

# PROJETO DE GERADOR DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO APLICADO A GERADORES EÓLICOS

ANA L. CORTE, ARTHUR E. A. AMORIM, DOMINGOS S. L. SIMONETTI

*Departamento de Engenharia Elétrica - DEL*  
*CT-II, Av. Fernando Ferrari, 514, CEP: 29.075-910*  
*Vitória, ES, Brasil*

*E-mails: anacortel2@hotmail.com, arthuraamorim@gmail.com,*  
*d.simonetti@ele.ufes.br*

**Abstract** — This article presents a new proposal to generate voltage sags in order to verify the LVRT of wind turbines based on dual fed induction generators (DFIG). The topology utilizes 3 single-phase autotransformers and bidirectional switches to achieve the desired voltage sag levels. The system design methodology is presented aiming the application to a laboratory bench. Results of the simulations performed in the PSCAD considering the Brazilian code show that, through the application of the suggested approach, it is possible to produce sags of up to 80% of depth only by adjusting the transformation ratio of the autotransformer. The topology proves to be a robust alternative for carrying out the tests prescribed in regulations.

**Keywords** — DFIG, Low voltage ride-through, Wind Energy

**Resumo** — Esse artigo apresenta uma nova proposta para gerar afundamentos de tensão com o intuito de verificar a suportabilidade de turbinas eólicas baseadas em geradores de indução duplamente alimentados (DFIG). A topologia utiliza 3 autotransformadores monofásicos e chaves bidirecionais para obter os níveis de afundamento de tensão desejados. A metodologia de projeto do sistema é apresentada visando à aplicação em uma bancada laboratorial. Resultados das simulações realizadas no PSCAD considerando o código de rede brasileiro mostram que, através da aplicação da técnica sugerida, é possível produzir afundamentos de até 80% de profundidade apenas ajustando a relação de transformação do autotransformador. A topologia demonstra ser uma alternativa robusta para a realização dos ensaios previstos em normativas.

**Palavras-chave** — DFIG, Suportabilidade a Afundamentos de Tensão, Energia Eólica

## 1 Introdução

A participação da energia eólica tem crescido progressivamente nos últimos anos em todo mundo. Como apresentado por GWEC - *Global Wind Energy Council* (GWEC, 2016) pode-se observar a ampliação nos últimos 15 anos da potência instalada de aerogeradores no mundo. Até o fim de 2016 nove países já ultrapassaram a marca de 10 GW de potência instalada em aerogeradores, sendo liderados por China (168.732 MW), Estados Unidos (82.184 MW) e Alemanha (50.018 MW), seguidos por Índia (28.700 MW), Espanha (23.074 MW), Reino Unido (14.543 MW), França (12.066 MW), Canadá (11.900 MW) e Brasil (10.740 MW).

Para manter a confiabilidade e desempenho da rede elétrica com o crescimento da participação de geradores eólicos, os órgãos reguladores têm atualizado seus códigos de rede com requisitos específicos concernentes à operação de geradores eólicos e fazendas eólicas. Os códigos de rede são procedimentos que estabelecem requisitos para operação segura e confiável do sistema elétrico, tais como: faixas de tensão e frequência para operação contínua, suportabilidade a afundamentos e elevação de tensão, controle de potência ativa e reativa, e qualidade de energia (flicker, harmônicos e flutuações de tensão). Esses novos códigos esperam que fazendas eólicas apoiem a rede elétrica e provejam serviços auxiliares, tal como as fontes tradicionais. Conforme o nível de participação da energia eólica em cada país e a robustez da rede elétrica, o grau dessa contribuição varia.

Dentre as diversas tecnologias para conversão de energia eólica, destacam-se atualmente as que empregam turbinas de velocidade variável, especialmente com a utilização de máquina de indução duplamente alimentada (DFIG). A principal vantagem desse aerogerador é o máximo aproveitamento da potência extraída do vento com a utilização de um conversor de potência parcial, em geral em torno de 30% da potência total que flui pela máquina. Contudo, por estar diretamente conectado à rede elétrica, esse gerador é extremamente susceptível a distúrbios na tensão da rede, especialmente os afundamentos de tensão. Os afundamentos de tensão caracterizam-se pela redução súbita da tensão da rede seguido de seu reestabelecimento após um curto intervalo de tempo (entre meio ciclo da rede e 1 min) (Morren J., 2005). Tais fenômenos são relativamente comuns na rede elétrica, e são causados por curtos-circuitos, energização de transformadores e pelo chaveamento de cargas pesadas, como motores de indução (Hirt W., 2015).

A suportabilidade a afundamentos de tensão é a exigência mais importante nos códigos de rede no que se refere a geradores eólicos (Erlich I., Wrede H. e Feltes C., 2007). Esse requisito é essencial para a operação estável e confiável das redes elétricas, especialmente em regiões com alta penetração de aerogeradores. No passado, durante distúrbios na rede e afundamentos de tensão, turbinas e fazendas eólicas poderiam ser desconectadas da rede. Contudo, com uma maior quantidade de geração eólica na rede a desconexão simultânea pode causar um afundamento ainda maior na tensão ou até um colapso total em determinada região. Além disso, a perda dessa potên-

cia adicional como resultado da desconexão pode causar um desbalanceamento entre a potência gerada e a potência consumida, e consequentemente a queda na frequência da rede.

Para o estudo de geradores eólicos e desenvolvimento de novas técnicas de controle e sistemas de proteção é comum a utilização de emuladores em escala reduzida dos sistemas de conversão de energia eólica. Nesses emuladores é necessário implementar dispositivos que sejam capazes de representar os distúrbios da rede elétrica de maneira precisa e controlada.

Este trabalho apresenta uma proposta para o dispositivo gerador de afundamentos de tensão equilibrados para emuladores de sistemas de conversão de energia eólica com o intuito de testar a confiabilidade dos sistemas de proteção do DFIG quando esses são submetidos a faltas da rede elétrica. Na Seção II é feita uma breve revisão dos requisitos para suportabilidade a afundamentos de tensão em diferentes normas, bem como a apresentação dos principais métodos utilizados para produzir os afundamentos de tensão em bancadas de emulação. Na Seção III são apresentados o projeto do gerador de afundamentos de tensão proposto. Na Seção IV discute-se os resultados obtidos por meio de simulação computacional. As considerações finais são apresentadas na Seção V.

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1 Códigos de Rede

O principal requisito com relação à suportabilidade a afundamentos de tensão em aerogeradores é que estes permaneçam conectados durante os transitórios do sistema elétrico. Exige-se que esta conexão seja mantida desde que o módulo da tensão esteja dentro de uma faixa de profundidade e de tempo. O perfil dessa curva varia conforme os códigos de rede do país.

O código de rede brasileiro, estabelecido pela ONS (ONS, 2009) exige que os aerogeradores permaneçam conectados por no máximo 500ms, para afundamentos de 80% de profundidade, e por até 5s, para afundamentos de 15% de profundidade, conforme apresentado na Figura 1.

O código de rede da Dinamarca (Elkraft System and Eltra, 2004) propõe uma curva com uma exigência menor quanto à máxima profundidade do afundamento, porém exige que os aerogeradores permaneçam conectados por um período mais longo com tensão reduzida como apresentado na Figura 2.

Esse código permite uma redução da potência ativa proporcional ao quadrado da tensão remanescente. Porém exige a mudança no controle da máquina durante faltas para o máximo de suporte a tensão, auxiliando o sistema a se recuperar o mais rapidamente possível.

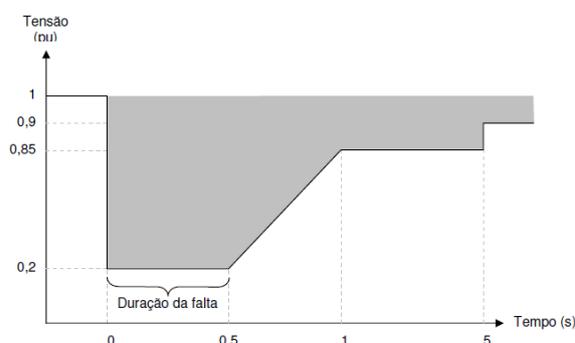


Figura 1: Curva de suportabilidade a afundamentos de tensão do código de rede brasileiro (ONS, 2009).

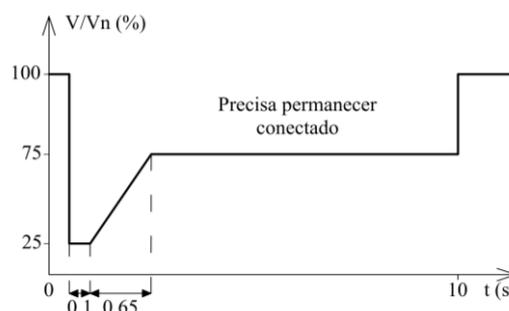


Figura 2: Curva de suportabilidade a afundamentos de tensão do código de rede dinamarquês (Elkraft System and Eltra, 2004).

O código espanhol (Secretaría General de Energía de España, 2006) apresenta uma exigência para o afundamento máximo, semelhante ao código brasileiro, como visto Figura 3.

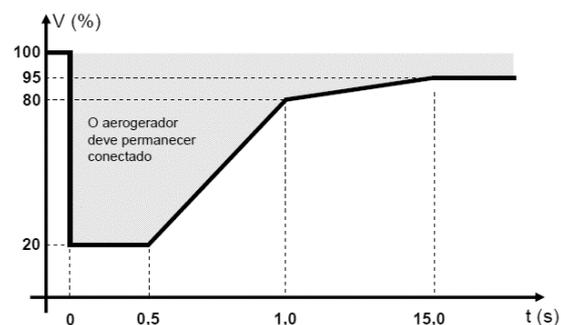


Figura 3: Curva de suportabilidade a afundamentos de tensão do código de rede espanhol (Secretaría General de Energía de España, 2006).

Essa regulamentação exige que os aerogeradores permaneçam conectados durante afundamento de tensão, sejam eles monofásicos, bifásicos a terra ou trifásicos, dentro da área sombreada.

O código de rede da Alemanha (Eon Netz, 2006) exige a curva de suportabilidade mostrada na Figura 4. Nas áreas marcadas como 1 e 2 a turbina deve permanecer conectada à rede elétrica. Na área 2 a turbina pode, caso ocorra alguma sobrecarga, se desconectar momentaneamente, porém deve estar apta a se reconectar em até 2s. A área 3, por causar danos severos aos aerogeradores autoriza a desconexão, porém mantém a exigência de ressinchronização em 2s. A área 4 permite a interrupção total da geração.

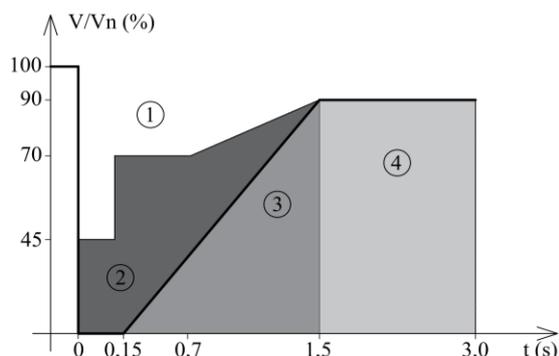


Figura 4: Curva de suportabilidade a afundamentos de tensão do código de rede alemão (Eon Netz, 2006).

Além dos códigos de rede nacionais, é amplamente utilizada na literatura sobre suportabilidade a afundamento de tensão em aerogeradores a norma internacional IEC 61400-21 (2008). Essa norma especifica medições e avaliações das características de qualidade de energia para geradores eólicos conectados à rede elétrica. Ela estabelece critérios para ensaios em sistemas de conversão de energia eólica isolados — isto é, o comportamento do sistema de controle não irá influenciar o comportamento do perfil de tensão durante a falta. Por meio desses testes é possível verificar o desempenho de aerogeradores e sistemas de proteção que garantam a suportabilidade às faltas.

São estabelecidos critérios quanto à profundidade, tipo e duração dos afundamentos de tensão, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Critérios de suportabilidade a afundamentos de tensão segundo a IEC 61400-21.

Caso	Módulo da tensão (fase-fase)	Magnitude da sequência positiva	Duração
VD1 – Afundamento de tensão trifásico simétrico	$0,9 \pm 0,05$	$0,9 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD2 – Afundamento de tensão trifásico simétrico	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD3 – Afundamento de tensão trifásico simétrico	$0,2 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$
VD4 – Afundamento de tensão fase-fase	$0,9 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD5 – Afundamento de tensão fase-fase	$0,5 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$
VD6 – Afundamento de tensão fase-fase	$0,2 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$

## 2.2 Técnicas para Geração de Afundamento de Tensão

A representação em bancadas de emulação em escala reduzida dos fenômenos da rede elétrica tem sido feita de diversas maneiras na literatura. Para emular afundamentos de tensão equilibrados e desequilibrados em vários níveis existem algumas técnicas

que serão apresentadas a seguir. Dentre essas técnicas podem-se citar a inserção de impedância série e paralela, a utilização de reguladores de indução e a conexão do sistema de conversão com a rede por meio de um conversor back-to-back.

### 2.2.1 Chaveamento de Impedância

Uma das formas mais simples de gerar afundamento de tensão é inserindo uma impedância série e outra paralela, pois através de valores convenientes de  $Z_S$  e  $Z_P$  é possível ajustar a tensão no ponto de conexão do DFIG com a rede elétrica. O esquema é mostrado na Figura 5.

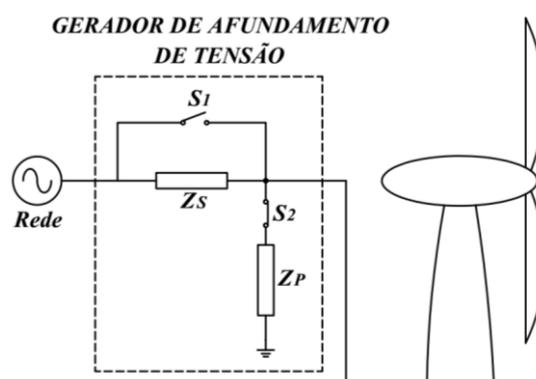


Figura 5: Esquema de gerador de afundamento de tensão baseado em impedância série e paralela.

A impedância série é responsável pela diminuição dos efeitos do curto-circuito na rede já que quanto maior o seu valor menor é a corrente drenada da fonte de alimentação. A impedância paralela, por sua vez, é capaz de gerar o afundamento desejado de acordo com o valor adotado de  $Z_P$ .

Durante a operação normal do sistema a chave  $S_1$  permanece fechada e a chave  $S_2$  fica aberta de forma que a alimentação do DFIG não sofre qualquer influência das reatâncias série,  $Z_S$  e paralela,  $Z_P$ . Para simular condições anormais de operação do sistema, a chave  $S_1$  é aberta e a chave  $S_2$  é fechada. Assim, a tensão de alimentação do DFIG cai devido à queda de tensão em  $Z_S$ .

O esquema de ligação das impedâncias da Figura 5 considera que se deseja emular apenas uma profundidade de afundamento. Para gerar afundamentos de tensão de profundidade variadas deve-se utilizar um banco de indutâncias que, conseqüentemente, leva ao encarecimento da aplicação da técnica devido à utilização de mais chaves eletrônicas e à necessidade de um controle mais complexo.

### 2.2.2 Reguladores de Indução

Os reguladores de indução trifásicos se assemelham aos motores de indução com rotor bobinado (Veganzones C. et al, 2011) exceto pelo fato de que, nos reguladores, não é permitida a contínua rotação do rotor, somente o controle da sua posição.

Quanto ao funcionamento, esse tipo de gerador de afundamento de tensão se baseia no defasamento

das tensões rotóricas. A magnitude da tensão induzida no rotor é fixa pois depende apenas da relação de transformação do primário e do secundário, porém, a mudança de posição do rotor ocasiona o defasamento das suas tensões. Como a tensão de saída é obtida a partir da soma vetorial das tensões no estator e no rotor, a magnitude dessa tensão é modificada. Considerando o que foi exposto, a tensão de saída será máxima quando a tensão no primário (estator) está em fase com a tensão induzida no secundário (rotor). Por outro lado, é mínima quando a tensão rotórica é defasada de 180 graus da tensão do estator. De acordo com a Figura 6, nesse tipo de aplicação a carga é ligada em série com os enrolamentos do estator e pode tanto elevar quanto diminuir a tensão de saída quando comparada com o valor de tensão da rede. Assim, selecionando adequadamente o ângulo alfa é possível fazer com que o regulador de indução trifásico opere como gerador de afundamentos de tensão trifásicos simétricos (Veganzones C. et al, 2011).

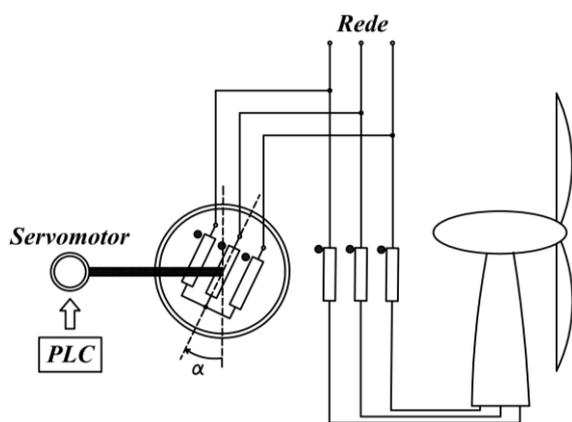


Figura 6: Gerador de afundamento de tensão com regulador de indução.

### 2.2.3 Conversor Back-to-Back

Os conversores back-to-back, através da parte retificadora conectada à rede, convertem primeiramente a potência AC em DC e, através da parte inversora, conectada ao gerador, convertem novamente para potência AC em níveis de tensão e/ou frequência diferentes da tensão da fonte. Portanto, através do controle PWM do acionamento das chaves eletrônicas da parte inversora é possível alterar a amplitude e frequência da tensão de saída (Islam M., Guo Y. e Yhu J., 2007), sendo considerado então como um método ativo de geração de afundamento de tensão. A Figura 7 apresenta o diagrama unifilar de ligação do conversor ao aerogerador.

Os conversores back-to-back também podem ser associados em cascata formando conversores multiníveis (Carnielutti F. et al., 2016) tornando possível a aplicação em sistemas de potência maiores com níveis de tensão e corrente mais elevados (Barbi I. e Braga H., 2000).

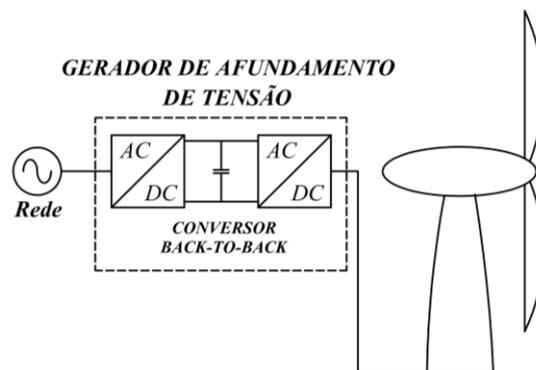


Figura 7: Gerador de afundamento de tensão com conversor back-to-back.

## 3 Proposta

### 3.1 Estrutura e Funcionamento

A topologia proposta é composta basicamente de três autotransformadores monofásicos e seis chaves eletrônicas bidirecionais em tensão e corrente, com seus respectivos circuitos de acionamento. As chaves bidirecionais resultam da conexão de dois tiristores em antiparalelo.

Topologias semelhantes foram apresentadas em Ma Y. e Karady G.G. (2008) e Pires I. (2011). Contudo, o conteúdo desses trabalhos não apresenta o comportamento das correntes, não menciona a necessidade do tempo morto entre o acionamento dos interruptores do BLOCO 1 e do BLOCO 2 e tampouco discutem a coordenação com os dispositivos de proteção necessária para o funcionamento adequado desse dispositivo.

A Figura 8 apresenta o diagrama unifilar do circuito gerador de afundamentos de tensão proposto. Quando o sistema está sob condições normais, todos os tiristores do BLOCO 2 estão em corte enquanto todos os tiristores do BLOCO 1 estão acionados. Para a simulação de um afundamento de tensão simétrico, as chaves do BLOCO 1 são abertas e as do BLOCO 2 são fechadas. Assim, a tensão que alimenta os enrolamentos do DFIG passa a ser a tensão ajustada no autotransformador.

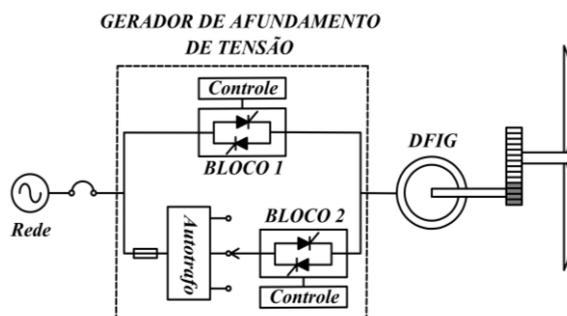


Figura 8: Esquemático do gerador de afundamento de tensão proposto.

O grande desafio dessa implementação é assegurar que as chaves eletrônicas do BLOCO 1 e do BLOCO 2 não sejam acionadas ao mesmo tempo

pois, caso contrário, haverá um curto-circuito e a corrente sobre elas pode ser extremamente alta, causando danos permanentes. Portanto, uma consideração de projeto importante é o tempo de comutação das chaves pois, é preciso primeiramente garantir que os interruptores pertencentes a um bloco estejam em corte para então acionar as do outro bloco. Na Figura 9 apresenta-se a corrente em um dos interruptores do BLOCO 1 (em azul) e na respectiva chave do BLOCO 2 (em vermelho) no momento do afundamento ( $t = 0,10s$ ). Observa-se que, primeiramente, as chaves do BLOCO 1 foram completamente abertas para só então acionar os tiristores do BLOCO 2, conectados ao autotransformador.

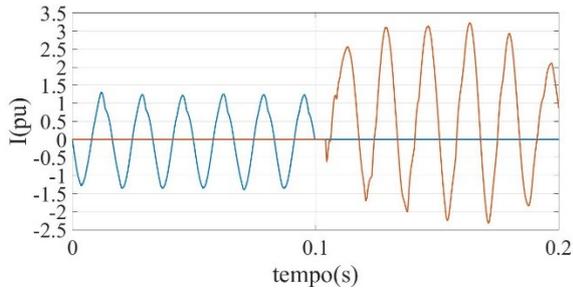


Figura 9: Corrente nos tiristores do BLOCO 1 e do BLOCO 2.

A corrente de curto-circuito está relacionada diretamente com a velocidade do vento no momento da falta e a profundidade do afundamento de tensão. Assim, quanto maior a velocidade do vento maior a corrente de curto-circuito que flui pelo DFIG. Da mesma forma, quanto maior a profundidade do afundamento, maior é a corrente de falta esperada (Hardik G, Chintan M. e Santosh V., 2016). Levando em consideração o código de rede do Brasil, a maior corrente que o DFIG deve suportar acontece quando o afundamento de tensão da rede tem profundidade de 80% e o DFIG opera em velocidade supersíncrona ( $s = -0.2$ ) (Morren J., 2007).

### 3.2 Projeto

Considerando-se uma bancada de emulação protegida por um disjuntor trifásico de corrente nominal de 32A, curva C, a corrente eficaz de falta não deve ultrapassar esse valor por um tempo superior ao estipulado pela sua curva característica.

O circuito equivalente do DFIG dessa bancada é exibido na Figura 10, enquanto na Tabela 2 são apresentados os respectivos valores dos parâmetros do DFIG utilizados no cálculo da corrente de curto-circuito.

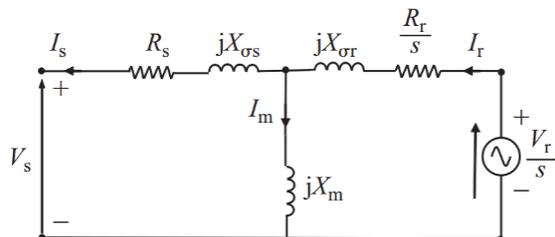


Figura 10: Circuito equivalente do DFIG.

Tabela 2: Parâmetros do DFIG obtidos experimentalmente através dos ensaios de curto-circuito, circuito aberto e resistência CC.

Parâmetro	pu
$R_s$ (resistência do estator)	0,0343
$R_r$ (resistência do rotor)	0,0611
$X_{s\sigma}$ (reatância de dispersão do estator)	0,131
$X_{r\sigma}$ (reatância de dispersão do rotor)	0,131
$X_m$ (reatância de magnetização)	1,990

Uma boa aproximação da corrente máxima de falta ( $I_{sc}$ ) pode ser calculada a partir da Equação 8 (Hardik G, Chintan M. e Santosh V., 2016). Primeiramente, determina-se a reatância do estator ( $X_s$ ) e do rotor ( $X_r$ ) calculados a partir da Equação 1 e Equação 2, respectivamente:

$$X_s = X_{s\sigma} + X_m \quad (1)$$

$$X_r = X_{r\sigma} + X_m \quad (2)$$

$$X_s = X_r = 2,12 \text{ pu}$$

Já as reatâncias transitórias do estator ( $X'_s$ ) e do rotor ( $X'_r$ ) podem ser determinadas nesta ordem conforme a Equação 3 e Equação 4.

$$X'_s = X_{s\sigma} + \frac{X_{r\sigma} X_m}{X_{r\sigma} + X_m} \quad (3)$$

$$X'_r = X_{r\sigma} + \frac{X_{s\sigma} X_m}{X_{s\sigma} + X_m} \quad (4)$$

$$X'_s = X'_r = 0,254 \text{ pu}$$

O fator de dispersão ( $\sigma$ ) é obtido a partir da Equação 5, e os valores das constantes de tempo para o amortecimento das correntes DC no estator ( $T'_s$ ) e no rotor ( $T'_r$ ) são determinados a partir da Equação 6 e Equação 7, respectivamente. Para esse cálculo foi desconsiderada a impedância da linha, logo  $R_{ext} = X_{ext} = 0$ . Além disso, o rotor não possui proteção contra o aumento das correntes rotóricas (crowbar) portanto  $R_{cb} = 0$ .

$$\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r} = 0,119 \quad (5)$$

$$T'_s = \frac{X'_s + X_{ext}}{\omega_s (R_s + R_{ext})} = 19,63 \text{ ms} \quad (6)$$

$$T'_r = \frac{X'_r}{\omega_s (R_r + R_{cb})} = 11,02 \text{ ms} \quad (7)$$

Após os cálculos de todas as variáveis descritas acima, é possível estimar a máxima corrente de curto-circuito no DFIG a partir da Equação 8.  $\Delta t$  é o tempo que a corrente de falta demora para alcançar o seu primeiro pico e, no caso analisado, depende apenas do escorregamento ( $s$ ) da máquina. Esse tempo pode ser obtido a partir das simulações feitas no PSCAD para um afundamento de tensão de 80%.

$$I_{sc} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\sqrt{(X'_s + X_{ext})^2 + R_{cb}^2}} \times \left[ e^{-\frac{\Delta t}{T'_s}} + (1 - \sigma)e^{-\frac{\Delta t}{T'_r}} \right] \quad (8)$$

$$i_{s,m\acute{a}x} \cong 3,36 pu \cong 46,36A$$

A Tabela 3 apresenta os dados de placa do autotransformador selecionado e do DFIG. O autotrafo escolhido, apesar de possuir corrente nominal de 25A, consegue suportar a corrente de falta calculada acima pois esta circula apenas por alguns milissegundos. Os fusíveis de proteao do tipo GL de 25A tampouco atuam, pois a corrente eficaz de falta de 32,78A deve permanecer durante aproximadamente 3000s para que a proteao do autotransformador atue, o que na realidade não acontece.

Tabela 3: Dados de placa do autotransformador e DFIG utilizados.

	Autotrafo	DFIG (n=1800 rpm)
Potência	9,525VA	3,74kW
Tensão	220V	220V
Corrente	25A	13,8A

Para a seleao da chave eletrnica  conveniente escolher uma chave com baixo tempo de comutao, alta confiabilidade e que suporte os níveis de tensão e corrente esperados durante a operao do gerador de afundamento de tensão. Considerando tais fatores foi escolhido trabalhar com a chave da EUPEC modelo TT104N por ser uma chave robusta e que suporta correntes de até 160A e tensão reversa de até 1200V. Quanto ao tempo de acionamento, uma vez operando na região de saturao, os tiristores são entram em corte quando a corrente que flui entre ânodo e cátodo passa por zero, sendo necessário um novo pulso de gatilho e polarizao direta para que entre novamente no modo saturao. Por isso, quando o pulso de gatilho cessa, o tiristor continua conduzindo e pode demorar até aproximadamente meio ciclo da rede para entrar em corte (Yang Y. et al, 2012).

Para o acionamento dos tiristores optou-se por optoacopladores. O modelo do componente escolhido deve ser capaz de suportar tensões de até 220V e permitir a passagem de corrente elétrica nos dois sentidos. O MOC3021 foi selecionado para fazer a interface entre circuito de comando e circuito de potência pois o elemento receptor de luz  o fotodiac e suporta tensões de até 400V.

Durante o funcionamento do gerador de afundamento de tensão sabe-se que o microcontrolador deve acionar 3 MOCs (um para cada fase). Para tal, ele deveria fornecer uma corrente total de 180mA caso um driver de corrente não for implementado.

A configurao emissor comum se mostrou mais adequada  aplicao pois proporciona um alto ganho de corrente na saída. O transistor NPN BC337 foi utilizado como transistor amplificador pois suporta até 800mA de corrente de coletor. A resistência de

coletor de 120Ω foi indicada pelo próprio *datasheet* do MOC para adequar os níveis de tensão e corrente no seu LED de entrada, enquanto a resistência de base do transistor teve que ser calculada considerando que durante a saturao, a corrente de coletor ( $I_C$ ) vale aproximadamente 60mA (corrente de entrada exigida pelo MOC), a tensão no LED de entrada do MOC ( $V_{MOC}^{in}$ )  de 1,2V e a tensão máxima de saída do trem de pulsos  5V.

Segundo o *datasheet* do transistor BC337, para  $I_C = 60mA$ , a corrente de base ( $I_B$ )  igual a 0,25mA e a tensão entre base e emissor ( $V_{BE}$ ) vale 0,7V. Assim, a partir da Equao 9  possível estimar o valor da resistência de base do transistor ( $R_1$ ).

$$R_1 = \frac{5 - V_{BE} - V_{MOC}^{in}}{I_B} = 12,4k\Omega \quad (9)$$

A partir dos valores comerciais de resistores disponíveis,  $R_1 = 12k\Omega$ .

O circuito de acionamento esquematizado na Figura 11 funciona da seguinte forma: quando  necessário gerar o afundamento de tensão, o microcontrolador emite um trem de pulsos de frequência muito superior  frequência da tensão da rede (cerca de 10 vezes maior) para assegurar que o tiristor entre em conduo logo no início do semiciclo. Dependendo do valor instantâneo da tensão de alimentao,  $T_1$  ou  $T_2$  estará polarizado diretamente, fazendo com que o DFIG seja alimentado por ciclos completos de tensão. Por fim, para cessar o afundamento, basta retirar o pulso de gatilho através de uma tensão de saída do microcontrolador nula.

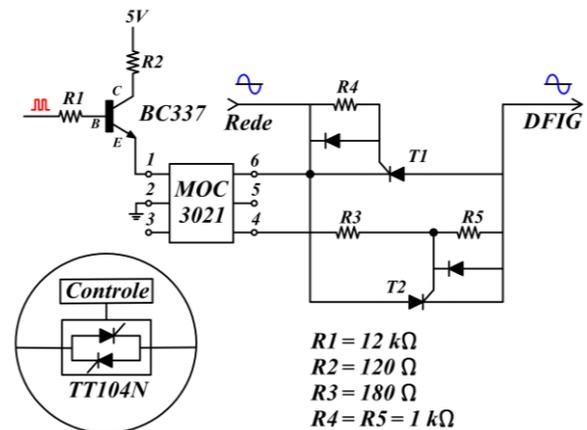


Figura 11: Circuito de acionamento dos tiristores.

## 4 Resultados e Discussões

Para estimar as correntes de falta do DFIG foram realizadas simulaes no software PSCAD considerando afundamentos de tensão causados por faltas simétricas de 20%, 50% e 80% respeitando os tempos de durao da falta previstos no código de rede brasileiro apresentados na Tabela 4. Para todas as simulaes realizadas, o afundamento de tensão tem início em  $t = 0,10s$ .

Tabela 4: Duração do afundamento de tensão para 20%, 50% e 80% de profundidade segundo o código de rede brasileiro.

Profundidade do afundamento	Duração (s)
20%	0,95
50%	0,75
80%	0,5

As simulações de afundamento de tensão de 20%, 50% e 80% consideraram a operação do DFIG em velocidade supersíncrona de 2160 rpm ( $s = -0,2$ ). No caso do afundamento de 80% foi analisado também o comportamento do DFIG sob falta em operação subsíncrona e velocidade de 1260 rpm ( $s = 0,3$ ).

Para simular os afundamentos de 20%, 50% e 80% o autotransformador foi ajustado para ter a relação de transformação de 5 para 4, 2 para 1 e 5 para 1 respectivamente. Na Figura 12, na Figura 13 e na Figura 14, são apresentados os perfis de tensão no estator ( $V_s$ ) e corrente drenada da rede ( $I_g$ ) considerando afundamento de 20%, 50% e 80% para operação supersíncrona, respectivamente. Por fim, na Figura 15 são exibidas as curvas de tensão e corrente para afundamento de 80% e modo de operação subsíncrono.

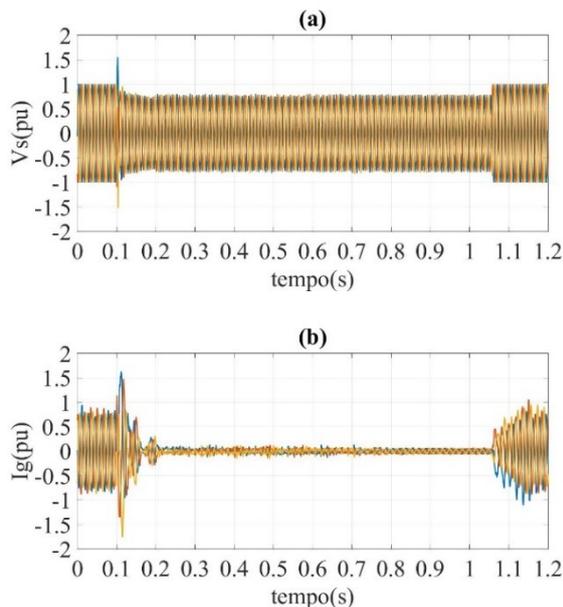


Figura 12: (a) Tensão no estator e (b) corrente drenada da rede para afundamento de 20% e modo de operação supersíncrono.

No momento da ocorrência da falta trifásica, a tensão no rotor cresce e, conseqüentemente, a corrente atinge o seu pico logo após a ocorrência do afundamento de tensão. Portanto, caso não haja o emprego de um circuito de proteção, os semicondutores do conversor podem ser danificados.

A corrente de curto-circuito calculada a partir da Equação 8 mostrou ser uma boa estimativa de corrente de curto-circuito para um afundamento de 80% em modo de operação supersíncrono, já que o erro entre o valor obtido via simulação e calculado foi de apenas  $-10,16\%$ .

Como já discutido anteriormente, o valor de corrente eficaz da rede não deve ultrapassar o valor de

32A por um tempo suficientemente grande a ponto de desarmar a proteção. Analisando a curva C do disjuntor utilizado e os níveis de corrente obtidos via simulação apresentados na Figura 12, Figura 13, Figura 14 e Figura 15, conclui-se que as proteções não irão atuar.

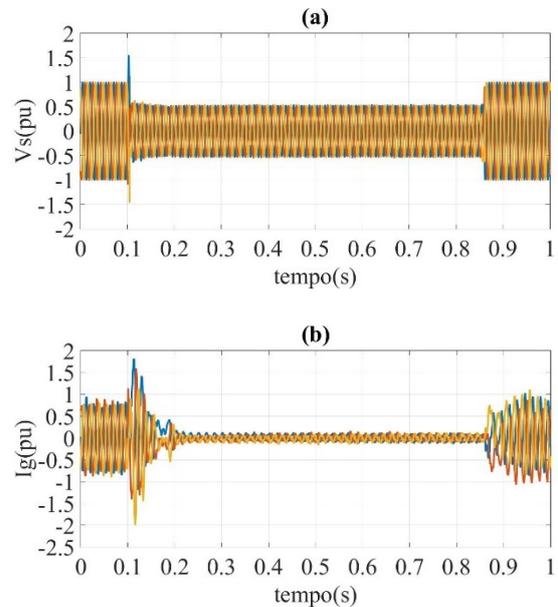


Figura 13: (a) Tensão no estator e (b) corrente drenada da rede para afundamento de 50% e modo de operação supersíncrono.

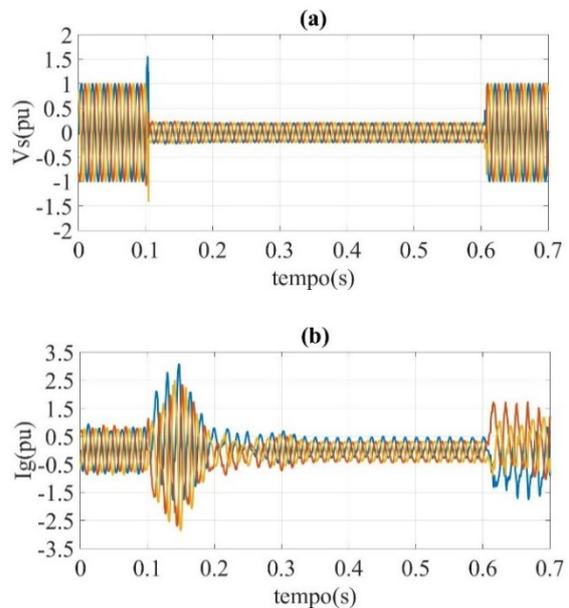


Figura 14: (a) Tensão no estator e (b) corrente drenada da rede para afundamento de 80% e modo de operação supersíncrono.

## 5 Conclusões

Foi apresentado neste artigo o projeto de uma topologia para obtenção em laboratório de afundamentos de tensão para ensaios de DFIG. A topologia possui uma estrutura simples, baseada em autotransformador e tiristores em antiparalelo.

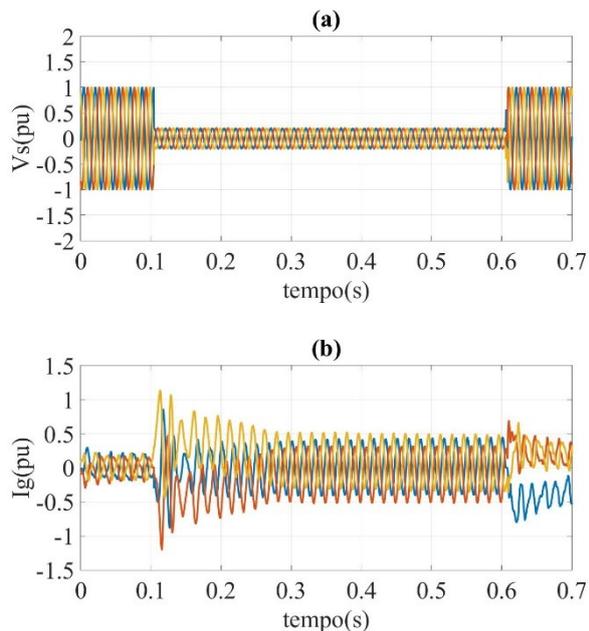


Figura 15: (a) Tensão no estator e (b) Corrente drenada da rede para afundamento de 80% e modo de operação subsíncrono.

O projeto contempla o acionamento dos tiristores e a análise do atendimento aos critérios de comando e proteção.

A partir dos resultados obtidos na simulação conclui-se que a proposta apresentada é uma boa opção para geração de afundamentos de tensão, pois conseguiu-se gerar com precisão diversas profundidades de afundamentos apenas ajustando a relação de transformação do autotransformador. Porém, deve-se lembrar que, devido às altas correntes drenadas no circuito de rotor durante o afundamento, deve-se empregar um circuito de proteção adequado para o conversor no rotor.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de doutorado, ao CNPq/PRPPG-UFES pela bolsa IC e ao CNPq Processo 312040/2015-6.

### Referências Bibliográficas

Barbi I. e Braga H. (2000) 'Conversores Estáticos Multiníveis', SBA Controle e Automação, vol. 11, no. 1, Abril, pp. 21.

Carnielutti F. et al. (2016) 'Conversor Multinível em Cascata Simétrico para Realização de Ensaio de Suportabilidade a Afundamentos de Tensão em Turbinas Eólicas', Congresso Brasileiro de Automática 2016, Outubro, pp. 1108-1113.

Elkraft System and Eltra (2004) 'Wind Turbines Connected do Grids with Voltages above 100kV', Dezembro, pp. 13.

Eon Netz (2006) 'Grid Code: High and Extra High Voltage', Abril, pp. 17.

Erlich I., Wrede H. e Feltes C. (2007) 'Dynamic Behavior of DFIG-Based Wind Turbines during

Grid Faults', Power Conversion Conference - Nagoya, 2007, pp. 1195-1200.

GWEC (2016) 'Global Wind Report 2016 [Online]. Disponível em: <https://goo.gl/Q1CXAF> [Acessado em: 28/02/2018].

Hardik G, Chintan M. e Santosh V. (2016) 'Short-Circuit Current Comparison of DFIG during Symmetrical Faults with Different Wind Speeds, IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems on Energy Conversion.

Hirt W. (2015) 'Análise de Curto-Circuito e Afundamentos de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência: um Estudo Aplicado à Expansão da Geração no Rio Grande do Sul', pp. 35.

Islam M., Guo Y. e Yhu J. (2007) 'Power Converters for Wind Turbines: Current and Future Development'. In: A. Mendez-Vilas, Material and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technological Developments, 1ª ed. Badajoz: Formatex Research Center, pp. 560-563.

Ma Y. e Karady G.G (2008) 'A single-phase voltage sag generator for testing electrical equipments', IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2008, Abril, pp. 1-5.

Morren J. (2005) 'Ridethrough of Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generator during a Voltage Dip', IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, Junho, pp. 437.

Morren J. (2007) 'Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator', IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 11, Março.

ONS (2009) 'Submódulo 3.6: Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica', Junho, pp. 26.

Pires I. (2011) 'Compensadores Série de Tensão em Onda Quadrada: Aplicação na Mitigação de Afundamentos de Tensão', Tese de Doutorado PPGEE-UFMG.

Secretaría General de Energia de España (2006) 'Requisitos de Respuesta Frente a Huecos de Tension de las Instalaciones Eolicas', Outubro.

Veganzones C. et al (2011) 'Voltage Dip Generator for Testing Wind Turbines Connected to Electrical Network', Renewable Energy 36, Novembro, pp. 1588-1594.

Wessels C., Wehrend T. e Fuchs F. (2010) 'Transformer Based Voltage Sag Generator to test Renewable Energy Systems during Grid Faults in the Laboratory', pp. 3-4.

Yang Y. et al (2012) 'Benchmarking of Voltage Sag Generators', IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Dezembro, pp. 943-948.