



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO –2

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

**INFLUÊNCIA DE AEROGERADORES DFIG NA ESTABILIDADE DE TENSÃO DE LONGO-PRAZO EM
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Pedro José T. Campos
UFPA

João Paulo A. Vieira(*)
UFPA

Ubiratan Holanda Bezerra
UFPA

RESUMO

Este artigo visa demonstrar a influência de geradores de indução duplamente excitados (DFIG) na estabilidade de tensão de longo prazo quando integrados em sistemas elétricos de potência, em relação aos geradores de indução em gaiola. Tal influência é devida a malha de controle de potência reativa dos aerogeradores DFIG que modifica o comportamento dinâmico dos geradores síncronos, e de outros dispositivos tais como, Limitador de Sobre-Excitação (OEL) e Transformador com Comutação sob Carga (OLTC). Os resultados de simulação no domínio do tempo utilizando um sistema elétrico teste, demonstram que os aerogeradores DFIG podem ser usados para melhorar a estabilidade de tensão de longo-prazo diante de desligamentos de linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Aerogeradores DFIG, Estabilidade de Tensão do Longo-Prazo, Dinâmica de Longa Duração, OLTC, OEL.

1.0 - INTRODUÇÃO

A energia elétrica é hoje um bem imprescindível para a sociedade mundial, sendo uma das bases de sustentação do desenvolvimento econômico dos países. Com o aumento contínuo da população global, torna-se essencial a ampliação das diversas fontes primárias de energia elétrica em um curto prazo de tempo, visando atender, de forma eficiente e sustentada, ao previsível aumento do consumo desta energia nos próximos anos.

A aposta em fontes de energia não poluentes e renováveis tornou-se cada vez mais freqüente, com o intuito de combater a dependência dos combustíveis fósseis na produção de energia, bem como de precaver um eventual colapso de disponibilidade destes combustíveis em longo prazo. Desta forma, os governos por todo mundo começaram a tomar medidas e a traçar metas, em uma extensão do protocolo de Quioto, de modo a reduzir o impacto da emissão de gases poluentes que causam o aquecimento global. Uma das principais medidas é o investimento em energias renováveis (como a eólica, solar, biomassa, ondas e marés). Neste contexto, a energia eólica tem se destacado entre as demais por oferecer, atualmente, uma maior maturidade tecnológica para a geração de energia elétrica.

O uso da energia eólica cresceu na última década, devido ao renovado interesse público, aos benefícios fiscais ligados à sua exploração e, principalmente, devido ao avanço tecnológico das turbinas e conversores. Os países que investiram maciçamente nesta fonte primária de energia comprovaram a viabilidade técnica e econômica da mesma, tornando-a uma das mais promissoras fontes de energia do futuro.

O aproveitamento eólico vem assumindo um papel estratégico relevante no planejamento do sistema elétrico, principalmente, com a perspectiva de novos empreendimentos em geração eólica no Brasil, por meio de investimentos de grupos nacionais e estrangeiros, além da previsão de leilões para contratação. Apesar das

(*) UFPA-CAMTUC-FEE. Rua Itaipu n° 36 – sala 05 – CEP 68.464-000 Tucuruí, PA, – Brasil.
Tel: (+55 94) 37783253 – Fax: (+55 94) 3778-3253 – Email: jpavieira@ufpa.br

vantagens ligadas ao uso da energia eólica, existem imensas dificuldades e desafios no que diz respeito à grande integração desta fonte no Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil. Este crescimento contínuo dos parques eólicos, em número e capacidade de geração, contribui para o surgimento de fenômenos de instabilidades de sistemas de potência, trazendo riscos para o seu bom funcionamento, como a estabilidade de tensão que vem sendo considerada há algum tempo uma preocupação constante na operação dos sistemas de potência modernos.

A estabilidade de tensão refere-se à capacidade do sistema em manter tensões estáveis em todas as suas barras após um distúrbio na rede. Geralmente, a instabilidade aparece na forma de uma queda progressiva e descontrolada na tensão em algumas barras provocada pela tentativa de restabelecimento da carga. A instabilidade de tensão é um fenômeno não-linear, de caráter local, provocado pela alocação inadequada ou pela insuficiência de potência reativa. Os fenômenos envolvidos na estabilidade de tensão são, geralmente, de natureza lenta (minutos ou horas). Ao contrário da instabilidade transitória que se dá poucos segundos após a ocorrência da perturbação da rede, a instabilidade de tensão pode ser comandada por variações na carga e por sistemas de controle e dispositivos de ação discreta.

Dentro deste contexto, este artigo demonstrará a influência da integração de Aerogeradores de Indução Duplamente Excitados (DFIG) na estabilidade de tensão de longo prazo de um sistema elétrico de potência, por meio de simulação no domínio do tempo, quando comparado com o caso onde os Aerogeradores de Indução em Gaiola são usados, devido à influência da malha de controle de potência reativa dos aerogeradores DFIG no comportamento dinâmico dos geradores síncronos, Limitador de Sobre-Excitação (OEL) e de um Transformador com Comutação sob Carga (OLTC) numa dada barra de carga da rede elétrica. Os resultados de simulação do sistema elétrico teste, demonstram que os aerogeradores DFIG podem ser usados para melhorar a estabilidade de tensão diante de desligamentos de linhas de transmissão.

2.0 - MODELAGEM DE AEROGERADORES DFIG PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Para a representação do gerador de indução duplamente excitado em estudos de estabilidade de tensão de longo-prazo, pode-se adotar o mesmo modelo usado em estudos de estabilidade transitória, o qual geralmente tem reduzidas as equações diferenciais do modelo dinâmico de quarta ordem com o fluxo magnético, para um modelo de segunda ordem, que corresponde a desprezar os transitórios do estator, baseado em uma tensão atrás de uma reatância transitória, de acordo com [3]:

$$\bar{v}_{ds} = -\bar{R}_s \bar{i}_{ds}' + \bar{X}' \bar{i}_{qs}' + \bar{e}_d' \quad (1)$$

$$\bar{v}_{qs} = -\bar{R}_s \bar{i}_{qs}' - \bar{X}' \bar{i}_{ds}' + \bar{e}_q' \quad (2)$$

$$\frac{d\bar{e}_d'}{dt} = -\frac{1}{T_o'} \left[\bar{e}_d' - (\bar{X} - \bar{X}') \bar{i}_{qs}' \right] + s\omega_s \bar{e}_q' - \omega_s \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{v}_{qr} \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{e}_q'}{dt} = -\frac{1}{T_o'} \left[\bar{e}_q' + (\bar{X} - \bar{X}') \bar{i}_{ds}' \right] - s\omega_s \bar{e}_d' + \omega_s \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{v}_{dr} \quad (4)$$

Onde X' e X correspondem às reatâncias transitória e de circuito aberto, respectivamente; e_d' e e_q' são as componentes da f.e.m. transitória ou tensão interna, segundo as componentes dos eixos direto e em quadratura, respectivamente; T_o' é a constante de tempo de circuito-aberto expressa em segundos.

Além das equações descritas anteriormente é importante definir as equações das correntes do rotor, levando em conta a utilização das mesmas nas malhas de controle. Tais equações são dadas em p.u. por:

$$\bar{i}_{dr} = \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{ds}' + \frac{\bar{e}_q'}{\bar{L}_m} \quad (5)$$

$$\bar{i}_{qr} = \frac{\bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \bar{i}_{qs}' - \frac{\bar{e}_d'}{\bar{L}_m} \quad (6)$$

3.0 - CONTROLE DE AEROGERADORES DFIG

Nos aerogeradores DFIG, a interligação de conversores estáticos de potência (CA-CC-CA) ao rotor da máquina de indução, recorrendo a chaves estáticas do tipo IGBT com modulação por largura de pulsos, determina uma das grandes vantagens que este tipo de tecnologia de conversão de energia oferece em relação à máquina de indução com rotor em gaiola. A conexão física dos conversores estáticos do tipo PWM “Pulse Width Modulation” interligados ao rotor da máquina e à rede elétrica, denominados neste trabalho de C1 e C2, respectivamente, aos demais componentes que compõem o conversor CA-CC-CC, como “link” CC e circuito de proteção do tipo “crow-bar” inseridos no rotor da máquina, é indicada na Figura 1.

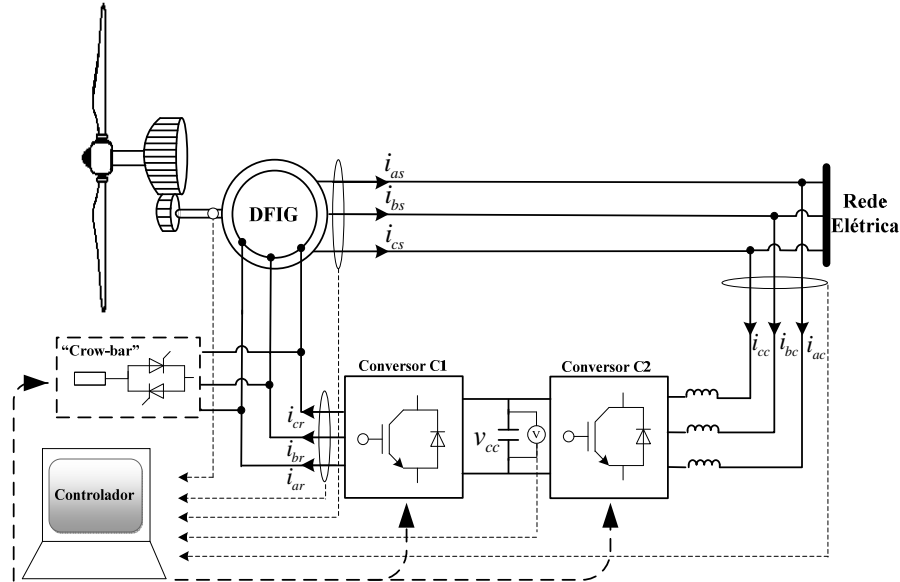


FIGURA 1 – Esquema de Controle do DFIG

O funcionamento do conversor C1 é equivalente ao de uma fonte de tensão controlada, cujo propósito pode ser, por exemplo, o de controlar a potência mecânica da turbina, por meio do controle de velocidade angular do rotor, bem como o de controlar a tensão terminal do gerador. O conversor C2, interligado em cascata com o conversor C1, funciona também como uma fonte de tensão controlada, cujo controle possibilita não somente impor valores de correntes desejadas, permitindo assim o controle do fluxo de potência reativa trocado com a rede elétrica, como também, o controle da tensão no “link” CC.

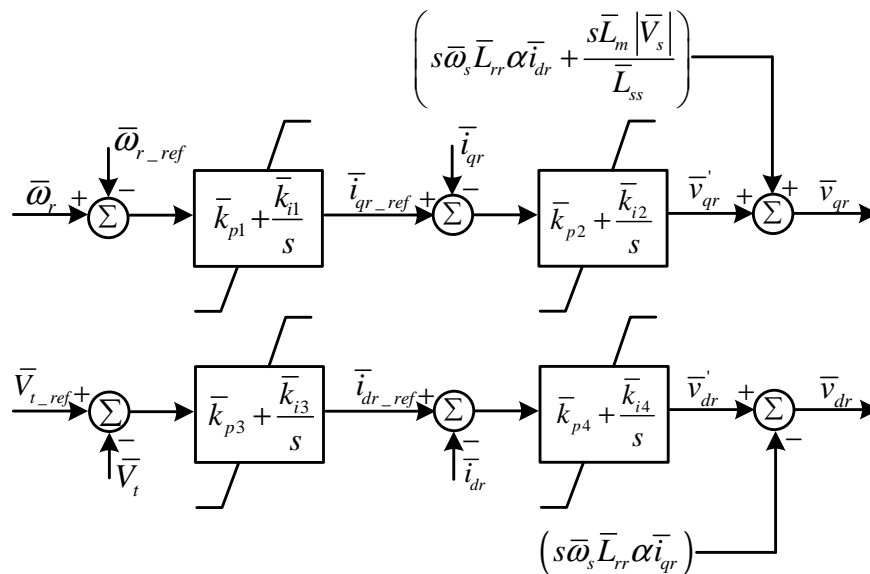


FIGURA 2 – Malhas de Controle Conversor Interligado ao Rotor do DFIG

Os controles do torque eletromagnético (ou velocidade do rotor) e da potência reativa (ou tensão nos terminais) do gerador DFIG são efetuados, por meio do conversor C1, recorrendo-se ao controle das tensões ao longo dos eixos em quadratura e direto a serem injetadas no rotor da máquina, respectivamente, de acordo com as malhas de controle da Figura 2. Uma vez que o controle é baseado no sistema de coordenadas $d-q$, torna-se possível obter um desacoplamento entre as malhas de controle, conforme é descrito em [4]. Neste trabalho somente serão mostradas as malhas de controle do conversor interligado ao rotor, uma vez que a potência nominal do conversor interligado à rede elétrica apresenta menor que a capacidade de potência do gerador DFIG, e consequentemente apresenta menor controlabilidade de potência reativa, por este motivo, será dada ênfase as malhas de controle do conversor C1 do DFIG.

4.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema elétrico adotado nas simulações é oriundo do sistema teste descrito da referência [5], o qual é utilizado para análise dos vários aspectos de estabilidade de tensão. Para fins do estudo pretendido, realizou-se uma modificação no sistema original, inserindo-se um transformador nos trechos das barras 8-12, com a integração de um parque eólico na barra 12.

Os valores em p.u. dos parâmetros das linhas de transmissão e transformadores, ambos representados pelo modelo pi, das cargas elétricas representadas por modelo ZIP, do gerador síncrono representado pelo modelo 4, do regulador de tensão, Limitador de sobre corrente de excitação (OEL), Transformador com comutação de tap (OLTC), são descritos na referência [5].

Para avaliar a influência da grande integração dos aerogeradores DFIG na estabilidade de tensão de sistemas elétricos são considerados dois casos de integração de ambos aerogeradores de indução (DFIG e Gaiola): 1) 300 MW; e 2) 800 MW, conectados como equivalentes a barra 12.

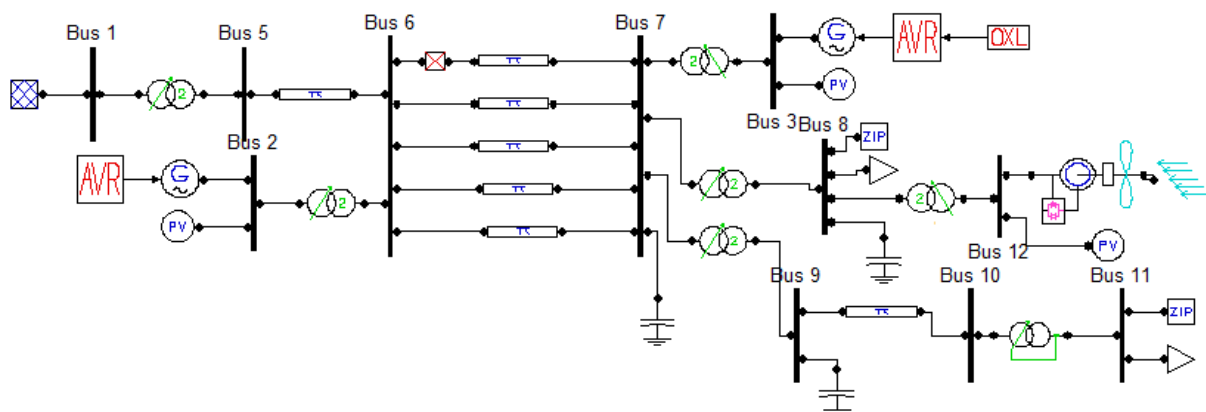


FIGURA 3 – Sistema Elétrico Teste

3.1 Caso 1:

O distúrbio considerado é a perda de uma linha do trecho 6-7 (sem falta). As figuras 4, 5, 6, 7 mostram a resposta no tempo da velocidade do vento, o comportamento das tensões nas barras 12 (parque eólico), 11 e 8 (barras de carga). A correspondente corrente do rotor ao longo do eixo d do gerador DFIG e a posição do TAP do OLTC são mostradas nas figuras 8 e 9, respectivamente.

O efeito de perda da linha provoca inicialmente queda de tensão no sistema. A ação do OLTC restaura a tensão na barra 11 tanto para o DFIG quanto para o Gaiola. As tensões nas barras 12 e 8 são ajustadas em valores abaixo do valor pré-distúrbio, sendo que quando o gerador DFIG foi utilizado, as tensões nas barras apresentaram menores quedas. Este fato se deve à malha de controle de tensão do DFIG cuja corrente do rotor ao longo do eixo d, responsável por tal controle, proporciona a redução do consumo de potência reativa. O sistema apresenta estabilidade de tensão para ambas máquinas assíncronas. O transformador OLTC do trecho 10-11 opera até os 300 s.

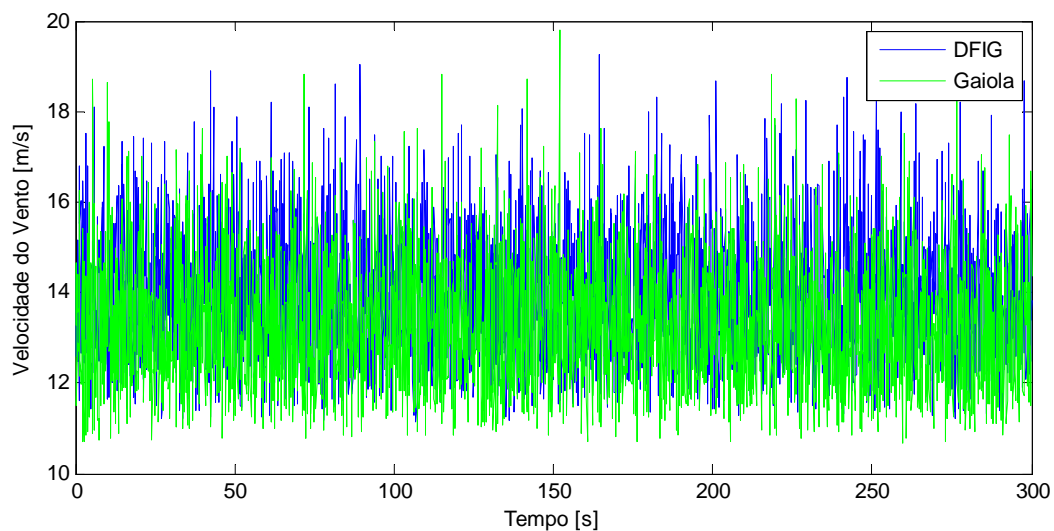


FIGURA 4 – Velocidade do Vento

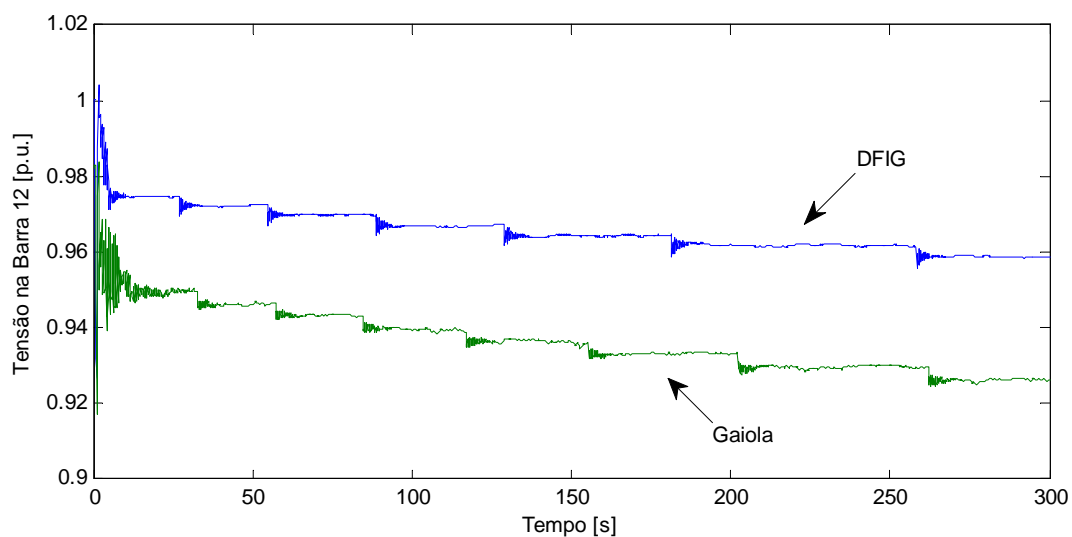


FIGURA 5 – Tensão na Barra 12

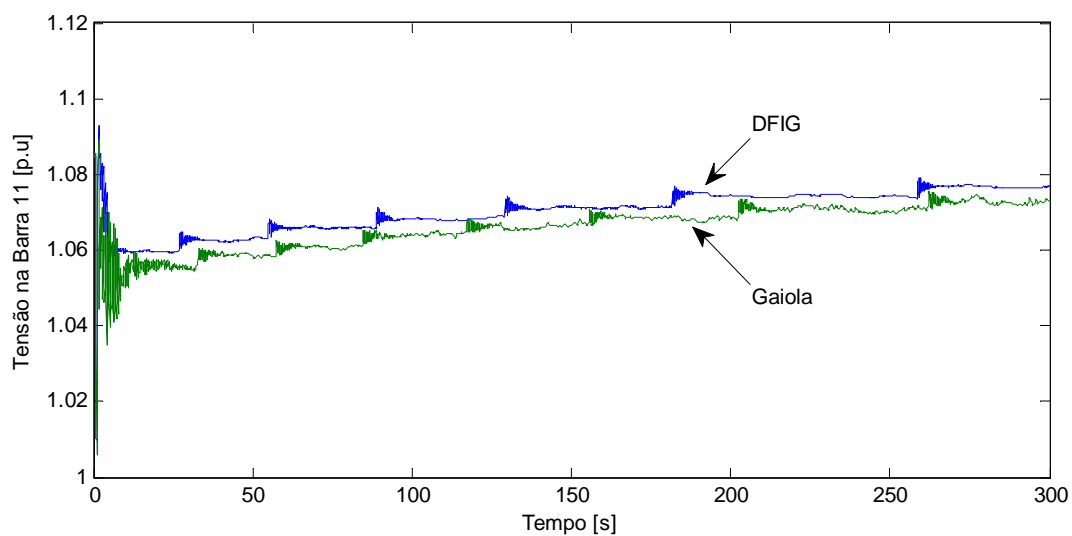


FIGURA 6 – Tensão na Barra 11

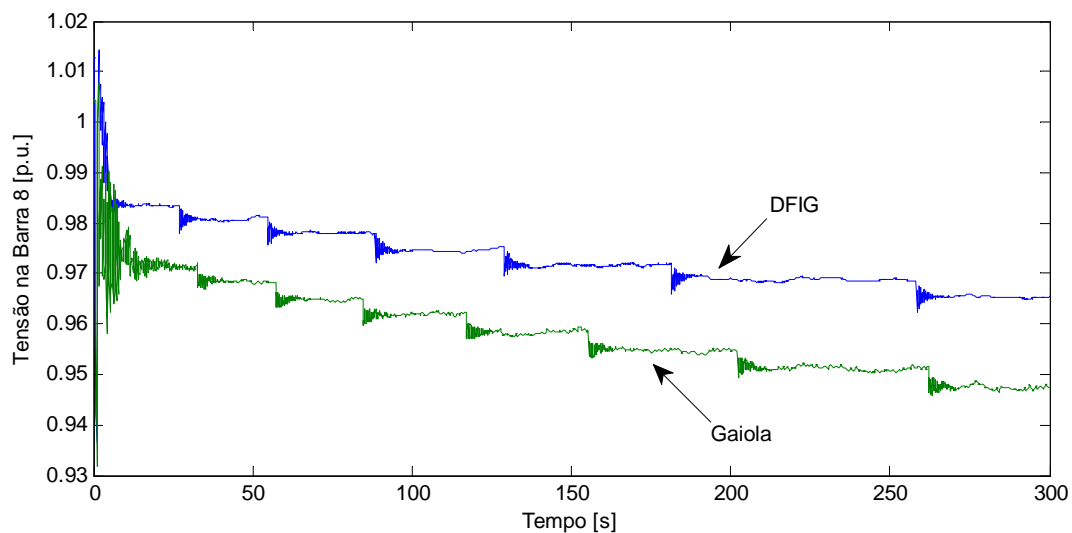


FIGURA 7 – Tensão na Barra 8

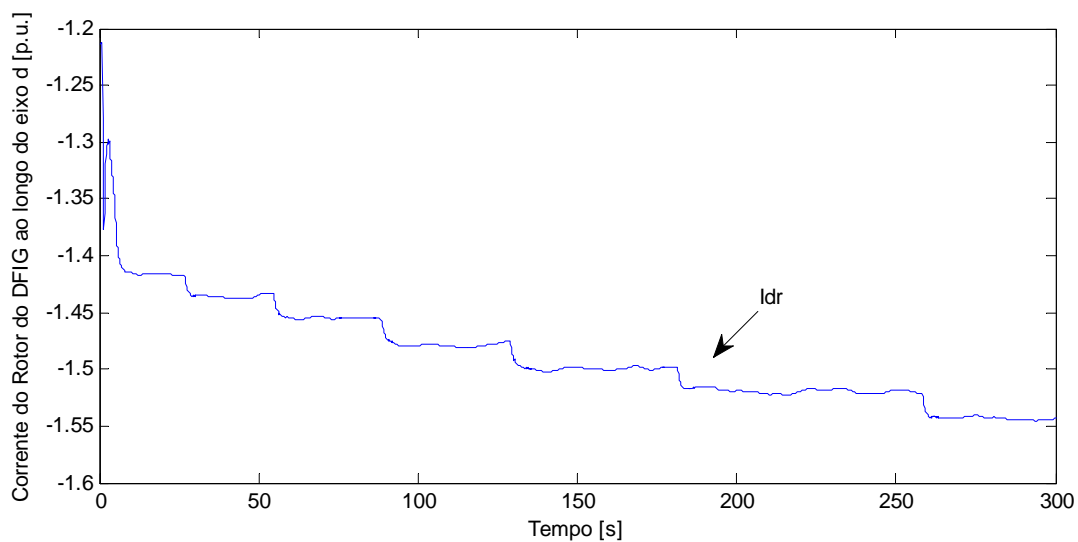


FIGURA 8 – Corrente do Rotor Idr do DFIG

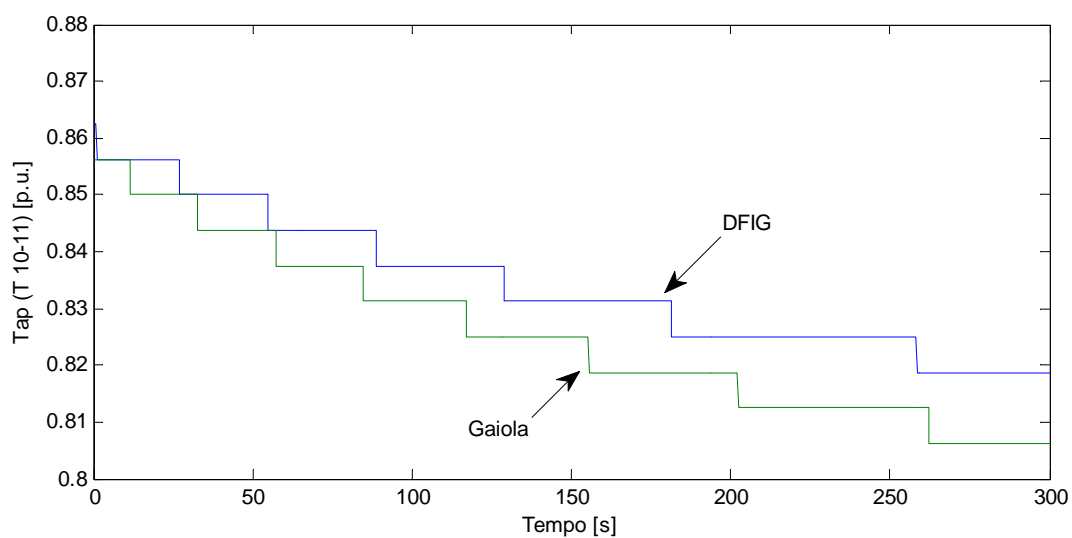


FIGURA 9 – Posição do TAP do OLTC

3.2 Caso 2:

Este caso difere do anterior pelo aumento da integração dos aerogeradores (DFIG e Gaiola) para 800 MW. O distúrbio considerado também é a perda de uma linha do trecho 6-7 (sem falta). As figuras 10, 11 e 12 mostram a resposta no tempo do comportamento das tensões nas barras 12 (parque eólico), 8 (barra de carga) e 3 (barra de geração). As posições do TAP do OLTC são mostradas na figuras 13.

O aumento da integração dos aerogeradores de indução em gaiola provoca o colapso de tensão em aproximadamente 180s, devido ao significativo aumento do consumo de potência reativa por parte dos aerogeradores de indução. A perda da linha torna o sistema elétrico eletricamente mais fraco, e a quantidade de potência reativa solicitada pelos aerogeradores de indução em gaiola pode não ser suficiente, comprometendo a recuperação da tensão em caso de permanência do fornecimento. No entanto, os geradores DFIG contribuem para o aumento da estabilidade de tensão de longo-prazo, como pode ser observado. O limitador de sobre corrente de excitação do gerador 3 é ativado em 180s, quando o gerador de indução em gaiola é utilizado, comprometendo o controle de tensão na barra 3, além disso, o transformador OLTC do trecho 10-11 finaliza a operação antes de 150s, quando a posição do tap atinge o valor de 0.8 p.u (tap limite inferior).

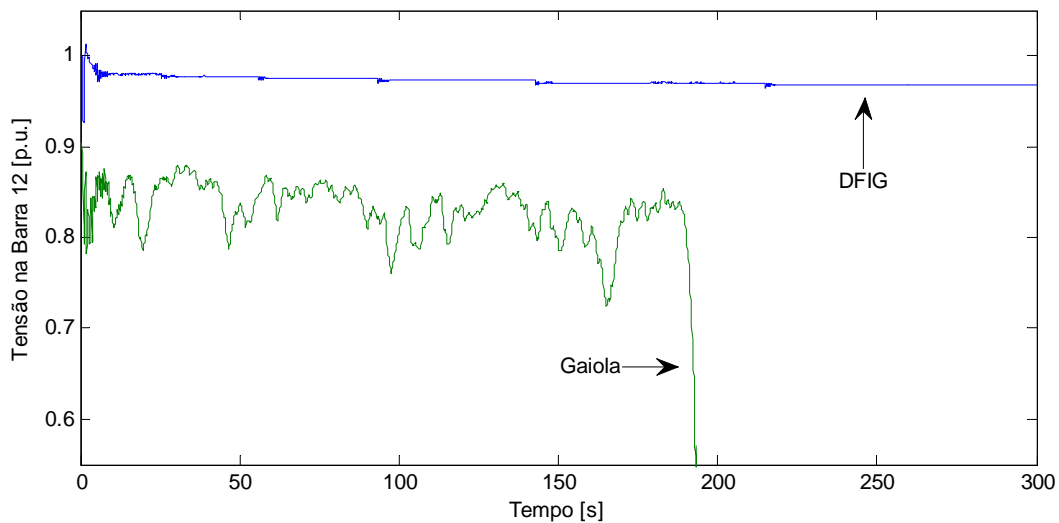


FIGURA 10 – Tensão na Barra 12

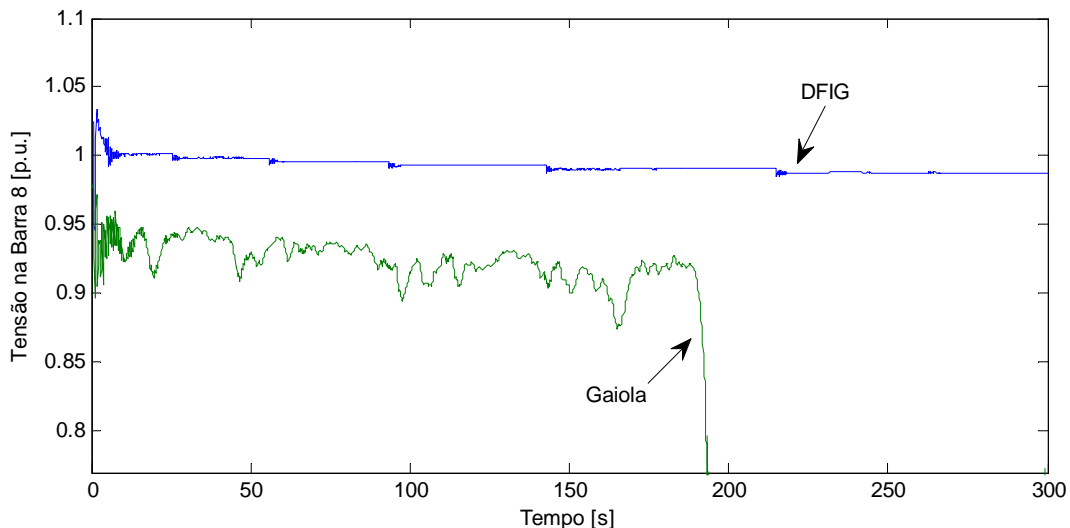


FIGURA 11 – Tensão na Barra 8

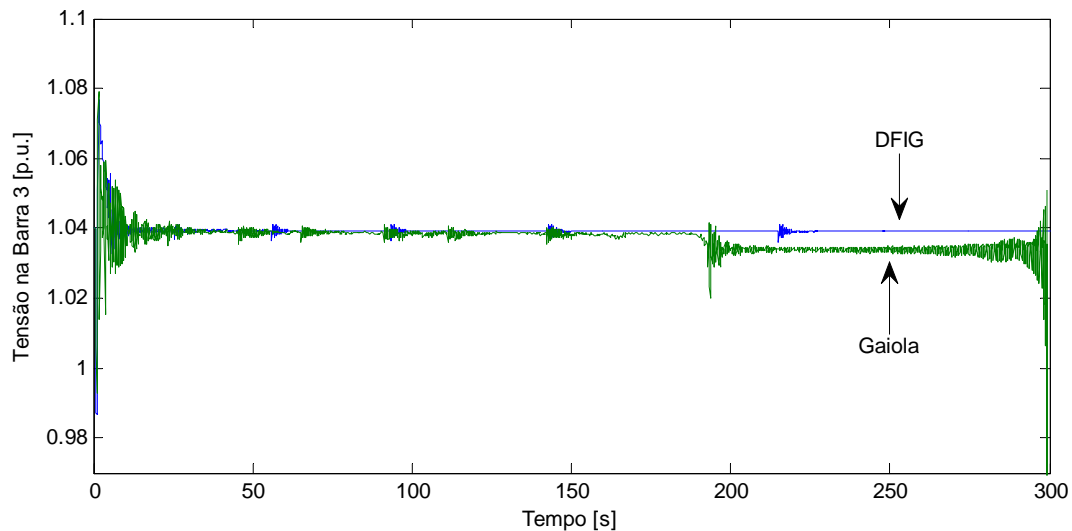


FIGURA 12 – Tensão na Barra 3 do Gerador Síncrono

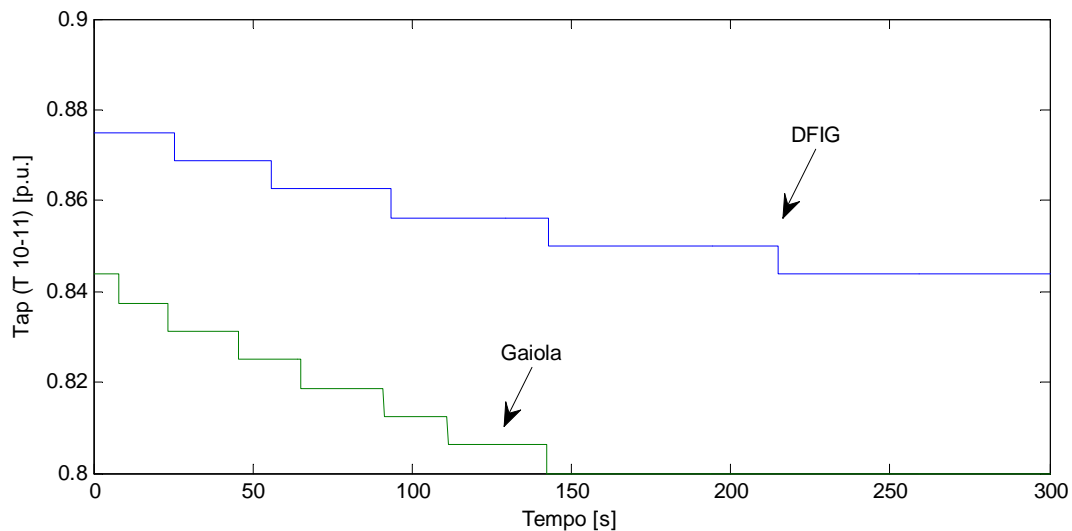


FIGURA 13 – Posição do TAP do OLTC

5.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a influência dos aerogeradores de indução duplamente excitados (DFIG) na estabilidade de tensão de longo prazo quando integrados em sistemas elétricos de potência, em relação aos geradores de indução em gaiola. Tal influência foi devida à malha de controle de potência reativa dos aerogeradores DFIG que modifica o comportamento dinâmico dos geradores síncronos, e de outros dispositivos tais como, Limitador de Sobre-Excitação (OEL) e Transformador com Comutação sob Carga (OLTC). Os resultados de simulação no domínio do tempo demonstraram que os aerogeradores DFIG podem ser usados para melhorar a estabilidade de tensão de longo-prazo diante de desligamentos de linhas de transmissão.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AMARANTE O. A. C.; SCHULTZ, D. J.; BITTENCOURT, R. M.; ROCHA, N. A. – **Wind/Hydro Complementary Seasonal Regimes in Brasil in DEWI Magazin**, n.19, pp.79-86, Ago, 2001.
- (2) JENKINS, N.; ALLAN, R.; CROSSLEY, P.; KIRSCHEN, D.; STRBAC, G. – **Embedded Generation**. United Kingdom, 2000.

- (3) EKANAYAKA, J. B.; HOLDSWORTH, L.; WU, X. G.; JENKINS, N. – **Dynamic Modelling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine** in IEEE Transactions on Power Systems, v.18, n.2, pp.803-809, Mai, 2003b.
- (4) SALMAN, S. K.; TEO, A. L. J. – **Windmill Modeling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Power-Based Embedded Generator** in IEEE Transactions on Power Systems, v.18, n.2, pp.793-802, Mai, 2003.
- (5) KUNDUR, P. – **Power System Stability and Control** – McGraw-Hill, USA, 1994.