

# APLICAÇÃO DO SUPERCAPACITOR E LÓGICA FUZZY PARA A PROTEÇÃO DO ELO CC E A SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA DA GERAÇÃO EÓLICA

WILIAM C. DE CARVALHO\*, THIAGO S. MENEZES\*, DENIS V. COURY\*

\**Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação  
Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP)  
São Carlos, SP, Brasil*

Emails: wcarvalho@usp.br, thiagosm@usp.br, coury@sc.usp.br

**Abstract**— The significant increase in wind energy has brought great challenges concerning electrical power systems quality and operation. In order to improve the wind turbines integration in the grid and to reduce the negative impacts of such renewable source, different studies have investigated the use of energy storage systems (ESS). A supercapacitor is utilized in this study to enhance some characteristics of a wind turbine, such as smoothing output power fluctuations, protecting the DC-link of the wind turbine's back-to-back converter against overvoltages and improving fault ride through. For this purpose, two control techniques of the supercapacitor are proposed: a conventional technique based on proportional integral (PI) control and another based on Fuzzy logic. Such control techniques are tested and compared based on the effectiveness in smoothing the power and protecting the DC-link. Real time simulations have shown that the supercapacitor controlled by the Fuzzy system has obtained better results and considerably enhanced the wind turbine's operation.

**Keywords**— DC-Link Protection, Energy Storage Systems, Fuzzy Logic, Power Smoothing, Supercapacitor, Wind Power.

**Resumo**— O aumento expressivo da geração eólica nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) trouxe grandes desafios no que concerne à qualidade da energia elétrica e a operação do SEP. Para melhorar a integração dos aerogeradores no sistema e diminuir os impactos negativos dessa fonte renovável, diferentes estudos têm investigado a utilização dos Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE). Nesse contexto, um supercapacitor é utilizado neste trabalho para melhorar algumas características de um aerogerador, tais como suavizar as flutuações de potência, proteger o elo CC do conversor *back-to-back* do aerogerador contra sobretensões e aperfeiçoar a suportabilidade às faltas. Para tanto, duas técnicas de controles do supercapacitor são propostas para possibilitar essas melhorias: uma técnica convencional baseada em controladores Proporcional Integral (PI) e outra baseada na lógica Fuzzy. Tais técnicas de controle são testadas e comparadas com base na eficácia em suavizar a potência e proteger o elo CC do aerogerador. Simulações em tempo real mostraram que o supercapacitor com o controlador baseado na lógica Fuzzy obteve os melhores resultados e pôde significativamente aperfeiçoar a operação da unidade eólica.

**Palavras-chave**— Geração Eólica, Lógica Fuzzy, Proteção do Elo CC, Sistemas de Armazenamento de Energia, Suavização de Potência, Supercapacitor.

## 1 Introdução

Recentemente, com o aumento expressivo da geração eólica nos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), maior atenção tem sido dada ao controle das flutuações de potência dos aerogeradores (Abbey and Joos, 2007). As variações abruptas de potência da geração eólica podem causar desvios na tensão e na frequência da rede e até disparar equipamentos de proteção (Mandic et al., 2013). A fim de mitigar tais efeitos indesejáveis, a integração de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) com aerogeradores tem sido estudada recentemente (Novakovic et al., 2014). Os SAEs podem ser utilizados para suavizar a potência de saída, fornecer serviços ancilares à rede e, ainda, aumentar a estabilidade transitória do sistema elétrico (Abbey and Joos, 2007; Barton and Infield, 2004).

Para aplicações de curto prazo, onde não é necessária grande capacidade de energia, o supercapacitor apresenta-se como um dos SAEs mais proeminentes. O supercapacitor possui alta densidade de potência, boa eficiência e uma vida útil em ciclos muito maior do que as baterias atuais

(Abbey and Joos, 2007; Barton and Infield, 2004). Essas características fazem do supercapacitor um atraente SAE para suavização de potência da geração eólica, entre outras aplicações que exigem pouca capacidade de energia.

Os SAEs podem ser acoplados no elo CC do conversor *back-to-back* de uma unidade eólica *full-converter*, de forma que não é necessário adquirir um inversor próprio para o armazenador de energia (Abbey and Joos, 2007; Mandic et al., 2013; Li et al., 2010). Com tal abordagem, é possível suavizar a potência de saída do aerogerador, aumentar a sua suportabilidade às faltas e, ainda, proteger o elo CC do conversor *back-to-back*. Tais benefícios podem ser obtidos por meio do controle rigoroso do nível de tensão do elo CC. Portanto, neste trabalho é utilizado um supercapacitor conectado ao elo CC para manter o nível de tensão do conversor e, conseqüentemente, melhorar a integração da unidade eólica na rede. Durante condições normais, o SAE deve fazer a suavização de potência e, durante distúrbios na rede elétrica, deve proteger o elo CC contra sobretensões para possibilitar que o aerogerador mantenha-se conectado ao sistema.

Para controlar o supercapacitor, é proposto

um controle baseado na técnica convencional, isto é, o controlador Proporcional Integral (PI), e outro baseado na lógica Fuzzy. Essas técnicas de controles são responsáveis por definir o nível da potência do supercapacitor de forma a manter a tensão CC em seu valor nominal. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é investigar e comparar a eficácia do controlador convencional e do controlador Fuzzy em suavizar a potência da geração eólica e proteger o elo CC do conversor. Adicionalmente, a utilização do supercapacitor é comparada com a configuração tradicional do aerogerador, onde não há a suavização de potência e a proteção do elo CC é realizada por meio de uma resistência.

Para avaliar a eficácia das técnicas de controle, simulações são realizadas com um sistema de distribuição teste modificado do IEEE 13 de barras e um aerogerador *full-converter* de 2 MW. Para realizar as simulações, foi utilizado o *software* RSCAD, que faz interface com o equipamento de simulação digital em tempo real (RTDS<sup>®</sup>). Adicionalmente, foi utilizado o MATLAB<sup>®</sup> R2015a para projetar o sistema Fuzzy, o qual foi posteriormente implementado em linguagem C no RTDS<sup>®</sup> para ser utilizado em tempo real.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta a descrição da topologia do aerogerador utilizado, bem como o modelo do supercapacitor e do sistema de distribuição implementado. Na seção 3 é apresentada a abordagem para suavizar a potência e proteger o elo CC por meio do supercapacitor e das duas técnicas de controle propostas. Na seção 4 é apresentada a metodologia das simulações para verificar a eficácia dos controles do supercapacitor. As simulações e os resultados são apresentados na seção 5, e as conclusões acerca do trabalho são descritas na seção 6.

## 2 Descrição dos Componentes do Sistema

A Figura 1 apresenta o sistema elétrico e os principais componentes utilizados para realizar este estudo. Vale ressaltar que, embora não representado nessa figura, o supercapacitor é conectado dentro do conversor do aerogerador. Esta seção dedica-se em descrever os principais componentes utilizados.

### 2.1 Aerogerador

Os aerogeradores *full-converter*, ou seja, aerogeradores onde toda sua potência é transmitida à rede por conversores eletrônicos, tem sido um dos mais instalados atualmente e sua participação de mercado já atingiu 40,8% no ano de 2013 (Ma et al., 2017). Em vista disso, neste trabalho é utilizado o *full-converter* com um Gerador Síncrono de Rotor Bobinado (GSRB) com valores nominais de 2 MW e 4 kV. O GSRB é conectado à rede por meio do conversor fonte de tensão de três níveis,

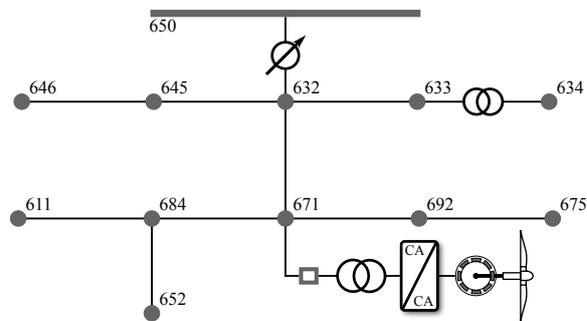


Figura 1. Versão modificada do sistema de distribuição do IEEE de 13 barras e o ponto de conexão do aerogerador.

na configuração *back-to-back* com o neutro grampeado, conforme apresenta a Figura 2. O método utilizado para o controle do aerogerador foi baseado em Quèval and Ohsaki (2012).

O uso dos conversores de potência na geração eólica permitem que o aerogerador opere em uma ampla faixa de velocidade do vento e da velocidade do eixo. Tal característica, que é possível devido ao desacoplamento entre o gerador e a rede proporcionado pelo conversor, proporciona um aumento significativo do desempenho do aerogerador (Yaramasu et al., 2015). Com possibilidade de variar a velocidade do eixo, é possível utilizar a técnica de controle de rastreamento do ponto de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT)), a qual é responsável por buscar constantemente o ponto de operação com a maior eficiência de extração de energia do vento. Neste trabalho, foi utilizado a técnica de MPPT baseada na razão da velocidade da ponta da pá (do inglês, *Tip Speed Ratio* (TSR)) (Ma et al., 2017; Nasiri et al., 2014).

Em situações onde há um afundamento da tensão nos terminais de saída da unidade eólica, como, por exemplo, em casos de faltas na rede, a capacidade da potência enviada pelo Conversor do Lado da Rede (CLR) é reduzida. No entanto, como o gerador opera praticamente desacoplado da rede, a capacidade da potência enviada do Conversor do Lado do Gerador (CLG) não é alterada. Esse desbalanço entre a potência enviada ao elo CC pelo CLG e a enviada à rede pelo CLR faz com que a tensão do elo CC ( $V_{cc}$ ) se eleve drasticamente (Sartika et al., 2016).

Para contornar tal problema, é comum a utilização de uma resistência de proteção em paralelo com o circuito CC para dissipar a energia excedente e, então, manter a tensão dentro do limite adequado (Sartika et al., 2016). A Figura 2 apresenta a topologia convencionalmente utilizada para proteger o elo CC contra as sobretensões. Com a proteção do circuito CC é possível manter o aerogerador conectado à rede durante afundamentos de tensão na rede, como é exigido pelos operadores e distribuidoras de energia elétrica.

De acordo com a metodologia apresentada em

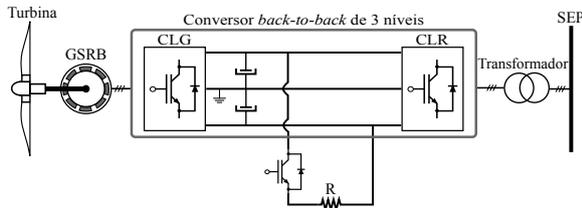


Figura 2. Topologia do aerogerador utilizado e a proteção tradicional do elo CC por meio da resistência.

Sartika et al. (2016), o valor de resistência definido neste trabalho foi de 28,2133 ohms. Com esse valor de resistência e com o nível de tensão do elo CC, é possível absorver toda a potência do gerador em situação de máxima geração, isto é, 2 MW. A resistência de proteção é ativada por meio do transistor IGBT quando  $V_{cc}$  ultrapassa 1,05 p.u. (Sartika et al., 2016).

## 2.2 Supercapacitor

Nos últimos anos, os SAEs têm apresentado grande desenvolvimento de novas tecnologias, bem como notável aperfeiçoamento das tecnologias já existentes. Tal progresso que vem acontecendo nos armazenadores de energia, juntamente com o enorme crescimento da geração eólica, tem levado a um crescente interesse na aplicação dos SAEs nos SEPs (Ackermann, 2012). Os SAEs podem fornecer suporte ancilar ao sistema e, também, gerenciar a energia da geração eólica, tanto na operação normal quanto durante distúrbios na rede (Abbey and Joos, 2007; Barton and Infield, 2004).

As flutuações de potência da geração eólica podem ser reduzidas por meio do próprio controle do aerogerador. Entretanto, essa técnica pode acarretar em significativa redução da eficiência. Desse modo, os SAEs podem apresentar diversas vantagens, tais como: aperfeiçoar o comportamento dos aerogeradores frente aos distúrbios no sistema, possibilitando melhor estabilidade transitória; permitir que o aerogerador opere no ponto ótimo de eficiência; e, além do mais, os SAEs podem ser utilizados independentemente da condição de operação da unidade eólica (Abbey and Joos, 2007).

Em se tratando de aplicações de curto prazo, o supercapacitor tem se destacado como um dos SAEs mais promissores. Essa tecnologia apresenta baixo custo por unidade de potência, elevada densidade de potência, alta eficiência e tempo de vida em ciclos muito superior do que as baterias (Abbey and Joos, 2007; Barton and Infield, 2004; Farhadi and Mohammed, 2016). Essas características são de extrema importância para a aplicação deste trabalho e, portanto, fazem do supercapacitor um SAE adequado para este estudo.

O modelo do supercapacitor utilizado neste trabalho foi baseado em Abbey and Joos (2007) e Li et al. (2010), o qual consiste em um capacitor de

grande capacitância em série com um resistor. O valor da resistência foi dimensionado para o SAE apresentar uma eficiência total de 95%, de acordo com as características comerciais mostradas em Farhadi and Mohammed (2016). Para dimensionar o valor da capacitância, levou-se em consideração a capacidade de energia necessária para a aplicação. Desse modo, conforme o utilizado no trabalho de Novakovic et al. (2014), a capacidade de energia foi adotada como sendo a energia necessária para suprir 1 minuto da potência nominal do aerogerador. Tal método resultou em um valor de energia de 33,33 kWh (120 MJ), que foi obtido por meio de dois supercapacitores de 30 F e 2 kV.

Para este estudo, foi especificado uma potência nominal de 2 MW para o supercapacitor. Esse valor de potência, que é o mesmo valor nominal do aerogerador, foi adotado para que o SAE seja capaz de absorver toda a potência do aerogerador em situações onde o mesmo não é capaz de entregar potência à rede. Adicionalmente, ressalta-se que o supercapacitor foi conectado ao elo CC do conversor *back-to-back* por meio de um conversor eletrônico CC/CC, como apresenta a Figura 3.

## 2.3 Sistema de Distribuição

Para realizar as simulações e avaliar os métodos propostos de suavização e proteção do elo CC, foi utilizado o *benchmark* de 13 barras do IEEE, o qual consiste em uma rede de distribuição típica completa (Kersting, 1991). Para melhor analisar os resultados, o regulador de tensão da subestação foi mantido desligado e não foi considerada a barra 680 do sistema original, conforme apresentado na Figura 1.

## 3 Suavização e Proteção por meio do Supercapacitor

Neste trabalho, o supercapacitor é utilizado para realizar a suavização de potência e a proteção do elo CC do conversor do aerogerador. Por meio do ajuste do valor da potência injetada pelo supercapacitor, é possível regular o nível da tensão CC e mantê-lo dentro dos limites adequados de operação. Portanto, em situações de afundamento de tensão na rede, o supercapacitor é capaz de absorver a energia excedente no elo CC e manter a tensão em níveis seguros.

O CLR controla a potência enviada ao SEP com base no nível de tensão do elo CC. Portanto, com a regulação restrita dos níveis de tensão CC, também é possível realizar a suavização de potência de saída do aerogerador. Assim sendo, o supercapacitor é capaz de realizar a função de suavização em condições normais de operação, e a de proteção em condições de distúrbio na rede.

Para que o supercapacitor seja capaz de manter os níveis de  $V_{cc}$ , é necessário que o seu controle

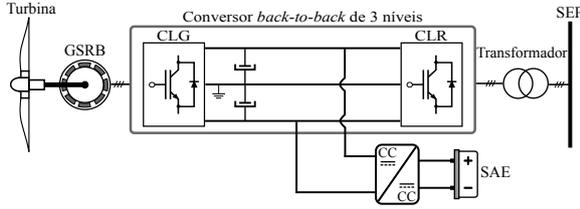


Figura 3. Ponto de conexão do SAE para a suavização de potência e proteção do elo CC do aerogerador

ajuste devidamente o valor da potência. Para isso, duas técnicas de controle são investigadas neste trabalho: uma técnica convencional baseada no controlador PI e outra baseada na lógica Fuzzy. Tais técnicas de controle são responsáveis por gerar a referência de potência ativa do conversor CC/CC do supercapacitor e gerar o sinal modulante enviado ao PWM. Os dois controladores são apresentados em mais detalhe na sequência.

### 3.1 Controle Baseado em Blocos PIs

A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático do controle baseado na técnica convencional. Verifica-se que, além do sinal de  $V_{cc}$ , que é a variável controlada, é utilizado o sinal do estado de carga do supercapacitor ( $EC$ ) como entrada. Tal sinal é utilizado para garantir que o SAE opere dentro dos limites adequados de carga do equipamento. De acordo com Li et al. (2010), essa faixa adequada de operação do  $EC$  é de 10% à 100%.

É possível observar na Figura 4 que são utilizados três blocos de controlador PI, os quais são responsáveis para manter as grandezas nos valores de referência. Adicionalmente, é utilizado um bloco limitador, que é responsável por manter o valor de referência da potência do supercapacitor ( $P_{sc}^*$ ) entre 2 MW e -2 MW. O valor da referência de tensão ( $V_{cc}^*$ ) é mantida em 1,0 p.u. e do estado de carga ( $EC^*$ ) em 0,55 p.u., isto é, a metade entre os limites operativos do estado de carga do supercapacitor ( $EC$ ).

Vale salientar que os ganhos do PI responsável pelo sinal  $EC$  possuem magnitudes muito menores do que os ganhos do sinal  $V_{cc}$ . Isso porque o carregamento ou o descarregamento do SAE para manter o nível de  $EC$  deve ser feito de forma suave para não afetar a tensão do elo CC de forma abrupta.

### 3.2 Controle Baseado na Lógica Fuzzy

A lógica Fuzzy, também conhecida como lógica difusa, é capaz de abordar adequadamente problemas em ambientes imersos em incerteza e imprecisão. Tal lógica se compara à forma de raciocínio do cérebro humano que, mesmo sem valores precisos de entrada, é capaz de tomar decisões racionais e apropriadas para interagir com o meio (Cavalcanti et al., 2012).

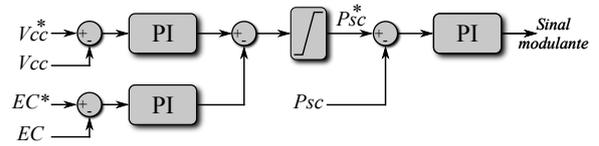


Figura 4. Diagrama da malha de controle baseado em blocos PI.

A lógica Fuzzy já foi utilizada em outros trabalhos (Abbey and Joos, 2007; Cardenas et al., 2001) para controlar a tensão do elo CC de conversores. No entanto, em ambos os trabalhos, além de utilizarem um controlador Fuzzy com estrutura totalmente diferente do Fuzzy apresentado neste estudo, não foi comparado o desempenho da lógica difusa com técnicas convencionais. Desse modo, o presente trabalho contribui com a proposta de uma nova técnica de controle baseada em lógica Fuzzy, onde a mesma é testada e comparada com a técnica baseada em controladores PIs.

A Figura 5 apresenta o diagrama do controlador Fuzzy, onde é possível verificar as duas entradas e a saída do sistema Fuzzy. A Figura 6 apresenta as funções de pertinência para as entradas ( $V_{cc}$  e  $EC$ ) e saída do Fuzzy ( $P_{sc}^*$ ). Verifica-se na Figura 6(a) que  $V_{cc}$  é considerada normal para valores entre 0,95 e 1,05 p.u. Entretanto, as funções de pertinência Baixa e Alta já possuem contribuição para valores menores e maiores do que 1, respectivamente. Na Figura 6(b), observa-se que a função de pertinência Médio ocupa grande faixa do  $EC$ . Isso foi ajustado dessa maneira para permitir que o supercapacitor possa percorrer grande parte do  $EC$  sem que haja limitação da proteção do elo CC para diferentes valores de  $EC$ .

Na Figura 6(b), verifica-se que são utilizadas duas funções de pertinência com formato de sino, a função Baixo e Alto. A função sino utilizada pode ser representada por (1)

$$f(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (1)$$

sendo que o parâmetro  $c$  representa o centro do sino e  $a$  e  $b$  alteram o seu formato. Neste trabalho foram utilizados os valores de 0,05 e 1,5 para os parâmetros  $a$  e  $b$ , respectivamente. O parâmetro  $c$ , por sua vez, foi definido como 0,25 para função Baixo e de 0,85 para função Alto.

O Suporte da função Baixo, isto é, onde o grau de pertinência é maior do que zero, está entre 0,15 e 0,55 p.u., e o Suporte da função Alto está entre 0,55 a 0,95 p.u. O formato da função sino permite que haja uma contribuição bem pequena do  $EC$  Baixo e Alto na função Médio. O resultado disso é que, em regime permanente do aerogerador, onde a tensão CC está estável em 1 p.u., o supercapacitor carrega ou descarrega de forma suave e lenta até atingir o valor referência de  $EC$ , que é de 55%. Tal efeito não é possível de atingir com a função

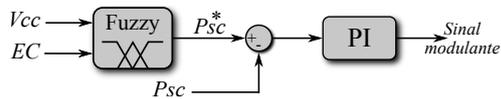


Figura 5. Diagrama da malha de controle baseado em lógica Fuzzy.

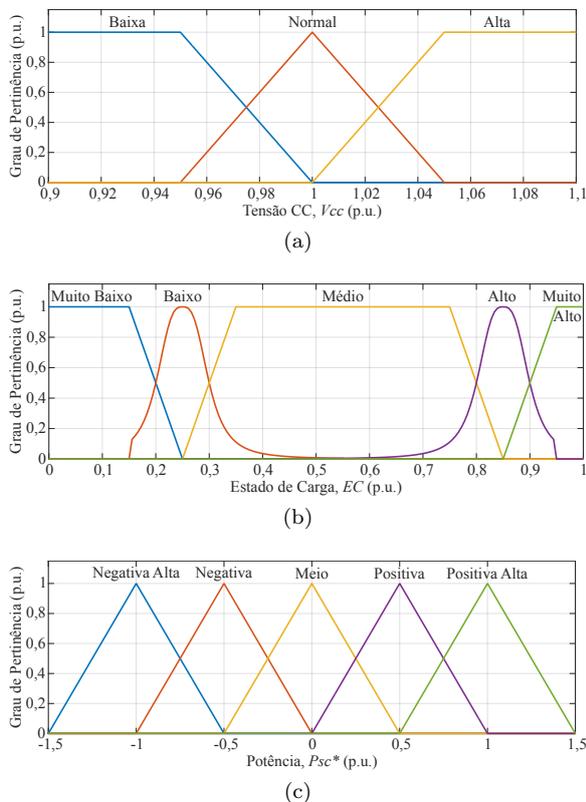


Figura 6. Funções de pertinência da lógica Fuzzy: (a) tensão do elo cc; (b) estado de carga; e (c) referência de potência do supercapacitor.

de pertinência triangular, pois a mesma possuiria grande contribuição dentro da função Médio.

A Figura 6(c) apresenta as cinco funções de pertinência da saída do Fuzzy. Embora o universo de discurso esteja entre -1,5 e 1,5 p.u., a saída do Fuzzy não ultrapassa os centros dos triângulos das extremidades, isto é, -1 e 1 p.u. Isso fica evidente na Figura 7, a qual apresenta a superfície que relaciona as entradas (eixo  $x$  e  $y$ ) e a saída do Fuzzy (eixo  $z$ ). Verifica-se nessa superfície que  $P_{sc}^*$  não possui valores menores do que -1 e maiores do que 1 p.u., como mencionado anteriormente.

A Tabela 1 apresenta as regras que relacionam as funções de pertinência ativadas das entradas e as funções ativadas da saída. As siglas NA, N, M, P, PA representam as funções de pertinência Negativa Alta, Negativa, Meio, Positiva e Positiva Alta, respectivamente. Neste sistema Fuzzy, foi utilizado o método de Mamdani para implicação e a função máximo para agregação dos conjuntos Fuzzy de saída. Para representar a lógica "e" e a "ou", foram utilizadas as funções mínimo e máximo, respectivamente. Para realizar a desfuzzificação, isto é, gerar a resposta numérica de

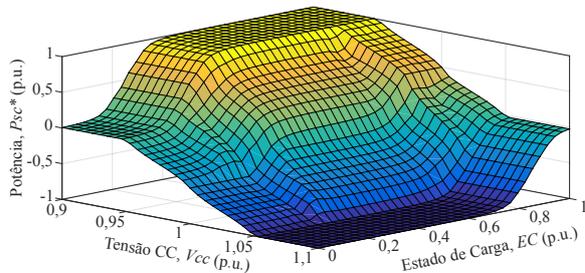


Figura 7. Superfície do sistema Fuzzy que relaciona as entradas à saída.

Tabela 1. Regras do Sistema Fuzzy.

Vcc \ EC	EC				
	M. Baixo	Baixo	Médio	Alto	M. Alto
Baixa	M	P	PA	PA	PA
Normal	N	N	M	P	P
Alta	NA	NA	NA	N	M

saída do sistema Fuzzy, foi utilizado o método do cálculo do centro de área.

Vale salientar que, embora o projeto tenha sido realizado no MATLAB<sup>®</sup> R2015a, o sistema Fuzzy aqui apresentado foi implementado em linguagem C para aplicação em tempo real no equipamento RTDS<sup>®</sup>. Tal equipamento permite a implementação de novos componentes elétricos e lógicas de controle em linguagem C para simulação em tempo real. No Fuzzy implementado no RTDS<sup>®</sup>, as funções de pertinência da saída foram construídas com 91 pontos cada. A definição dessa quantidade de pontos proporcionou uma precisão satisfatória da resposta do controle Fuzzy e um esforço computacional consideravelmente menor do que no caso padrão do MATLAB com 181 pontos. É importante comentar também que o Fuzzy exigiu um esforço computacional razoavelmente maior do que no caso do controle baseado em PI.

## 4 Metodologia das Simulações

As técnicas de controle do supercapacitor são analisadas e comparadas com base na sua habilidade de proteger o elo CC, mantendo a tensão o mais estável possível, e de suavizar a potência de saída do aerogerador de forma que a rede seja menos afetada. Para analisar a suavização de potência do aerogerador, um degrau de vento de 8 para 12 m/s é aplicado na turbina. Tal degrau de vento faz o controle de MPPT atuar e provocar variações na tensão do elo CC e, conseqüentemente, causar um severo degrau de potência na rede. Portanto, nesse caso, o supercapacitor deve evitar a variação de  $V_{cc}$  e, conseqüentemente, suavizar o desvio da potência de saída do CLR.

Para testar e comparar os métodos de controle para a proteção do elo CC, é utilizada uma curva de afundamento de tensão típica requisitada pelos operadores da rede. A Figura 8 apresenta a curva típica de afundamento de tensão da rede,

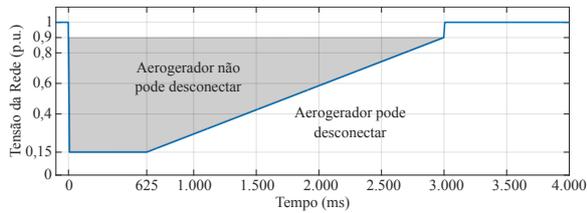


Figura 8. Curva típica do requisito de LVRT.

também conhecida em inglês como curva de *Low Voltage Ride Through* (LVRT). É possível verificar que, enquanto a tensão estiver na área destacada em cinza, o aerogerador deve manter-se conectado ao SEP, e contribuir para estabilidade do sistema. Porém, se a tensão ultrapassar a área em cinza, o aerogerador pode ser desconectado do SEP (Strezoski and Prica, 2017).

Para simular essa condição de afundamento de tensão na rede, é aplicado um curto-circuito trifásico no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) da unidade eólica, isto é, na barra 671 do sistema de distribuição. Para representar a curva da Figura 8 de forma simplificada, é aplicada uma falta trifásica com duração de 1 segundo e tensão residual de 0,15 p.u. Tal condição de falta adotada representa o caso um pouco mais conservador do que o exigido na curva da Figura 8.

Nas simulações, são comparadas as duas técnicas propostas de controle do supercapacitor, bem como o caso da topologia tradicional do aerogerador, onde não é utilizado o supercapacitor e a proteção do elo CC é realizada por meio da resistência. As simulações dos dois distúrbios (o degrau de vento e o curto-circuito) foram realizadas via o *software* de simulação RSCAD, o qual é capaz de interagir com o equipamento de simulação em tempo real, o RTDS<sup>®</sup>. O passo de integração utilizado nas simulações foi de 90 microssegundos.

## 5 Simulações e Resultados

Os resultados da simulação do primeiro evento, isto é, o degrau de velocidade do vento de 8 m/s para 12 m/s, são apresentados na Figura 9. A mudança do vento ocorreu em 1,2 segundo e causou abruptas variações na potência do gerador, como apresentado na Figura 9(a). As variações bruscas da potência do gerador refletiram na tensão do elo CC, a qual foi melhor controlada pelo controlador Fuzzy, como apresentado na Figura 9(b). Nota-se que a curva da potência enviada à rede, apresentada na Figura 9(c), foi mais suavizada no caso do controle Fuzzy. O efeito da suavização resultou em melhor perfil de tensão, onde foi consideravelmente reduzida a amplitude dos transitórios, como observado na Figura 9(d). O estado de carga do supercapacitor durante o distúrbio é apresentado na Figura 9(e).

A Tabela 2 apresenta os indicadores numéri-

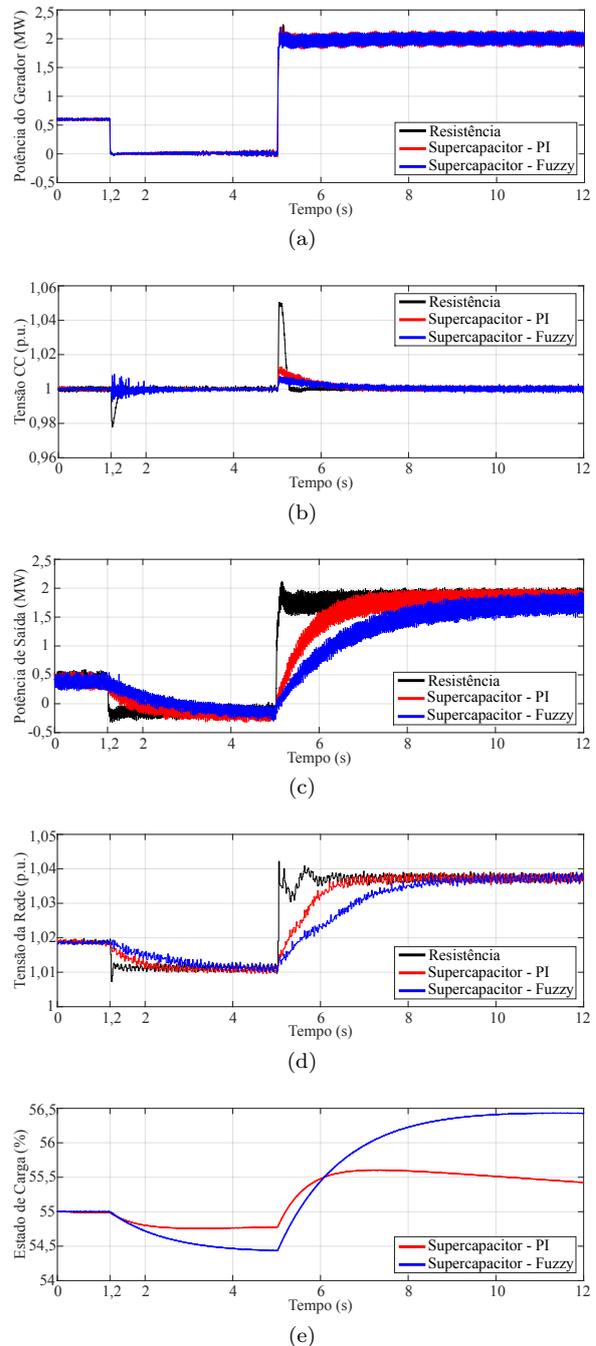


Figura 9. Resposta do aerogerador, do supercapacitor e da rede para o degrau de vento: (a) potência do gerador; (b)  $V_{cc}$ ; (c) potência de saída do aerogerador; (d) tensão na fase B da barra 671; e (e)  $EC$  do supercapacitor.

cos das curvas de potência de saída da unidade eólica representadas na Figura 9(c). Nessa tabela são apresentados os valores de máximo, mínimo, média e variância da curva de potência. Adicionalmente, é apresentado o indicador “Variação Máx.”, o qual indica a maior variação entre dois pontos subsequentes da curva de potência. Verifica-se que o controlador Fuzzy, com exceção da média, proporcionou os melhores resultados na suavização de potência, ou seja: menor valor máximo; maior valor mínimo; menor variação máxima; e menor variância. Embora a média de potência foi redu-

Tabela 2. Indicadores das Curvas de Potência de Saída do Aerogerador para o Degrau da Velocidade do Vento

Potência (MW)	Sem SAE	PI	Fuzzy
Máximo	2,1249	2,0211	1,9341
Mínimo	-0,3304	-0,3240	-0,3037
Média	1,0262	0,9498	0,8312
Variação Máx.	0,3038	0,2817	0,2767
Variância	0,7934	0,7274	0,5205

Tabela 3. Indicadores das Curvas de Tensão da Barra 671 na Fase B para o Degrau da Velocidade do Vento

Tensão	Sem SAE	PI	Fuzzy
Máximo (p.u.)	1,0421	1,0390	1,0390
Mínimo (p.u.)	1,0073	1,0096	1,0101
Média (p.u.)	1,0271	1,0260	1,0249
Variação Máx. (p.u.)	0,0231	0,0033	0,0030
Variância $\times 10^3$ (%)	0,1471	0,1337	0,1082

zida, representando menor energia enviada à rede, o supercapacitor apresentou maior nível do estado de carga no final da simulação, como apresentado na Figura 9(e).

A Tabela 3 apresenta os indicadores numéricos das curvas de tensão da barra 671 representadas na Figura 9(d). É possível notar nos indicadores que os valores de tensão para os casos com supercapacitor apresentaram menor nível máximo e maior nível mínimo, contribuindo para a prevenção de elevação e afundamento de tensão, respectivamente. A variação máxima de tensão também foi atenuada, indicando a redução da amplitude dos transitórios. Adicionalmente, as técnicas de controle do supercapacitor reduziram o valor da variância, indicando menor flutuação de tensão e efeito *flicker*.

Na tensão, o ideal é que os indicadores máximo e mínimo sejam o mais próximo possível um do outro, que a média seja o mais próximo de 1 p.u., e que a variação máxima e a variância sejam zero. Esses valores representam um sinal de tensão ideal em 1 p.u. sem variação alguma. Portanto, quanto mais a tensão se aproximar desses valores ideais, melhor será o perfil de tensão obtido pela suavização de potência. Nesse caso, é possível verificar que os melhores indicadores foram obtidos no caso em que o SAE é controlado pela lógica Fuzzy.

Os resultados da simulação do segundo distúrbio, isto é, a falta trifásica com duração de 1000 ms na barra 671 e com tensão residual de 0,15 p.u., são apresentados na Figura 10. A falta teve início em 0,3 segundo e término em 1,3 segundo, e, durante todo o curto-circuito, a velocidade do vento na turbina foi mantida em 12 m/s (velocidade nominal). É possível observar na Figura 10(a) que, nos casos que utilizaram o SAE, não houve oscilação da potência no gerador, contribuindo positivamente para a estabilidade da máquina. Na

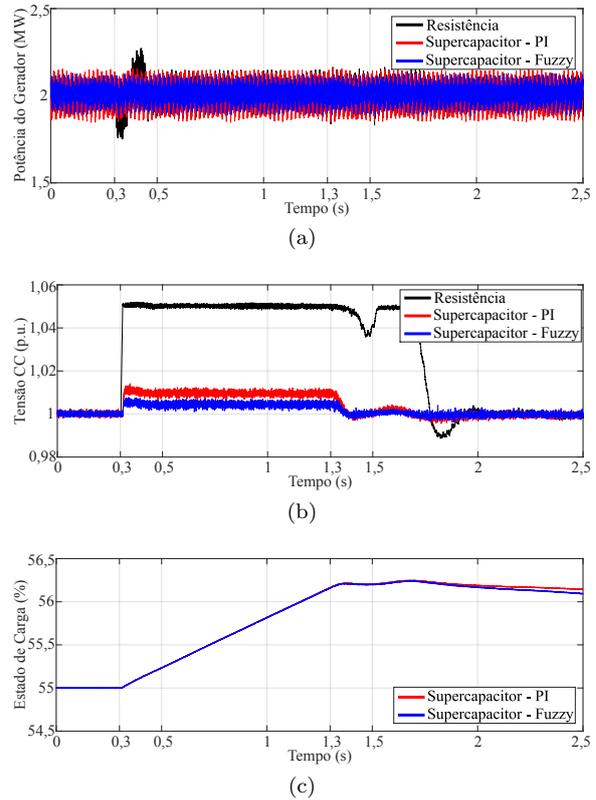


Figura 10. Resposta do aerogerador e do supercapacitor para uma falta trifásica de 1000 ms na barra 671 com tensão residual de 0,15 p.u.: (a) potência do gerador; (b)  $V_{cc}$ ; e (c)  $EC$  do supercapacitor.

Figura 10(b), verifica-se que todas as técnicas conseguiram proteger o elo CC contra elevação de tensão (isto é, manter abaixo de 1,1 p.u.). Contudo, o método com o supercapacitor controlado pela lógica Fuzzy foi o que manteve o nível de  $V_{cc}$  mais estável e próximo de 1 p.u. O estado de carga do SAE é apresentado na Figura 10(c), onde é evidenciado que ambos métodos de controle, após absorver a potência excedente resultante da perturbação, começaram a retornar lentamente para o valor referência do  $EC$  de 55%.

## 6 Conclusões

Este trabalho apresenta duas técnicas de controle do supercapacitor para manter o nível de tensão do elo CC do conversor *back-to-back* do aerogerador dentro dos níveis adequados durante distúrbios. As técnicas são avaliadas e comparadas com base nas simulações da resposta do aerogerador frente à diferentes perturbações.

De modo geral, verificou-se que a utilização do supercapacitor possibilitou aperfeiçoar a proteção do elo CC e contribuir para uma considerável redução nas variações de potência enviada à rede pelo aerogerador. Com a melhor proteção do elo CC, é possível manter o aerogerador conectado à rede por mais tempo durante os distúrbios e melhorar a resposta transitória do mesmo.

Como consequência da suavização de potência, foi possível reduzir as variações de tensão na rede e contribuir para a qualidade da energia elétrica do sistema.

Dentre as técnicas de controle do supercapacitor apresentadas, a técnica baseada no Fuzzy apresentou os resultados mais satisfatórios, como foi possível verificar nas curvas e nos indicadores numéricos. Não obstante, para aperfeiçoar ainda mais o controlador Fuzzy, diferentes configurações de funções de pertinência podem ser testadas.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2017/16742-7, pelo financiamento desta pesquisa, bem como ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) da EESC - USP pelo apoio e infraestrutura fornecida.

### References

- Abbey, C. and Joos, G. (2007). Supercapacitor energy storage for wind energy applications, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **43**(3): 769–776.
- Ackermann, T. (ed.) (2012). *Wind Power in Power Systems*, 2nd edition edn, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, United Kingdom.
- Barton, J. P. and Infield, D. G. (2004). Energy storage and its use with intermittent renewable energy, *IEEE Trans. Energy Convers.* **19**(2): 441–448.
- Cardenas, R., Pena, R., Asher, G. and Clare, J. (2001). Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **48**(3): 625–635.
- Cavalcanti, J. H. F., Cavalcanti, M. T., Souto, C. R. and de Melo, H. (2012). *Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias*, João Pessoa - PB.
- Farhadi, M. and Mohammed, O. (2016). Energy storage technologies for high-power applications, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **52**(3): 1953–1961.
- Kersting, W. H. (1991). Radial distribution test feeders, *IEEE Trans. on Power Syst.* **6**(3): 975–985.
- Li, W., Joos, G. and Belanger, J. (2010). Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **57**(4): 1137–1145.
- Ma, Y., Cao, W., Yang, L., Wang, F. . and Tolbert, L. M. (2017). Virtual synchronous generator control of full converter wind turbines with short-term energy storage, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **64**(11): 8821–8831.
- Mandic, G., Nasiri, A., Ghotbi, E. and Muljadi, E. (2013). Lithium-ion capacitor energy storage integrated with variable speed wind turbines for power smoothing, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* **1**(4): 287–295.
- Nasiri, M., Milimonfared, J. and Fathi, S. (2014). Modeling, analysis and comparison of tsr and otc methods for mppt and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines, *Energy Conversion and Management* **86**(Supplement C): 892 – 900.
- Novakovic, B., Pashaie, R. and Nasiri, A. (2014). Neural network based energy storage control for wind farms, *2014 IEEE Symp. Power Electron. and Machines for Wind and Water Appl.*, pp. 1–6.
- Quèval, L. and Ohsaki, H. (2012). Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines, *2012 Int. Conf. Renewable Energy Research and Appl. (ICRERA)*, pp. 1–6.
- Sartika, L., Rosyadi, M., Umemura, A., Takahashi, R. and Tamura, J. (2016). Stabilization of pmsg based wind turbine under network disturbance by using new buck controller system for dc-link protection, *5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016*, pp. 1–5.
- Strezoski, L. V. and Prica, M. D. (2017). Short-circuit analysis in large-scale distribution systems with high penetration of distributed generators, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica* **4**(2): 243–251.
- Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S. and Narimani, M. (2015). High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies, *Proc. IEEE* **103**(5): 740–788.