

Análise de um Aerogerador com Gerador de Indução Duplamente Alimentado Durante um Afundamento de Tensão

Vítor M. Ramos* Damásio Fernandes Jr.** Washington A. Neves***

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: vitor.ramos@ee.ufcg.edu.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: damasio@dee.ufcg.edu.br)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, (e-mail: waneves@dee.ufcg.edu.br)

Abstract: This paper presents the performance analysis of a variable speed wind turbine with a doubly fed induction generator during a grid voltage dip. Simulations are performed with and without the installation of the crowbar protection, typically present in this kind of wind turbine. It was possible to observe the consequences of the voltage dip on the generator, as well as the importance of the protection to keep the wind turbine within the safe operation conditions.

Resumo: Este trabalho apresenta a análise do desempenho de um aerogerador de velocidade variável com gerador de indução duplamente alimentado durante um afundamento de tensão da rede. Simulações são realizadas com e sem a instalação da proteção *crowbar*, tipicamente presente nesse tipo de aerogerador. Foi possível observar as consequências do afundamento de tensão no gerador, bem como a importância da proteção para manter o aerogerador dentro de condições de operação seguras.

Keywords: Variable speed wind turbine; doubly fed induction generator (DFIG); voltage dip; crowbar protection; MATLAB/Simulink.

Palavras-chaves: Aerogerador de velocidade variável; gerador de indução duplamente alimentado (DFIG); afundamento de tensão; proteção *crowbar*; MATLAB/Simulink.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica ocupa uma parcela cada vez maior na matriz energética de diversos países, tornando-se a forma mais competitiva de energia limpa e verde nas últimas décadas (Chen et al., 2012). De fato, a energia eólica é a segunda fonte de energia que mais cresce no mundo, atingindo um aumento de 13% na capacidade instalada ao longo do ano de 2021, atrás apenas da energia solar (IRENA, 2022).

No cenário brasileiro, a capacidade instalada da energia eólica ultrapassou o patamar de 22 GW, aumentando cerca de 9 vezes na última década, o que corresponde a 12% da matriz energética. Assim, o Brasil encontrava-se na 6ª colocação na classificação mundial de capacidade instalada de energia eólica em 2020, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (2022).

Atualmente, os aerogeradores de velocidade variável estão ganhando cada vez mais espaço frente aos aerogeradores de velocidade fixa, tamanhas as vantagens da operação em velocidade variável. Isso apenas tornou-se possível ao

* Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro. Os autores também agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo apoio por meio do projeto de pesquisa (Termo de Outorga: 3092/2021) do EDITAL No 09/2021 - DEMANDA UNIVERSAL.

conectar os geradores à rede por meio de conversores eletrônicos provenientes do avanço da eletrônica de potência.

Dentre os aerogeradores de velocidade variável, uma das configurações mais comuns corresponde à utilização do gerador de indução duplamente alimentado (do inglês, *Doubly Fed Induction Generator* - DFIG). Entretanto, esse tipo de gerador é muito sensível a perturbações na rede, principalmente em relação à tensão (Chen et al., 2019).

Conforme o notável crescimento da energia eólica no cenário mundial, observa-se uma alta taxa de inserção de novos aerogeradores no sistema elétrico que cresce anualmente. Assim, estudos a respeito desses aerogeradores em situações adversas da rede, como afundamentos de tensão, por exemplo, são de extrema importância.

A adoção da proteção *crowbar* durante afundamentos de tensão em um DFIG é amplamente encontrada na literatura. Al-Quteimat et al. (2017) apresentam o desempenho de uma turbina de pequeno porte (3,5 kW) durante um afundamento de tensão com e sem *crowbar*. Diretrizes para o dimensionamento do valor da resistência da proteção são apresentadas por Morsali et al. (2020). Já na revista *Wind Engineering*, a mais antiga e confiável dedicada à energia eólica, diversos artigos tratam de métodos de otimização e melhorias do desempenho do DFIG com *crowbar* durante afundamentos de tensão, como é o caso dos trabalhos de

Simon et al. (2019), Ling et al. (2012) e Cheng and Cai (2011).

Neste trabalho, o desempenho de um aerogerador de velocidade variável de grande porte com um DFIG é analisado durante um afundamento de tensão da rede. São realizadas simulações do DFIG com e sem a instalação da proteção *crowbar* tipicamente adotada nesses aerogeradores de modo a se evidenciar a necessidade da proteção, bem como destacar os principais efeitos que devem ser considerados no seu dimensionamento.

2. AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM UM DFIG

Afundamentos de tensão são definidos como quedas repentinas na tensão da rede que podem ser causadas, por exemplo, por faltas, sobrecargas ou energização de transformadores. Quando o estator do DFIG é submetido a um afundamento de tensão, a análise do desempenho do fluxo do estator é essencial para se entender os problemas resultantes do afundamento. Conforme exposto por Abu-Rub et al. (2014), quando ocorre o afundamento de tensão, o fluxo do estator não consegue atingir seu novo valor de regime permanente tão rapidamente quanto a tensão no estator, apresentando uma dinâmica mais lenta. Para analisar os efeitos dessa limitação na taxa de variação do fluxo do estator, é útil escrever (1) a partir das equações da tensão e do fluxo no estator e no rotor obtidas pela modelagem do DFIG no domínio $\alpha\beta$ na forma de vetores espaciais, o que permite representar o DFIG conforme o circuito equivalente compacto apresentado na Figura 1a.

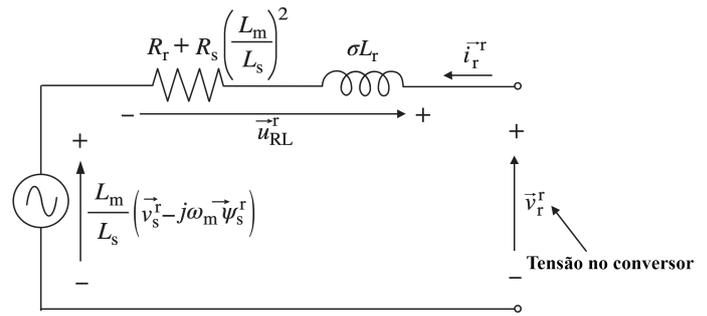
$$\mathbf{v}_r^r = \frac{L_m}{L_s} (\mathbf{v}_s^r - j\omega_m \boldsymbol{\psi}_s^r) + \left[R_r + \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^2 R_s \right] \mathbf{i}_r^r + \sigma L_r \frac{d\mathbf{i}_r^r}{dt} \quad (1)$$

Em (1), \mathbf{v}_r^r é o vetor espacial da tensão no rotor representado no domínio DQ , L_m é a indutância de magnetização, L_s é a indutância do estator, \mathbf{v}_s^r é o vetor espacial da tensão no estator representado no domínio DQ , ω_m é a frequência angular do rotor, $\boldsymbol{\psi}_s^r$ é o vetor espacial do fluxo no estator representado no domínio DQ , R_r é a resistência do rotor, R_s é a resistência do estator, \mathbf{i}_r^r é o vetor espacial da corrente no rotor representado no domínio DQ , σ é o coeficiente de dispersão e L_r é a indutância do rotor.

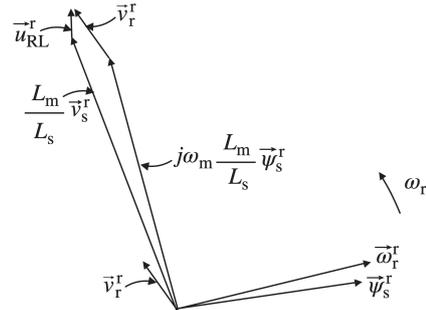
A partir de (1), é possível obter o diagrama de vetor espacial do DFIG operando em regime sub-síncrono visto na Figura 1b.

Já na Figura 2, tem-se a evolução dos vetores espaciais desde o momento em que a tensão do estator é reduzida até o novo regime permanente atingido durante o afundamento de tensão.

Assim, quando a máquina está operando em um dado ponto em regime permanente e uma queda repentina ocorre na tensão do estator, um incremento abrupto deve ser feito na tensão do rotor para prevenir um grande aumento na corrente do rotor, conforme pode ser visto na Figura 2. A tensão do rotor necessária para isso é bem maior do que aquela nas condições antes do afundamento, uma vez que a redução do fluxo do estator é lenta. Após



(a) Circuito equivalente do DFIG para a análise de afundamento de tensão.



(b) Diagrama de vetor espacial do DFIG em regime sub-síncrono.

Figura 1. Representações do DFIG e suas variáveis em condições normais de operação.

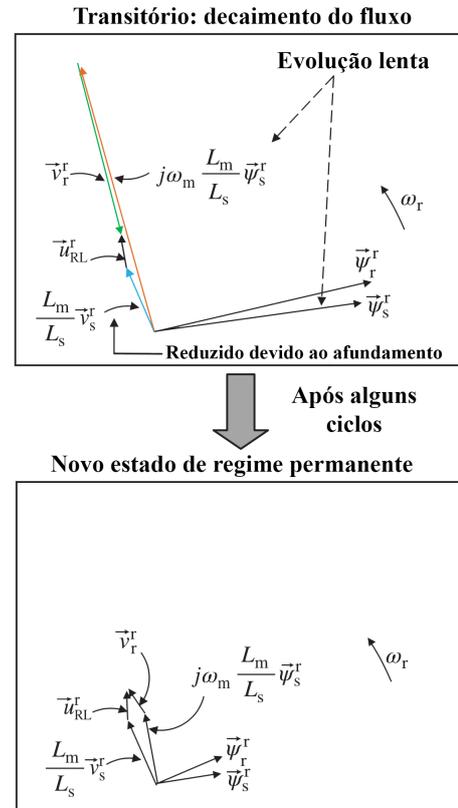


Figura 2. Evolução dos vetores espaciais a partir do início do afundamento de tensão até o novo estado de regime permanente.

alguns ciclos, o novo estado de regime permanente atingido

é similar ao estado anterior ao afundamento, porém com menores amplitudes dos vetores espaciais.

Portanto, para controlar as correntes do rotor e mantê-las dentro dos limites seguros de operação, o valor da tensão do rotor deve ser extremamente alto, principalmente no início do afundamento de tensão. Entretanto, o dimensionamento típico dos conversores conectados ao rotor corresponde a uma capacidade máxima de fornecer aproximadamente 1/3 da tensão do estator. Devido a essa limitação do conversor, em situações de afundamentos severos de tensão, o aerogerador com DFIG dificilmente consegue manter as correntes do rotor dentro dos limites seguros. Todas essas considerações são válidas, também, para a situação em que o gerador está em regime super-síncrono. Para resolver esse problema, uma proteção conhecida como *crowbar* é adotada nesse tipo de aerogerador, tornando a variação do fluxo do estator mais rápida e protegendo o conversor do rotor.

3. MODELAGEM

A instalação da proteção *crowbar* é feita nos terminais do rotor, conforme a Figura 3, sendo composta, no caso deste

trabalho, por um retificador, uma chave e um resistor. Essa é apenas uma dentre várias topologias de *crowbar* existentes (Abu-Rub et al., 2014).

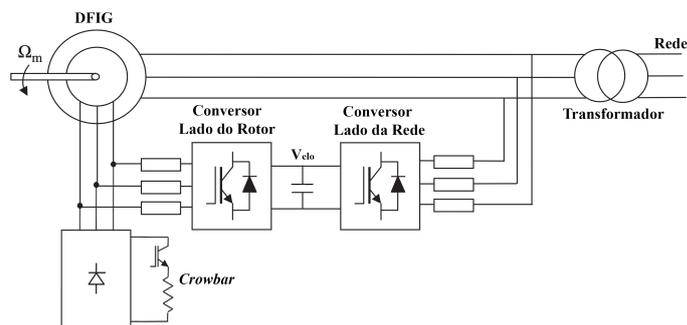


Figura 3. DFIG equipado com *crowbar*.

O aerogerador de velocidade variável com DFIG é modelado matematicamente e representado no ambiente computacional do MATLAB/Simulink[®] conforme detalhado por Ramos et al. (2021). Dessa forma, a inclusão da proteção no modelo construído foi realizada conforme destacado na Figura 4.

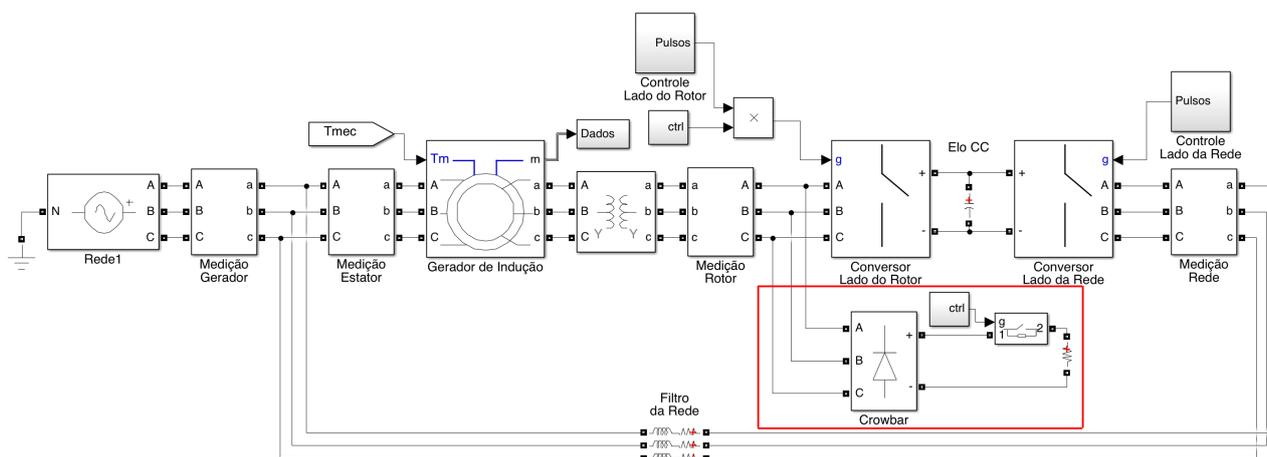


Figura 4: Modelo do DFIG programado com a adição da proteção *crowbar*.

4. CASO DE ESTUDO

Para analisar o desempenho do DFIG com *crowbar*, foi realizada a simulação de um afundamento de tensão de 0,9 p.u. com duração de 500 ms iniciado no instante $t_{início} = 1$ s e finalizado no instante $t_{fim} = 1,5$ s. Em seguida, o valor da tensão é incrementado gradativamente em forma de rampa, sendo totalmente recuperado no instante $t_{rec} = 2,17$ s. Esse sinal de tensão é apresentado na Figura 5.

Em um aerogerador real, a ativação da proteção e a interferência na lógica de controle do conversor é realizada automaticamente a partir da detecção de: sobrecorrente no rotor, sobretensão no elo CC ou queda na tensão da rede (por meio de PLL, por exemplo). Entretanto, na simulação realizada a partir das tensões da Figura 5, os instantes de tempo em que ocorre o afundamento de tensão são conhecidos, o que permite definir o momento exato da atuação da proteção e suas consequências, conforme o procedimento a seguir:

- Em $t = t_{início}$: a proteção *crowbar* é ativada e o conversor do lado do rotor é desativado;
- Em $t = t_{crowbar} = 1,1$ s: passados 100 ms da sua atuação, a proteção é desativada e o conversor do lado do rotor é reativado.

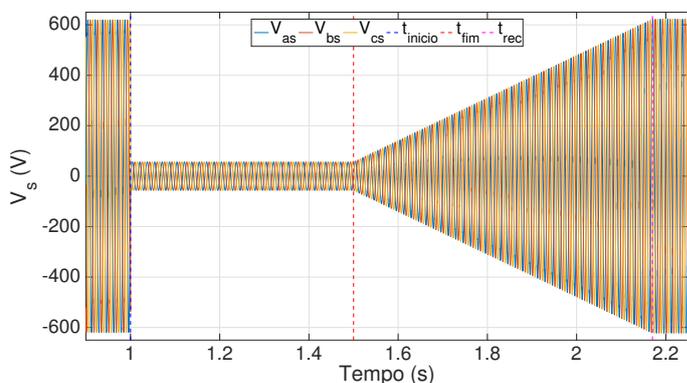


Figura 5. Sinal da tensão no estator com afundamento.

Além disso, é comum a exigência, pelos procedimentos padrões de rede, de injeção de potência reativa na rede durante o afundamento de tensão. Entretanto, a capacidade de fornecimento de potência reativa pelo estator do DFIG é limitada durante o afundamento de tensão, uma vez que o fluxo do estator foi rapidamente reduzido pela atuação da proteção *crowbar*. Assim, uma forma de maximizar a potência reativa injetada pelo estator é maximizar a componente *d* da corrente do rotor, i_{dr} , tornando-a igual à corrente nominal do estator, I_s , enquanto a componente *q* é mantida igual a zero. Assim, tem-se, também, o procedimento abaixo:

- Em $t = t_{Q_s} = 1,15$ s: passados 50 ms do fim da atuação da proteção, o valor da corrente nominal do estator é tomado como referência para a componente *d* da corrente do rotor ($i_{dr}^* = I_s$), enquanto a componente *q* é mantida igual a zero ($i_{qr}^* = 0$);
- Em $t = t_{rec}$: após a recuperação da tensão da rede, a intervenção no controle devido ao afundamento é finalizada. Assim, a referência da componente *q* da corrente do rotor volta a ser obtida a partir do torque de referência.

Nas simulações realizadas, a velocidade do vento foi considerada constante e igual a 8,5 m/s. Além disso, o modelo também foi submetido ao afundamento de tensão da Figura 5 sem a proteção *crowbar* aplicada. Nesse caso, não foi realizada atuação alguma nos conversores do DFIG, que foram supostos capazes de suportar as sobretensões e sobrecorrentes decorrentes do afundamento de tensão.

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos para o módulo do fluxo do estator, $|\vec{\psi}_s|$, para as situações sem e com a proteção são apresentadas na Figura 6.

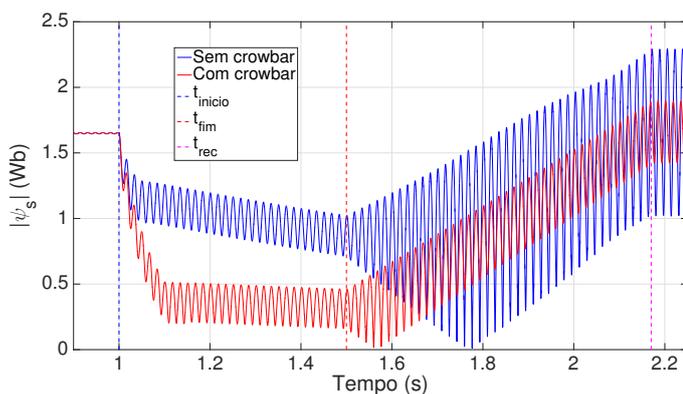
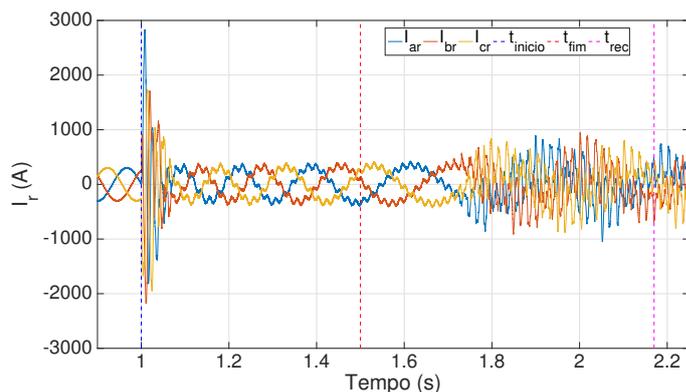


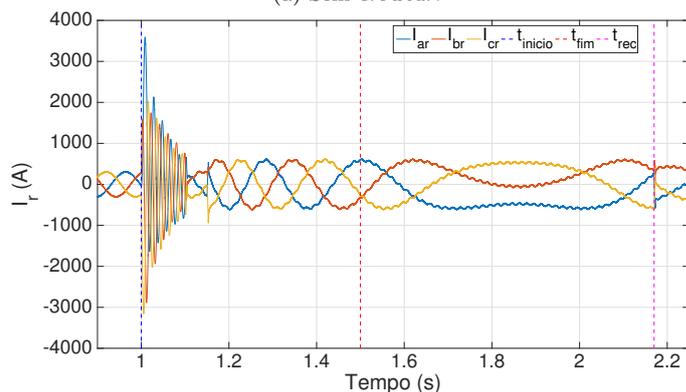
Figura 6. Módulo do fluxo do estator sem e com *crowbar*.

Verifica-se, a partir da análise da Figura 6, como o fluxo do estator decai lentamente quando a proteção *crowbar* não é adotada, provocando todos os problemas descritos na seção 2. Além disso, observa-se que o decaimento do fluxo do estator é consideravelmente acelerado quando há a proteção no DFIG.

As correntes no rotor para as situações sem e com a proteção podem ser visualizadas nas Figuras 7a e 7b, respectivamente.



(a) Sem *crowbar*.



(b) Com *crowbar*.

Figura 7. Correntes no rotor sem e com *crowbar*.

Conforme as Figuras 7a e 7b, observa-se que o afundamento de tensão provoca picos na corrente do rotor tanto no caso sem quanto no caso com *crowbar*. Entretanto, quando não há a proteção, esses picos de corrente circulam, também, pelo conversor do lado do rotor, que pode ser danificado. Já no caso em que há a proteção, é por ela que as correntes do rotor circulam, conforme a Figura 8. Assim, o conversor é protegido das sobrecorrentes.

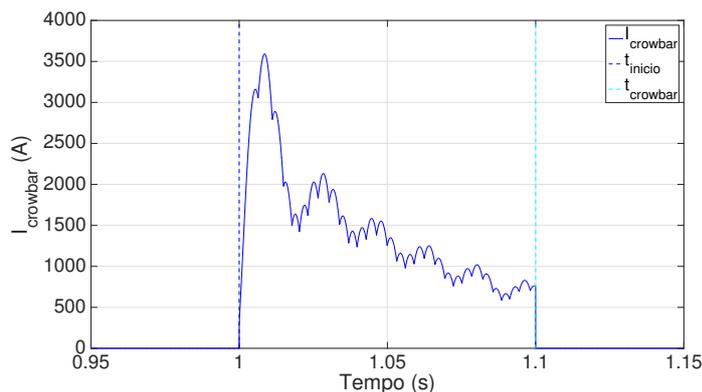


Figura 8. Corrente na proteção *crowbar*.

É importante destacar que a escolha do valor da resistência da proteção, $R_{crowbar}$, afeta significativamente a variação do fluxo do estator da Figura 6 e a corrente da Figura 8. Ao aumentar o valor de $R_{crowbar}$, os picos de corrente no rotor são reduzidos, porém o decaimento do fluxo do estator torna-se mais lento. O oposto ocorre ao reduzir o valor de $R_{crowbar}$. Dessa forma, deve-se buscar o equilíbrio entre os

picos na corrente do rotor e a velocidade do decaimento do fluxo do estator escolhendo cuidadosamente o valor de $R_{crowbar}$. Nesse trabalho, foi adotado $R_{crowbar} = 0,2 \Omega$, favorecendo o decaimento do fluxo em detrimento da redução do pico na corrente do rotor. Como consequência, é possível observar, a partir da comparação entre as Figuras 7a e 7b, que o pico na corrente do rotor foi maior no caso com a proteção instalada. Sendo assim, caso esse pico ultrapasse os limites permitidos para a corrente no rotor, o valor de $R_{crowbar}$ deve ser reajustado.

Além disso, a utilização de um valor fixo para $R_{crowbar}$ pode apresentar resultados mais ou menos satisfatórios de acordo com o grau do afundamento de tensão. Assim, para cada nível de afundamento, o valor fixo de $R_{crowbar}$ pode estar sub ou sobre-estimado. Portanto, é possível a utilização de um sistema de proteção adaptativo para a seleção do valor de $R_{crowbar}$ de acordo com o grau do afundamento de tensão, conforme proposto por Silva (2020).

Com relação à tensão no elo CC, é possível constatar que o afundamento de tensão resulta na perda do controle da tensão, que sobe cerca de 60% acima do seu valor nominal, quando a proteção não é instalada, de acordo com a Figura 9. Em contrapartida, a tensão no elo CC permanece próxima do seu valor nominal mesmo durante o afundamento de tensão quando há a proteção *crowbar*, ainda conforme a Figura 9.

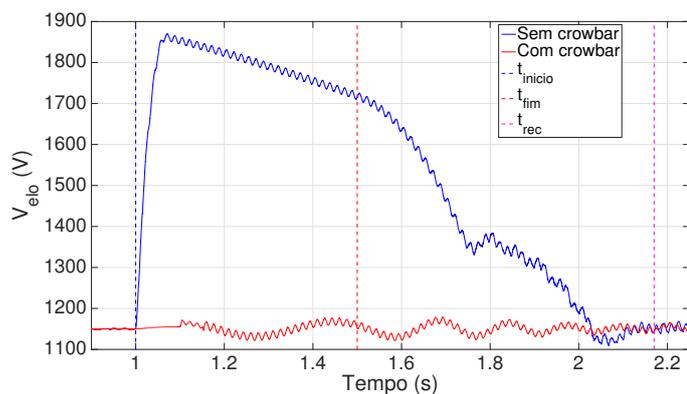


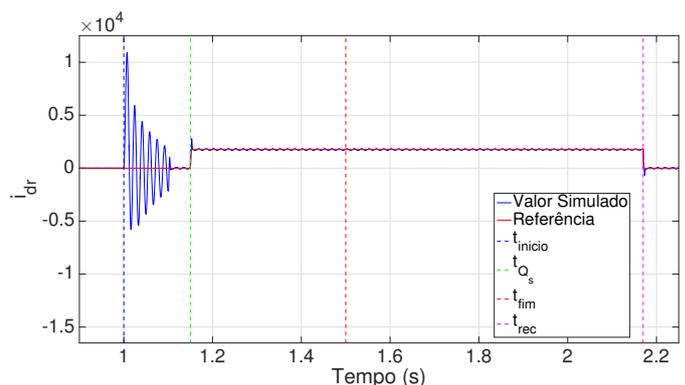
Figura 9. Tensão no elo CC sem e com *crowbar*.

As interferências realizadas nos controles das componentes d e q da corrente no rotor podem ser visualizadas nas Figuras 10a e 10b, respectivamente. Já na Figura 10c tem-se o torque eletromagnético sem *crowbar* enquanto tem-se o torque com *crowbar* na Figura 10d.

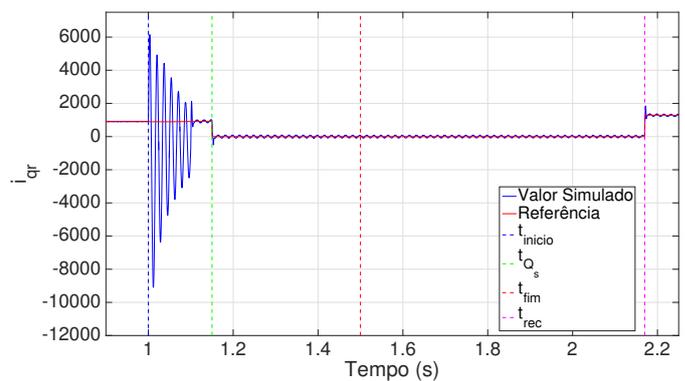
Conforme o procedimento descrito anteriormente, a partir do instante t_{Q_s} , a referência da corrente i_{dr} é maximizada enquanto a referência de i_{qr} é zerada, o que pode ser visto nas Figuras 10a e 10b, com o objetivo de injetar a máxima quantidade de potência reativa na rede.

Quando não há a proteção *crowbar*, a capacidade do DFIG de gerar torque eletromagnético é reduzida devido ao afundamento de tensão. Isso pode ser visto na Figura 10c, pois o torque é reduzido após o afundamento de tensão e não consegue mais acompanhar o valor de referência gerado pela lógica de rastreamento do ponto de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* - MPPT).

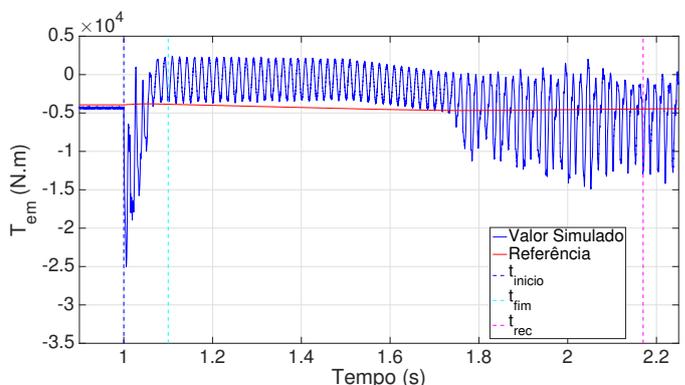
Dessa forma, a velocidade do gerador é aumentada, o que é apresentado na Figura 11.



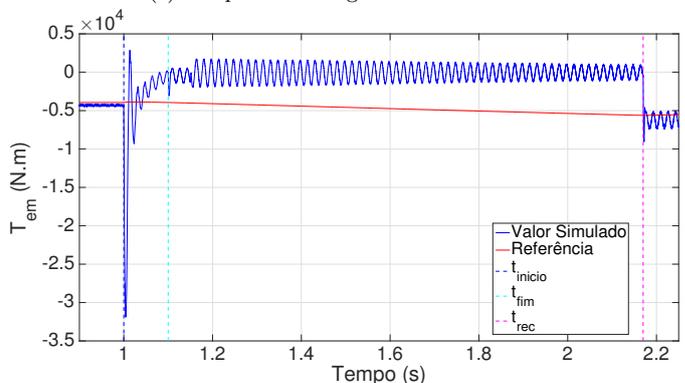
(a) Corrente i_{dr} .



(b) Corrente i_{qr} .



(c) Torque eletromagnético sem *crowbar*.



(d) Torque eletromagnético com *crowbar*.

Figura 10. Curvas resultantes da simulação.

Já na situação em que há a proteção, uma vez que a referência de i_{qr} é zerada no procedimento adotado, o torque eletromagnético da máquina oscila em torno de zero e também deixa de seguir a referência gerada pelo método de MPPT, o que é observado na Figura 10d. Com isso, a velocidade do gerador aumenta ainda mais do que quando a proteção não está instalada, conforme a Figura 11.

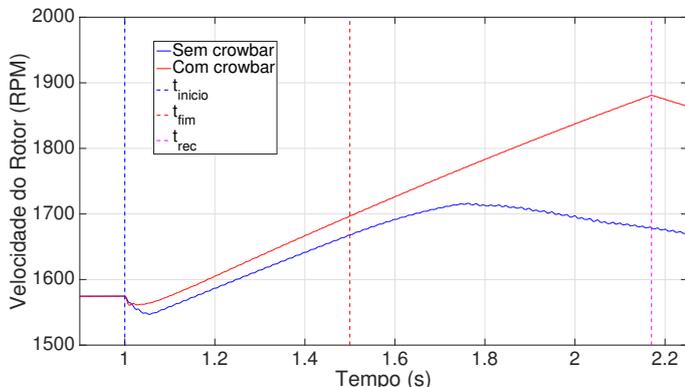


Figura 11. Velocidade do rotor sem e com *crowbar*.

Caso o aumento da velocidade do rotor ultrapasse os limites considerados seguros para a operação, é possível amenizar esse efeito a partir de uma combinação diferente entre as referências das correntes i_{dr} e i_{qr} , levando a um equilíbrio entre a injeção de potência reativa na rede e o controle da velocidade do rotor.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizado um estudo a respeito do desempenho de um aerogerador de velocidade variável com um gerador de indução duplamente alimentado ao ser submetido a um afundamento de tensão da rede. As simulações foram realizadas a partir de um modelo construído no ambiente do MATLAB/Simulink[®] que contempla a turbina eólica, o DFIG e toda a estrutura de controle dos conversores do lado do rotor e do lado da rede.

A proteção conhecida como *crowbar*, tipicamente presente em aerogeradores com DFIG, foi adicionada ao modelo construído, o que permitiu observar como sua atuação é necessária para que o DFIG opere dentro dos limites de segurança, protegendo o conversor do lado do rotor das sobrecorrentes e mantendo a tensão do elo CC próxima ao seu valor nominal. Ao simular o modelo sem *crowbar*, também foi analisada a diferença do desempenho do aerogerador com DFIG submetido a afundamento de tensão quando a proteção está ou não instalada.

A intervenção realizada nos conversores durante a atuação da proteção *crowbar* foi descrita de acordo com os seus efeitos esperados no DFIG. Além disso, também foram destacadas alterações que podem ser feitas no valor de $R_{crowbar}$ ou na intervenção nos controladores para ajustar o desempenho do DFIG durante o afundamento de tensão conforme as características de cada aerogerador.

REFERÊNCIAS

Abu-Rub, H., Malinowski, M., and Al-Haddad, K. (2014). *Power Electronics for Renewable Energy Systems*,

Transportation and Industrial Applications. John Wiley & Sons Ltd.

Al-Quteimat, A., Niewianda, C., and Schäfer, U. (2017). Low voltage ride through of doubly fed induction generator in wind power generation using crowbar solution. In *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, 667–674. doi:10.1109/OPTIM.2017.7975045.

Associação Brasileira de Energia Eólica (2022). Infovento 26.

Chen, C., Bagheri, A., Bollen, M.H.J., and Bongiorno, M. (2019). The impact of voltage dips to low-voltage-ride-through capacity of doubly fed induction generator based wind turbine. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1–6. doi:10.1109/PTC.2019.8810749.

Chen, J., Wu, H., Sun, M., Jiang, W., Cai, L., and Guo, C. (2012). Modeling and simulation of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*.

Cheng, M. and Cai, X. (2011). Reactive power generation and optimization during a power system fault in wind power turbines having a dfig and crowbar circuit. *Wind Engineering*, 35(2), 145–163. doi:10.1260/0309-524X.35.2.145.

IRENA (2022). *Renewable Capacity Highlights*. International Renewable Energy Agency.

Ling, Y., Dou, Z., Gao, Q., and Cai, X. (2012). Improvement of the low-voltage ride-through capability of doubly fed induction generator wind turbines. *Wind Engineering*, 36(5), 535–551. doi:10.1260/0309-524X.36.5.535.

Morsali, P., Morsali, P., and Ghadikola, E. (2020). Analysis and simulation of optimal crowbar value selection on low voltage ride-through behavior of a dfig-based wind turbine. *Proceedings*, 58, 18. doi:10.3390/WEF-06939.

Ramos, V., Fernandes Jr., D., and Neves, W. (2021). Modelagem e Simulação de um Aerogerador com Gerador de Indução Duplamente Alimentado e Controle de Velocidade para Maximização da Potência Gerada. In *XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI 2021*, 1544–1550. doi:10.20906/sbai2021/216560.

Silva, S. (2020). *Estratégia de Controle e Proteção das Turbinas Eólicas com Geradores Duplamente Alimentados para Suportabilidade a Afundamentos de Tensão*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Campina Grande.

Simon, L., Ravishankar, J., and Swarup, K.S. (2019). Coordinated reactive power and crow bar control for dfig-based wind turbines for power oscillation damping. *Wind Engineering*, 43(2), 95–113. doi:10.1177/0309524X18780385.