

# SELEÇÃO DA RESISTÊNCIA DO CROWBAR ATIVO PARA AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM GERADORES EÓLICOS EQUIPADOS COM DFIG.

STEFÂNIA DE OLIVEIRA SILVA\*, WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES †, WELLINGTON SANTOS MOTA†

\*Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG - COPELE

†Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande  
Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58.429-900  
Campina Grande, Paraíba, Brasil

Emails: stefania.silva@ee.ufcg.edu.br, waneves@dee.ufcg.edu.br, wsmota@dee.ufcg.edu.br

**Abstract**— Crowbar resistance plays an important role in protecting the wind system from a voltage dips in the network. However, resistance selection tends to be a problem due to the large influence of the nonlinear circuit parameters, furthermore under certain conditions constant resistance in the crowbar can be overestimated or diminished resulting in machine damage. Thus, this paper proposes a strategy to optimize the selection of crowbar resistance, given the degree of voltage sags in the network, so that the rotor current and the DC-link voltage are used as criterion. The simulation is performed on the MATLAB/SIMULINK platform in which the proposal is validated under the relevant theoretical investigation, in which the new method becomes effective to find the best resistance of the crowbar for the low voltage operation.

**Keywords**— Voltage Sags, Crowbar, DFIG, Resistor, Wind Turbines.

**Resumo**— A resistência do crowbar desempenha um papel importante na proteção do sistema eólico diante de um afundamento de tensão na rede. Entretanto, a seleção da resistência tende a ser um problema devido a grande influência dos parâmetros de circuito não-linear, além disso, em certas condições, a resistência constante no crowbar pode ser superestimada ou diminuída, resultando em danos a máquina. Assim este artigo propõe uma estratégia para otimizar a seleção da resistência do crowbar, dado grau de afundamentos de tensão na rede, de modo que a corrente do rotor e a tensão do barramento CC sejam usadas como critério. A simulação é realizada na plataforma MATLAB/SIMULINK na qual a proposta é validada sob a investigação teórica relevante, no qual o novo método torná-se eficaz para encontrar a melhor resistência do crowbar para a operação de baixa tensão.

**Palavras-chave**— Afundamentos de Tensão, Crowbar, DFIG, Resistor, Turbinas Eólicas.

## 1 Introdução

Como um importante recurso renovável e limpo, a energia eólica está recebendo cada vez mais atenção da academia e da comunidade industrial. Durante as últimas décadas, o gerador de indução de dupla alimentação (DFIG) foi aplicado amplamente na tecnologia da energia eólica de frequência constante e velocidade variável por causa da estratégia de controle simples e menores perdas.

Porém este tipo de tecnologia tende a ser sensível à falta na rede. Assim, a rede elétrica possui alguns requisitos para a interconexão da energia eólica que garanta sua estabilidade. Requisitos que exige que o sistema esteja conectado à rede mesmo na condição de tensão baixa durante faltas na rede, em outras palavras, o sistema DFIG deve possuir a capacidade de conduzir energia a baixa tensão (LVRT). Cada país possui um padrão LVRT, com a finalidade de aliviar o impacto da desconexão do aerogerador à rede elétrica. A Figura 1 mostra o critério da rede brasileira.

O afundamento de tensão tende a induzir o aumento na corrente do rotor e flutuação da tensão no barramento. Quando o afundamento não é severo, o sistema pode ser ajustada por meio da estratégia de controle dos conversores (Lima et al., 2010) e (Mendes et al., 2015). Mas quando a amplitude do afundamento é considerável e a

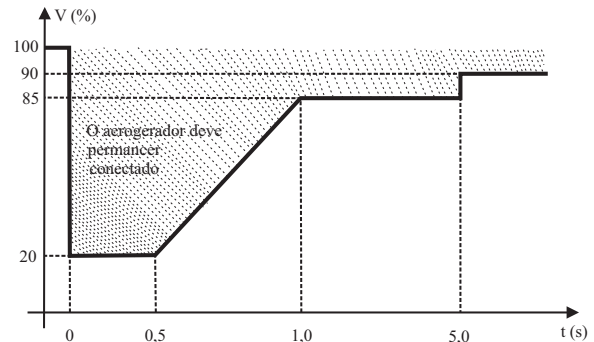


Figura 1: Critérios LVRT das turbinas eólicas quando ocorre a queda da tensão na rede.

falta é severa, as correntes e a tensão do barramento CC não podem ser limitadas apenas pela alteração do controle. Para isso, é necessário aumentar um circuito by-pass usando uma resistência, baseado na estratégia do circuito de proteção *crowbar*.

Conforme a Figura 2, o rotor do DFIG é conectado à rede através dos conversores, enquanto o estator é conectado diretamente. No geral, existem dois conversores importantes na estrutura básica, no qual um está conectado ao lado do rotor (RSC), e o outro conectado ao lado da rede (GSC). O circuito de proteção *crowbar* está ligado ao conversor do lado do rotor. Quando a queda de ten-

são ocorre, o circuito by-pass do conversor rotórico será ativado, o que fornece uma passagem para liberar a corrente de surto.

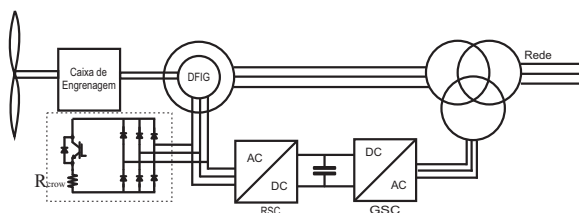


Figura 2: Sistema DFIG com circuito *crowbar*.

A resistência do *crowbar* é difícil de ser determinada com precisão devido à influência dos parâmetros não linear do circuito. A corrente do estator e do rotor não podem ser limitadas na faixa razoável quando a resistência do *crowbar* é pequena. Mas uma grande resistência pode induzir a oscilações de tensão no barramento CC. Quando o grau de afundamento é severo, o efeito cascata torna-se sério, logo é necessário um método de seleção de resistência adequado para obter uma corrente suave do rotor e um pequeno *ripple* na tensão do barramento.

Durante as últimas décadas, pesquisas sobre os aerogeradores DFIG em afundamentos de tensão tem sido desenvolvidas. Peng (Peng and Yikang, 2007) analisou a resposta DFIG na condição de falta investigando o método teórico básico do LVRT. O processo de variação da corrente do estator e do rotor com diferentes resistências no *crowbar* foi proposto por Zang (Zhang et al., 2008). E Zhu et. al (Zhu et al., 2010) discutiram o método de seleção da resistência do *crowbar* na influência do tempo como parada para o afundamento de baixa tensão. Um novo resistor dinâmico de série foi projetado para otimizar a resposta às faltas (Yang et al., 2010), mas o hardware neste artigo era grande e complexo. Pannell et. al (Pannell et al., 2010) usaram um limiar mínimo para reduzir o comprimento do período do *crowbar* para otimizar a retomada do controle de potência.

Diante disto, este artigo propõe um novo método para avaliar a resposta do DFIG durante os afundamentos de tensões severas. A integração é feita usando a corrente do rotor e a tensão do barramento CC. A resistência do *crowbar*, tem como propósito integrar de forma otimizada todo o sistema, para diferentes graus de afundamentos. A tendência das mudanças de resistência com o aumento do grau de afundamento é investigada neste trabalho. A simulação é finalmente é feita para validar o método teórico.

## 2 Estudo do Circuito de Proteção *Crowbar*

Quando ocorre o afundamento de tensão na rede torná-se necessário um equipamento de hardware

correspondente para realizar o LVRT do DFIG ao invés das estratégias de controle. O *crowbar* é instalada geralmente no lado do rotor do DFIG, que amortece o conversor para evitar danos ao dispositivos eletrônico.

Há diversas formas do *crowbar* se apresentar como resposta aos afundamentos de tensão. Uma delas está apresentada na Figura 3(a), onde cada SCR deve ser avaliado para bloquear a tensão máxima do rotor e transportar as sobrecorrentes de pior caso. Os tiristores oferecem melhores capacidades de desligamento, mas exigem uma corrente de deslocamento grande. A ativação e o desligamento quase instantâneos podem ser alcançados usando o dispositivo IGBT (c). O IGBT em relação ao tiristor tem um custo considerável, no entanto, a habilidade de desligamento tende a ser mais eficiente.

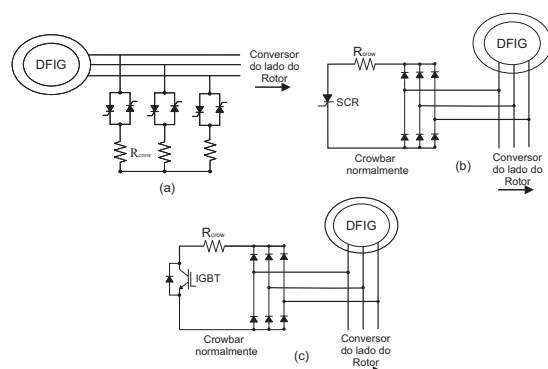


Figura 3: Topologias de circuito *Crowbar*.

Em qualquer configuração, a desativação do *crowbar* pode ser acompanhado com a retomada do PWM do conversor do lado do rotor e da controle de corrente rotórica. A velocidade no qual o controle pode ser retomado depende do estado da máquina no ato da desativação do *crowbar*, e na disponibilidade da tensão do barramento CC mediante suas configurações individuais.

Com o circuito de proteção conectado em paralelo com conversor do lado do rotor (Figura 2), o modelo do DFIG é alterado, como mostra a Figura 4. Em convenção motora, o modelo do DFIG pode ser escrito como:

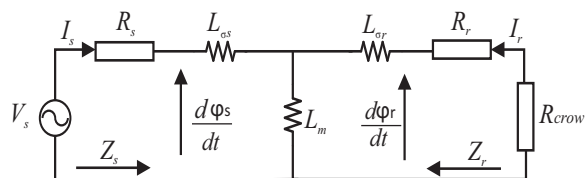


Figura 4: Circuito equivalente de DFIG quando o *crowbar* é ativado

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d\varphi_s}{dt} + j\omega_s \varphi_s \\ V_r = R_r I_r + \frac{d\varphi_r}{dt} + j\omega_r \varphi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varphi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \varphi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (2)$$

onde  $V_s$ ,  $V_r$  e  $I_s$ ,  $I_r$  são a tensão e a corrente do estator e do rotor,  $R_s$ ,  $R_r$  são as resistências do estator e do rotor.  $\varphi_s$  e  $\varphi_r$  são os fluxos do estator e do rotor, respectivamente.  $\omega_s$  é a velocidade angular de rotação do fluxo do estator.  $L_s$  e  $L_r$  são a auto-indutância do estator e do rotor e  $L_m$  é a indutância mútua. Se a indutância de dispersão do estator e do rotor for  $L_{\sigma s}$  e  $L_{\sigma r}$ , então  $L_s = L_{\sigma s} + L_m$  e  $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ . Todos os parâmetros são referidos ao lado do estator do DFIG. De acordo com as equações (1) e (2), a corrente no estator e no rotor pode ser expressa como:

$$\begin{cases} I_s = \frac{L_r \varphi_s - L_m \varphi_r}{L_s L_r - L_m^2} \\ I_r = \frac{L_s \varphi_r - L_m \varphi_s}{L_s L_r - L_m^2} \end{cases} \quad (3)$$

Quando o afundamento de tensão ocorre, o *crowbar* é ativado automaticamente. Assumindo que a resistência do desvio,  $R_{crow}$  é muito maior que a resistência do estator e do rotor, tais resistências podem ser desprezadas. Assim as impedâncias equivalentes do estator ( $Z_s$ ) e do rotor ( $Z_r$ ) podem ser representadas como:

$$\begin{cases} Z_s(s) = \frac{s^2 L_m L_\sigma + s L_s R_{crow}}{s L_s + R_{crow}} \\ Z_r = s L_\sigma + R_{crow} \end{cases} \quad (4)$$

De acordo com o princípio da superposição, quando há o afundamento, a tensão do gerador é equivalente ao aumento da fonte de tensão reversa que o gera. Assim a corrente de excitação se impõe a corrente do estator após a falta na rede. E conforme o princípio de conservação do fluxo, quando a tensão de rede cai, uma maior amplitude do fluxo CC irá gerar um aumento no enrolamento do estator. Com o circuito de proteção *crowbar* combinado com a equação (4), a constante de tempo do estator pode ser escrita como:

$$T'_s = \frac{R^2 + \omega_r^2 L_s L_\sigma}{\omega_r^2 (L_s - L_\sigma) R_{crow}} \quad (5)$$

Quando o circuito de proteção *crowbar* detecta a falta, imediatamente é ativado. Entretanto o conversor do lado do rotor entra em curto, a chave IGBT do *crowbar* é acionado e a resistência de by-pass é conectada ao circuito rotórico, que oferece um caminho de liberação para energia excessiva no rotor do DFIG. Para evitar a sobrecorrente do enrolamento do rotor, a tensão do rotor cai para zero após a ação do *crowbar*. Assim, com o princípio de conservação, uma maior amplitude do fluxo de dispersão irá gerar aumento no enrolamento do rotor. A constante de tempo é expressa por:

$$T'_r = \frac{L_\sigma}{R_{crow}} \quad (6)$$

De acordo com a análise descrita, o circuito de proteção *crowbar* influencia não apenas na impedância total equivalente do estator e do rotor, mas também oferece um caminho de liberação para energia excessiva de DFIG, que acelera o decaimento da componente do fluxo.

Devido à resistência de by-pass do *crowbar*, o componente transitória do rotor acelera rapidamente e a taxa de queda da constante de tempo rotórica é mais rápida do que a do estator. Assim, a amplitude da corrente de curto-circuito no estator e no rotor é determinada pela constante de tempo do estator, de modo que a corrente máxima de falta do estator e do rotor podem ser escrita como:

$$I_{smax} \approx I_{rmax} = \frac{V_s}{\sqrt{(\omega_s l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \quad (7)$$

Como a velocidade do rotor  $\omega_r$  no instante do afundamento é examinada, verifica-se que quanto maior é a velocidade do rotor, maiores são as correntes defeituosas. Assim, a relação entre  $\omega_r$  e as máximas correntes defeituosas pode ser expressa:

$$I_{smax} \approx I_{rmax} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \frac{V_s}{\sqrt{(\omega_s l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \quad (8)$$

Entretanto, o valor da corrente de falta depende do grau do afundamento de tensão. Assim, a relação entre a amplitude do afundamento de tensão e a tensão nominal é definido pelo coeficiente de afundamento expresso por  $p$ :

$$\begin{aligned} I_{smax} &\approx I_{rmax} \\ &= \frac{\omega_r}{\omega_s} \frac{V_s}{\sqrt{(\omega_s l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} [(1-p)e^{-t/T'_s} + \\ &\quad p \cos(\omega_s t + \theta)] \end{aligned} \quad (9)$$

onde  $\theta$  é o ângulo relacionado à condição de operação pré-falta do DFIG.

### 3 Seleção Otimizada da Resistência do *Crowbar*

Como a resposta da corrente do rotor e da tensão do barramento CC, a depender do grau do afundamento, há variações para a resistência do *crowbar* -  $R_{crow}$ . De modo geral, à medida que o  $R_{crow}$  aumenta, a corrente do rotor e o torque eletromagnético, mediante a falta, tornam-se menores, enquanto o *ripple* da tensão do barramento pode aumentar gradualmente. Desta forma é definido um índice para descrever a influência complexa dos fatores da tensão de barramento CC e da corrente rotórica no sistema:

$$J = \int [ |V_{dc} - V_{ref}| + |I_r^{max} - I_r^{ref}| ] dt \quad (10)$$

onde  $V_{dc}$  é a tensão nominal do barramento e  $V_{ref}$  é a tensão de referência,  $I_r^{max}$  é o valor máximo

da corrente rotórica nas três fases, e  $I_r^{ref}$  é a sua referência nominal. A cada integração dessas variáveis, é tomada um erro pela suas referências e adicionado a ambos resultados de integração como valor de índice final.

Há diversas maneiras de se chegar a um resultado favorável da resistência do *crowbar*, conforme apresentado na equação (8), porém quando o afundamento da tensão é severo, o efeito da resposta na tensão de barramento é sentido. Isso porque, a tensão do rotor é regida pela tensão do barramento CC, o que torna a corrente transitória do curto-circuito menos dependente da resistência do *crowbar*. Assim, a segunda componente,  $|I_r^{max} - I_r^{ref}|$ , não muda muito com o aumento da resistência, entretanto o valor do índice será determinante para a primeira componente que reflete a ondulação da tensão do barramento CC.

Se a resistência for muito alta, a capacitância do barramento CC no conversor será carregada e isso aumentará o *ripple* da tensão do barramento. Porém, a tensão de linha do *crowbar* deve ser mantida abaixo da tensão nominal do barramento. Desta forma, a tensão da linha do *crowbar* pode ser usada de forma aproximada ao cálculo do índice da tensão do barramento:

$$\begin{aligned} V_{crow} &\approx V_{dc} = I_r \sqrt{3} R_{crow} \\ &= \frac{\omega_r}{\omega_s} \frac{\sqrt{3} R_{crow} V_s}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} [(1-p)e^{-t/T's} \\ &\quad + p \cos(\omega_s t + \theta)] \end{aligned} \quad (11)$$

Assim:

$$\int |V_{dc} - V_{ref}| dt \quad (12)$$

onde

$$K = \frac{\omega_r}{\omega_s} \frac{\sqrt{3} R_{crow} V_s}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}}$$

tem-se:

$$= \int_0^t \left( V_{ref} - K[(1-p)e^{-t/T's} + p \cos(\omega_s t + \theta)] \right) dt \quad (13)$$

$$= V_{ref} t - K(1-p)T's e^{-t/T's} - K p \frac{1}{\omega_s} \sin(\omega_s t + \theta) \quad (14)$$

Quando o afundamento é severo, a variável  $p$  tem um valor pequeno, assim nesta situação a terceira componente passa a não ter influência no sistema. Logo, por questão de simplicidade, a condição inicial de  $p$  será 0, o que fará a terceira componente zerar. Portanto, a amplitude da segunda componente é:

$$\begin{aligned} &-K(1-p)T's = \\ &- \left[ \frac{\omega_r \sqrt{3} R_{crow} V_s (1-p)}{\omega_s \sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} * \frac{R_{crow}^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\omega_r^2 (l_s + l_\sigma) R_{crow}} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Resolvendo a equação, tem-se

$$\left[ \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} * \frac{R_{crow}^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \right] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &= - \left[ \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} \right] * \\ &\left[ \frac{(R_{crow}^2 + (\omega_s l_\sigma)^2) + (-\omega_s l_\sigma)^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} &= - \left[ \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} \right] * \\ &\left[ \frac{(R_{crow}^2 + (\omega_s l_\sigma)^2)}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} - \frac{(\omega_s l_\sigma)^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} &= - \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} * \frac{(R_{crow}^2 + (\omega_s l_\sigma)^2)}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \\ &+ \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} * \frac{(\omega_s l_\sigma)^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \end{aligned} \quad (19)$$

Transformando o sistema para uma inequação, tem-se:

$$\begin{aligned} &= - \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} * \frac{(R_{crow}^2 + (\omega_s l_\sigma)^2)}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \\ &\geq - \frac{\sqrt{3} V_s (1-p)}{\omega_s \omega_r (l_s - l_\sigma)} * \frac{(\omega_s l_\sigma)^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \end{aligned} \quad (20)$$

Eliminando os dois primeiros termos das inequações:

$$\frac{(R_{crow}^2 + (\omega_s l_\sigma)^2)}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \geq \frac{(\omega_s l_\sigma)^2 + \omega_r^2 l_s l_\sigma}{\sqrt{(\omega_r l_\sigma)^2 + R_{crow}^2}} \quad (21)$$

Simplificando a equação (21), tem-se:

$$R_{crow} = \sqrt{\omega_r^2 l_s l_\sigma} = \omega_r \sqrt{l_s l_\sigma} \quad (22)$$

Ao substituir todos os parâmetros do gerador na equação (14), o  $R_{crow}$  é otimizado em diferentes graus de afundamentos de tensão.

- Para um afundamento de 0%,  $R_{crow} = 0, 3\Omega$ ;
- Para afundamento de 15%,  $R_{crow} = 0, 2\Omega$ ;
- Para afundamento de 50%,  $R_{crow} = 0, 3\Omega$ .

#### 4 Estudo da Simulação do Circuito Crowbar

O modelo de sistema de barramento infinito de máquina única de DFIG é mostrado na Figura 5. O parque eólico é composto por seis DFIGs de 1,5 MW, que são conectados à rede por meio de transformadores.

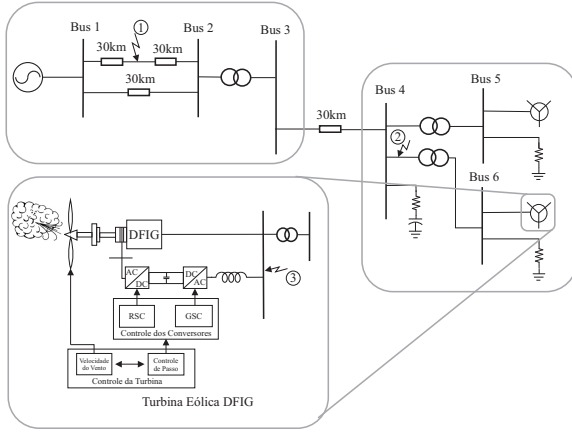


Figura 5: Simulação do Parque Eólico

Parâmetros	DFIG
$N^0$ de turbinas	6
Potência Nominal	1,5MW
Fator de Potência	0,9
Tensão Nominal	575V
Freq. Nominal	60Hz
Velocidade Angular	1,2pu
Tensão de Barramento	1200V
$N^0$ de polos	6
Indutância de dispersão do estator	0,18pu
Indutância de dispersão do rotor	0,16pu
Indutância mútua	2,9pu

Tabela 1: Parâmetro de Simulação do Parque Eólico.

Os principais parâmetros de simulação do DFIG são:

As respostas de falta do parque eólico são investigadas com um passo de cálculo de  $50\mu s$ . Durante a simulação, podem ser introduzidos três tipos de faltas na rede, incluindo uma única linha-terra, trifásica e duas fases para terra em locais diferentes.

O tempo de simulação é definido para 2,0 segundos, no qual o afundamento de tensão ocorre quando o tempo é de 0,5s e se recupera em 1s.

O circuito ativo do *crowbar*, (Figura 3 (c)) é cortado após 1s. Após este intervalo de tempo, uma unidade de histerese é proposta para modificar a tensão do barramento CC e a corrente máxima do rotor, respectivamente. Uma vez que seus valores excedam seus limites de ajuste, o circuito do *crowbar* será ativado para ignorar o conversor do rotor.

Em diferentes graus afundamentos, a influência da corrente do rotor e da tensão do barramento é considerada e diferentes resistências do *crowbar* são selecionadas de acordo com seus requisitos relevantes. Como apresentado na Tabela 2, em diferentes graus de queda de tensão, a influência da corrente do rotor e da tensão do barramento é contada e a resistência ótima para diferentes casos.

Afundamento	$R_{crow}$	$V_{dc}$	$I_r$	$J$
0%	0,05	0,13	0,34	0,47
	0,5	2,67	0,68	3,35
	0,3	1,56	0,66	2,22
15%	0,2	2,07	0,26	2,33
	0,3	2,43	0,46	2,89
	0,4	2,85	0,56	3,41
50%	0,3	1,23	0,16	1,39
	0,4	1,35	0,34	1,69
	0,5	1,55	0,36	1,91

Tabela 2: Resistências para os Graus de Afundamentos.

Na condição de afundamento de tensão constante, a corrente trifásica do rotor máximo diminuirá com a resistência crescente do *crowbar*. Mas a mudança não é muito óbvia, o que se deve à pouca alteração do valor de  $I_r$  com o aumento de  $R_{crow}$ . O valor de pico da corrente trifásica máxima após a falta será maior com o aumento do grau do afundamento, o que causa mais impacto ao gerador.

Quando o grau afundamento de tensão é 0%, 15% e 50%, conforme Figura 6 as curvas do valor máximo da corrente do rotor trifásico e da tensão do barramento são mostradas nas figuras seguintes.

Para a tensão de barramento, o *ripple* é grande quando  $R_{crow} = 0,05\Omega$ . Com a crescente resistência do *crowbar*, a ondulação do barramento diminui. Mas quando a resistência aumenta para  $1\Omega$ , a ondulação na tensão do barramento aumentará gradualmente fazendo com que haja perturbação à rede.

Com o aumento do grau de imersão, a ondulação na tensão do barramento torna-se maior para o valor crescente do índice.

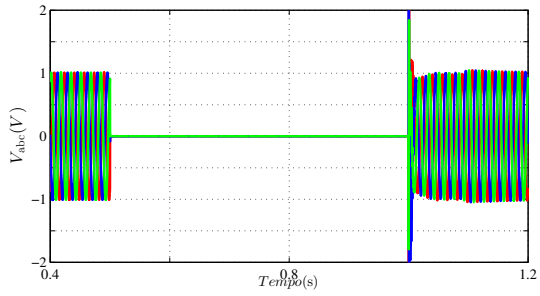
Conforme já mencionado o aumento da resistência não tende a ter grandes influências na corrente rotórica.

## 5 Conclusões

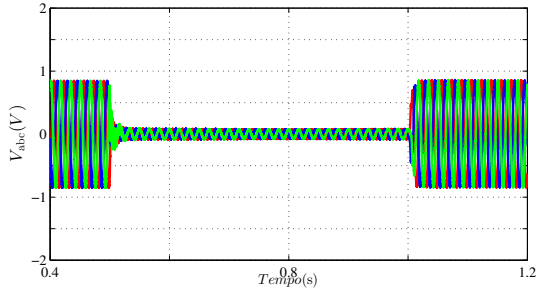
Com o aumento da capacidade das turbinas eólicas, o problema da baixa tensão está atraindo cada vez mais atenção. A pesquisa sobre o circuito do *crowbar* tem sido feita por muitos pesquisadores nos últimos anos. Neste trabalho são estudados a estrutura básica e o circuito equivalente de DFIG no afundamento de tensão. A expressão da corrente do rotor na condição de falta e a resistência otimizada do *crowbar* que faz a menor ondulação da tensão do barramento CC é deduzida.

No tempo médio, propõe-se um método de integração ponderada para avaliar a resposta do sistema DFIG com diferentes resistências ao *crowbar*.

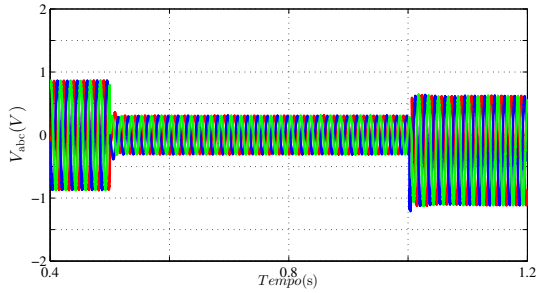
Finalmente, o modelo de simulação baseado em MATLAB/SIMULINK é realizado para com-



(a)



(b)



(c)

Figura 6: Afundamentos de Tensão (a) 0% (b) 15% (c) 50%

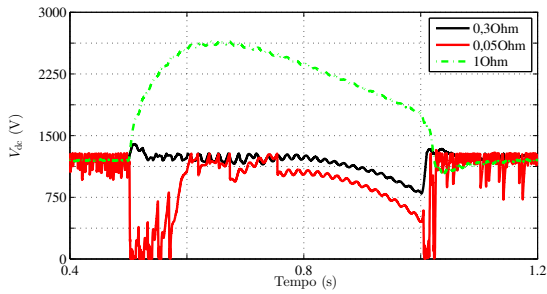


Figura 7: Resposta da Tensão do Barramento CC para afundamento de 0%

para a corrente do rotor e a tensão do barramento CC em diferentes graus de afundamentos com diferentes resistências. Os resultados da simulação verificam muito bem a análise teórica.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, pelo suporte financeiro e a Coordenação dos Cursos de Pós Gra-

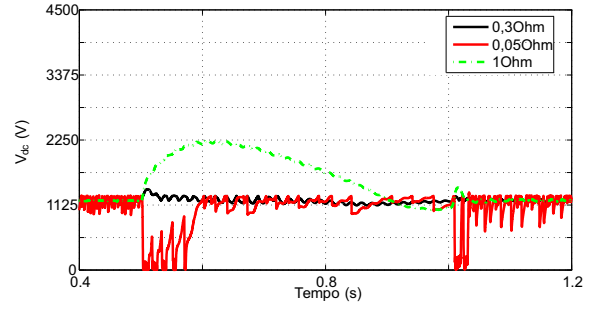


Figura 8: Resposta da Tensão do Barramento CC para afundamento de 15%

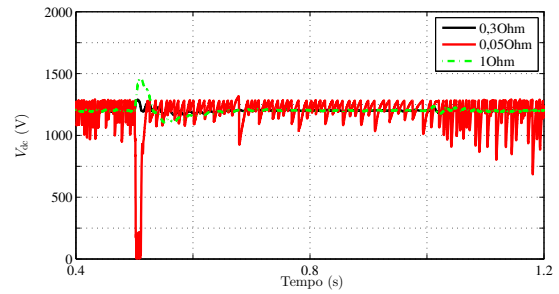


Figura 9: Resposta da Tensão do Barramento CC para afundamento de 50%

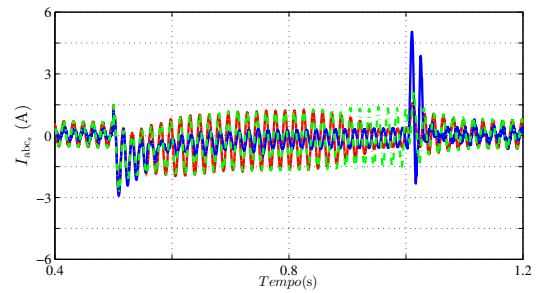


Figura 10: Resposta da Corrente Rotórica para afundamento de 0%

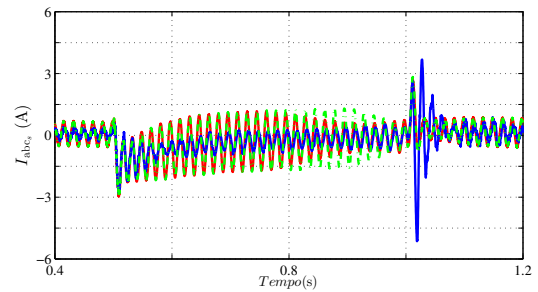


Figura 11: Resposta da Corrente Rotórica para afundamento de 15%

duação em Engenharia Elétrica da UFCG pelo suporte técnico.

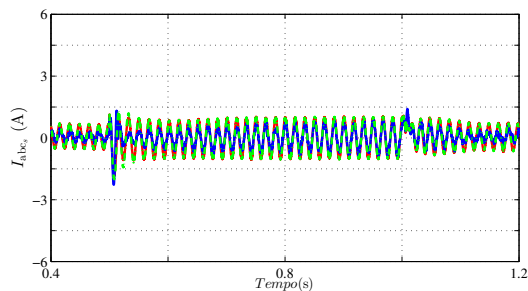


Figura 12: Resposta da Corrente Rotórica para afundamento de 50%

### Referências

- Lima, F. K., Luna, A., Rodriguez, P., Watanabe, E. H. and Blaabjerg, F. (2010). Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults, *IEEE Transactions on power electronics* **25**(1): 118–130.
- Mendes, V. F., de Sousa, C. V., Hofmann, W. and Silva, S. R. (2015). Doubly-fed induction generator ride-through fault capability using resonant controllers for asymmetrical voltage sags, *IET Renewable Power Generation* **9**(7): 783–791.
- Pannell, G., Atkinson, D. J. and Zahawi, B. (2010). Minimum-threshold crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant dfig wind turbine, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(3): 750–759.
- Peng, Z. and Yikang, H. (2007). Control strategy of an active crowbar for dfig based wind turbine under grid voltage dips, *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, IEEE, pp. 259–264.
- Yang, J., Fletcher, J. E. and O'Reilly, J. (2010). A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **25**(2): 422–432.
- Zhang, W., Zhou, P. and He, Y. (2008). Analysis of the by-pass resistance of an active crowbar for doubly-fed induction generator based wind turbines under grid faults, *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, IEEE, pp. 2316–2321.
- Zhu, X., Shi, L., Chen, N., Zhu, L., Liu, H. and Liu, J. (2010). An analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of crowbar, *Dianli Xitong Zidonghua(Automation of Electric Power Systems)* **34**(18): 84–89.