Figura 6 - Operação do gerador em velocidade sobre-síncrona.

Para a condição supra posta, é imprescindível que as tensões fornecidas aos enrolamentos do rotor tenham sequência de fases tal que o sentido de rotação do campo magnético produzido pelas correntes seja contrário ao sentido de rotação do campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos do estator. Em outras palavras, a partir do momento em que a velocidade do eixo da máquina ultrapassa a velocidade síncrona, a sequência de fases das tensões aplicadas aos enrolamentos do rotor deve ser invertida. Satisfeita essa condição, pode-se observar que:

- O fluxo de potência ativa no rotor dar-se-á no sentido rotor-conversor, potência que é fornecida ao *link* CC;
- A potência entregue ao capacitor pelo rotor aumenta a energia armazenada no mesmo, o que corresponde à tendência de elevação da tensão no *link* CC;
- O conversor do lado da rede deve reduzir a tensão do *link* CC para garantir o fluxo de potência ativa.

Assim sendo, percebe-se que o conversor eletrônico do lado do rotor atua como um conversor CA-CC, ao mesmo tempo que o conversor eletrônico do lado da rede atua como um conversor CC-CA.

IV. PRINCÍPIOS GERAIS DE CONTROLE

O controle de um sistema de geração eólica aqui referido é composto, basicamente, por dois mecanismos: controle da turbina através do ângulo das pás; e controle do gerador de indução empregando o conversor eletrônico do lado do rotor [2].

Para velocidades de vento moderadas, as turbinas são normalmente operadas com ângulo *Pitch* mínimo e constante, a fim de maximizar eficiência aerodinâmica [8]. Em contrapartida, a velocidade do eixo mecânico é variável e pode ser alterada pela mudança do ângulo de fase das tensões nos terminais dos enrolamentos do rotor da máquina de indução. Dito isto, resta que o controle do conversor do lado do rotor determine o ângulo de fase ótimo das tensões, grandeza esta que corresponde ao conjugado eletromagnético necessário para que o rotor tenha a velocidade ótima de operação como, por exemplo, as velocidades ω_1 , ω_2 e ω_3 da Fig. 7. A velocidade ótima para operação da

turbina dependerá do vento, ou seja, para cada condição imposta há uma curva característica da potência que pode ser extraída pela turbina [1].

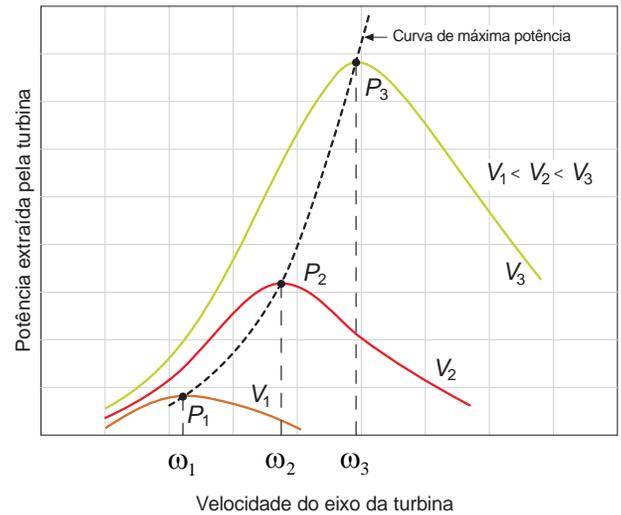


Figura 7 - Pontos de extração de máxima potência (P_1 , P_2 e P_3) para diferentes velocidades do vento (V_1 , V_2 e V_3).

A medida que a velocidade do vento aumenta, a do eixo mecânico crescerá até atingir sua velocidade nominal. A partir deste ponto, a velocidade de rotação deverá ser mantida constante, como indicado na Fig. 8. Uma vez alcançada a potência nominal, a ação combinada dos controles de conjugado eletromagnético e ângulo *Pitch* é então empregada para limitar a potência entregue à rede elétrica e manter a velocidade do rotor dentro de limites aceitáveis [1].

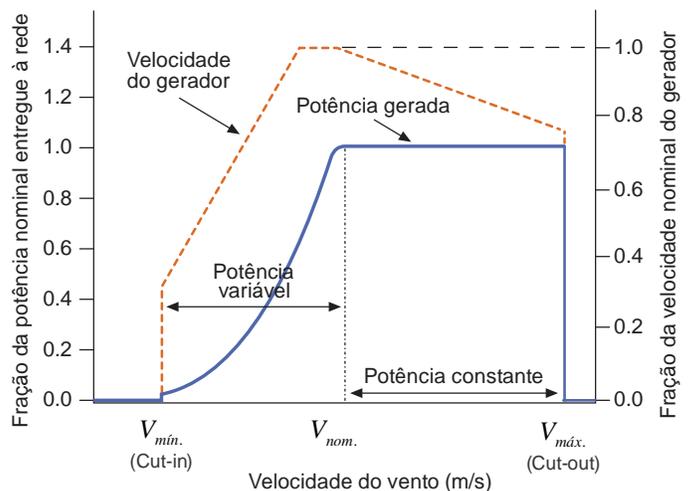


Figura 8 - Faixas de operação da turbina eólica de velocidade variável.

Durante eventuais rajadas de vento ocorridas quando a turbina está operando na faixa de potência constante, a energia excedente é armazenada como energia cinética rotacional no eixo mecânico, que se traduz no aumento da velocidade mecânica. Rapidamente, o controle do conversor eletrônico do lado do rotor atua no sentido de limitar o conjugado eletromagnético. Se a velocidade do vento

permanece alta, o ângulo das pás é alterado para reduzir a eficiência aerodinâmica e, por consequência, o conjugado mecânico da turbina, reduzindo assim a velocidade do rotor. Em contrapartida, se a velocidade do vento cai repentinamente, o conjugado aerodinâmico reduzido se traduz na desaceleração do rotor. Nesta condição a potência gerada é mantida constante através da energia cinética armazenada no eixo. Se a velocidade do vento permanece baixa, o ângulo *Pitch* é alterado, caso seja possível, para aumentar a eficiência aerodinâmica [7]. O mecanismo de controle que representa as condições supracitadas pode ser estruturado em consonância com a lógica apresentada na Fig.9 e advinda de [1].

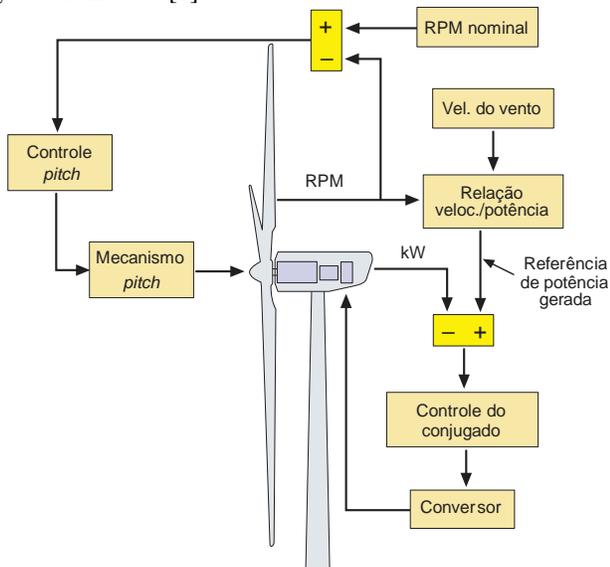


Figura 9 - Diagrama simplificado do mecanismo de controle da potência ativa extraída por uma turbina eólica de velocidade variável.

V. MODELAGEM COMPUTACIONAL E AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO

Tomando-se por base as características físicas e operacionais já mencionadas e utilizando a plataforma ATP como ferramenta para a implementação do complexo de geração à velocidade variável, nos termos constante em [5], foi então estabelecida a ferramenta básica de análise empregada para os estudos avaliativos aqui contemplados.

Uma particularidade meritória de destaque está no fato que o conversor do lado do rotor foi modelado através de uma fonte trifásica ideal cujas tensões possuem amplitudes, frequência e ângulos de fase determinados pelo sistema de controle do próprio conversor. Este, por sua vez, foi estruturado como indicado na linha de código implementada na rotina MODELS, disponibilizada em [5].

A Fig. 10 sintetiza o arranjo em pauta desenvolvido e implementado no *software* ATP.

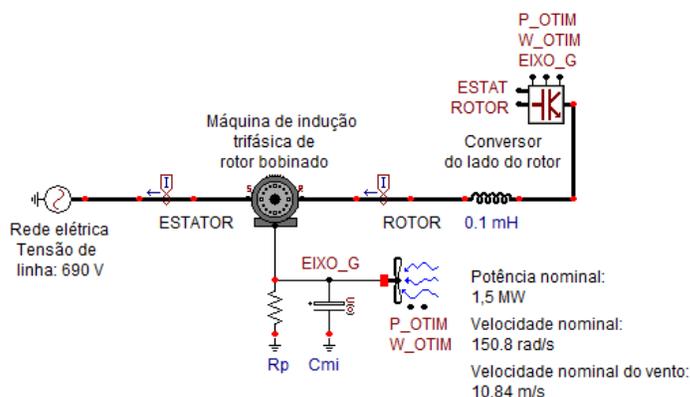


Figura 10 - Sistema de geração eólica à máquina de indução trifásica duplamente excitada implementado no ATP.

Ressalta-se que, por conveniência, omitiu-se a presença da caixa de velocidades normalmente existente em um sistema de geração eólica, uma vez que as variáveis de saída do modelo da turbina eólica são referidas ao eixo do gerador [5]. Ainda, por se tratar de uma modelagem que visa apenas o estudo dos princípios gerais de operação de um gerador de indução trifásico duplamente excitado, omitiu-se o conversor eletrônico do lado da rede, uma vez que o conversor do lado do rotor foi modelado a partir de uma fonte trifásica ideal. Sendo assim, o estator da máquina de indução foi conectado a um barramento infinito, com tensão e frequência constantes.

Por fim, considerou-se a indutância de cabos e do filtro harmônico, os quais são empregados em aproveitamento eólicos convencionais. A presença destes componentes tem sua importância no que diz respeito à operação do controle do conversor eletrônico do lado do rotor.

VI. CARACTERIZAÇÃO DOS CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS

Para fins dos estudos avaliativos de desempenho do arranjo explorado neste trabalho foram utilizadas duas condições operacionais, ambas atreladas com o funcionamento do gerador em regime permanente. São elas:

- Caso 1 – associado com uma situação de funcionamento tal que a velocidade do vento resulta em uma rotação para o rotor em valor inferior à síncrona;
- Caso 2 – a velocidade de vento é alta o suficiente para que a velocidade do eixo da máquina seja maior que a velocidade síncrona.

Para o denominado Caso 1, a velocidade do vento escolhida foi de 8 m/s, condição que corresponde, como já dito, a uma velocidade mecânica menor que a velocidade síncrona. A potência ótima requerida nesta condição de vento serve de referência para o controle do conversor eletrônico, bem como a velocidade ótima do eixo para extração de tal potência. As potências ativas no estator e no rotor do gerador de indução são indicadas na Fig. 11, assim como a potência ativa total entregue à rede elétrica. Percebe-se que, como esperado, o conversor injeta potência ativa no rotor da máquina de indução.

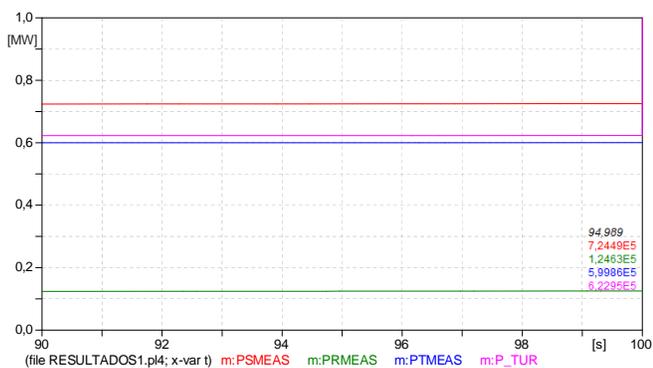


Figura 11 - Potências ativa obtidas para a condição de operação em velocidade sub-síncrona – Caso 1.

Na segunda condição contemplada (Caso 2), para uma velocidade de vento de 11 m/s, a velocidade do eixo é maior que a velocidade síncrona. Neste caso, uma vez que a velocidade do vento é maior que a velocidade nominal, a potência disponibilizada pela turbina é limitada pelo controle *Pitch* e é igual à potência nominal. As potências ativas no estator e no rotor do gerador de indução são indicadas na Fig. 12, bem como a potência ativa total entregue à rede elétrica. Nesta condição, como esperado, o conversor eletrônico extrai potência do rotor da máquina de indução.

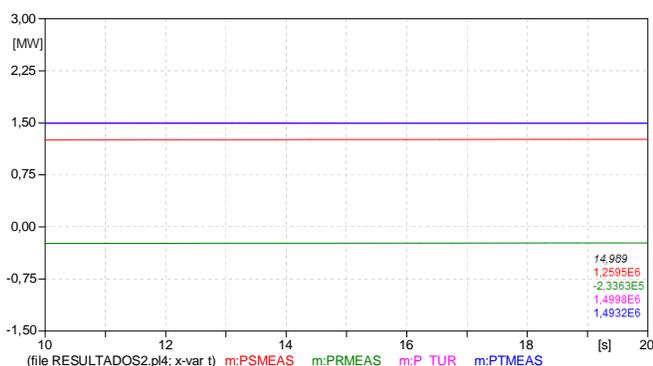


Figura 12 - Potências ativa obtidas para a condição de operação em velocidade sobre-síncrona – Caso 2.

VII. CONCLUSÕES

O presente trabalho, como estabelecido em seus objetivos, objetivou sintetizar os princípios físicos que norteiam os arranjos topológicos associados com unidades de geração eólica empregando máquinas de indução trifásicas duplamente excitadas.

Somado às discussões de carácter mais geral sobre os mencionados arranjos, de forma pontual, foram tecidas considerações sobre o papel dos conversores eletrônicos no controle do gerador e na operação da turbina eólica de velocidade variável. Estas considerações mais específicas se revestiram do fato que tais componentes exercem fundamental papel no processo de regulação da operação do complexo. De fato, pode-

se constatar que o conversor do lado do rotor é capaz de controlar o conjugado eletromagnético a partir da variação do módulo, da frequência e do ângulo das tensões aplicadas aos terminais dos enrolamentos do rotor, e ainda, que os conversores viabilizam a operação do gerador em velocidades abaixo e acima da velocidade síncrona. Neste contexto, foi esclarecido que, para velocidades de vento relativamente baixas, os sistemas de controle dos conversores e da turbina atuam no sentido de otimizar a extração de potência do vento e, em contrapartida, para velocidades relativamente altas de vento, os mesmos devem limitar a extração de potência.

A partir das premissas e condições operativas mencionadas, e baseado em trabalhos conduzidos em [5], foram então mostrados os fundamentos que nortearam um modelo computacional simplificado implementado na plataforma ATP. Através desta ferramenta de análise, estudos de casos foram realizados e seus resultados enfatizaram a consistência física entre os os comportamentos obtidos e o desempenho esperado para a unidade de geração sob a ação de ventos mais e menos intensos.

Por fim, vale reconhecer que os desenvolvimentos feitos se apresentam com o objetivo de fornecer esclarecimentos sob as condições de funcionamento a que estão submetidas as gerações eólicas, em que pese as configurações aqui utilizadas. Portanto, o trabalho não se apresenta com a pretensão de um artigo inovador em conceitos construtivos ou de controle.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] ABB, “Technical Application Papers No. 13 - Wind Power Plants,” 2011.
- [2] G. Michalke, “Variable Speed Wind Turbines - Modelling, Control, and Impact on Power Systems,” Tese de Doutorado, Department for Renewable Energies - Institute of Electrical Power Systems, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2008.
- [3] R. Jones, “Power electronic converters for variable speed wind turbines,” Power Electronics for Renewable Energy (Digest No: 1997/170), IEE Colloquium on, pp. 1/1 - 1/8, 1997.
- [4] AEMO - Australian Energy Market Operator, “Wind Turbine Plant Capabilities Report - Wind Integration Studies,” 2013.
- [5] L. P. Moura, “Gerador de Indução Trifásico Duplamente Excitado – Conceitos, Funcionamento, Modelagem Computacional e Utilização na Geração Eólica,” Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2015.
- [6] ABB, “Hardware manual ACS800-67LC wind turbine converters,” 2011.
- [7] M. Ezzat, M. Benbouzid, L. Harnefors e S. M. Muyeen, “Low-voltage ride-through techniques for DFIG-based wind turbines: state-of-the-art review and future trends,” Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, pp. 7681 - 7686, 2013.
- [8] E. Muljadi e C. P. Butterfield, “Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation,” Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 37, pp. 240 - 246, 2002.