



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

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

GRUPO -GDS

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS

AValiação DOS REQUISITOS DE LOW VOLTAGE RIDE-THROUGH DAS REDES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Luiz Felipe W. Souza (*)
CEPEL

Tatiana M. L. Assis
UFRJ

Igor F. Visconti
CEPEL

RESUMO

Os requisitos de Low Voltage Ride-Through (LVRT) dos geradores eólicos são discutidos e avaliados do ponto de vista das necessidades do sistema elétrico de potência. O informe técnico faz uma breve revisão das tecnologias de geração eólica e dos requisitos de ride-through em diversos locais do mundo. Depois discute duas técnicas de análise dos requisitos de LVRT: superposição de áreas de vulnerabilidade, usando ferramentas de análise de curto – circuito; avaliação dos perfis de tensão, usando ferramentas de análise de estabilidade eletromecânica.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Eólica, Afundamentos de Tensão, Requisitos de Low Voltage Ride-Through

1.0 - INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, afundamentos de tensão têm sido um problema para consumidores finais de energia elétrica, em especial clientes industriais com cargas sensíveis que utilizam processos automatizados (1). Nos últimos anos, com o aumento significativo da geração de energia eólica em todo o mundo, esse cenário vem mudando, pois os aerogeradores são sensíveis a afundamentos de tensão. Com um alto percentual de geração eólica conectada ao sistema, uma queda de tensão pode acarretar no desligamento de um montante significativo de geração, resultando em problemas de estabilidade que podem comprometer a confiabilidade do sistema. Em outras palavras, os afundamentos de tensão agora podem causar “paradas de produção” do sistema elétrico, tendo impacto direto em concessionárias e operadores.

Com o objetivo de lidar com esse problema, operadores de diversos sistemas ao redor do mundo têm publicado procedimentos técnicos com requisitos de low voltage ride-through (“sobrevivência” a afundamentos de tensão) (2) (3). Os requisitos de ride-through, normalmente expressos por uma curva “tensão x tempo”, indicam o grau de suportabilidade exigido aos aerogeradores na presença de um afundamento da tensão no sistema. Tais requisitos refletem uma necessidade do sistema elétrico de potência e servem para evitar ou minimizar problemas causados pela perda de geração eólica.

Um levantamento dos requisitos de ride-through em diferentes países mostra que geradores deverão permanecer conectados ao sistema mesmo quando severos afundamentos de tensão forem observados (e. g., 10% ou menos). Deve-se ressaltar que as soluções para ride-through encarecem os aerogeradores. Muitos pesquisadores têm se dedicado à modelagem detalhada dos geradores eólicos para estudar seu comportamento na presença de afundamentos de tensão e indicar possíveis melhorias no seu projeto. Por outro lado, poucos trabalhos investigam os critérios utilizados pelos operadores para estabelecer esses requisitos de suportabilidade (ride-through).

O objetivo deste informe técnico é discutir métodos e critérios para a avaliação dos requisitos de ride-through do sistema elétrico. O informe se baseia na hipótese de que o problema a ser evitado é a perda simultânea de diversas usinas eólicas quando da ocorrência de afundamentos de tensão severos. Assim, duas condições devem ocorrer: um evento na rede elétrica causa afundamentos de tensão significativos em diversas subestações simultaneamente; os afundamentos causam paradas de um número de aerogeradores que levam a problemas de estabilidade no sistema. O problema é investigado usando duas diferentes abordagens: a análise do comportamento dos afundamentos de tensão no sistema elétrico e a análise do impacto dos afundamentos em sistema com geradores eólicos.

Os estudos do comportamento dos afundamentos de tensão são realizados através de uma ferramenta de análise de curto-circuito em regime permanente (ANAFAS). A avaliação da área de vulnerabilidade (1), obtida através de simulações sistemáticas de curto-circuito, é estendida para várias subestações, obtendo-se uma superposição de áreas de vulnerabilidade. Dessa forma, pode-se identificar como as regiões são afetadas simultaneamente por afundamentos de tensão, descartando-se, por exemplo, afundamentos de impacto localizado em poucas barras.

Uma ferramenta de simulação dinâmica (ANATEM) é usada para analisar o impacto das quedas de tensão na estabilidade eletromecânica do sistema contendo um alto grau de penetração de fazendas eólicas. As estratégias adotadas são: realizar simulações para diferentes cenários; aplicar eventos cujo impacto seja sentido em diversas subestações da rede, como identificado nas simulações de curto-circuito de regime permanente; analisar perfis de tensões resultantes; verificar o comportamento do sistema para as mesmas simulações, considerando desligamento das usinas eólicas. Todas as simulações são realizadas para o Sistema Interligado Nacional (SIN), considerando a modelagem detalhada dos dispositivos de controle e representação da dinâmica das cargas.

2.0 - TECNOLOGIAS DAS TURBINAS EÓLICAS: UMA BREVE REVISÃO

Existem diferentes tipos de turbinas eólicas, com diversas filosofias de controle, formas de operação e conexão à rede elétrica. De uma maneira mais geral, tais turbinas são classificadas em dispositivos de velocidade fixa ou variável.

As turbinas de velocidade fixa utilizam geradores de indução (gaiola de esquilo) diretamente conectados à rede elétrica. Esta tecnologia apresenta vantagens, destacando-se a simplicidade, a robustez mecânica, o custo e a facilidade de operação. Por outro lado, as turbinas de velocidade fixa perdem na flexibilidade do controle.

As turbinas de velocidade variável utilizam máquinas síncronas ou assíncronas conectadas à rede elétrica através de conversores eletrônicos. Várias vantagens desse tipo de gerador podem ser citadas quando comparados aos de velocidade fixa, tais como a redução no estresse mecânico, a melhoria da qualidade de energia e o aumento da eficiência do sistema como um todo. Tais benefícios são alcançados com um maior custo por MW instalado.

Os geradores eólicos de velocidade variável que utilizam máquinas síncronas são usualmente conectados à rede através de um retificador e um conversor do tipo fonte de tensão (VSC – *Voltage Source Converter*), utilizando controle PWM (*Pulse-Width Modulation*). O campo do gerador síncrono (rotor) pode ser proveniente de um enrolamento CC ou de ímãs permanentes.

Dentre as máquinas de velocidade variável de maior aplicação, está o gerador de indução de dupla alimentação (DFIG – *Dubly-Fed Induction Generators*), ilustrado na Figura 1. Neste tipo de tecnologia, o estator é ligado diretamente à rede, como em uma máquina de indução convencional. Por outro lado, o rotor é composto por um enrolamento trifásico conectado à rede através de um conversor *back-to-back* com controle PWM, que opera com chaveamento de IGBTs a alta frequência. Os estudos de estabilidade transitória apresentados neste trabalho foram obtidos para usinas eólicas de velocidade variável equipadas com DFIGs.

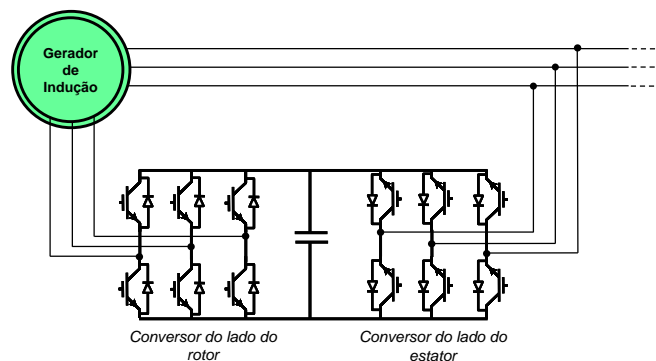


FIGURA 1 – Gerador de indução de dupla alimentação (DFIG)

As diversas tecnologias utilizadas na operação de usinas eólicas são afetadas de formas diferentes pelos afundamentos de tensão. As soluções para melhoria da capacidade de LVRT, em geral encarecem as turbinas. As diferentes tecnologias requerem diferentes soluções para melhorar a sua capacidade de LVRT (4):

- Geradores de Indução Diretamente Conectados: durante um afundamento de tensão, a potência elétrica na saída da máquina diminui. Como o controle do ângulo das pás da turbina eólica é relativamente lento, a potência mecânica (função do vento) não muda instantaneamente. Assim, o desbalanço entre a potência elétrica e a mecânica provoca uma aceleração do rotor e a máquina precisa ser desconectada. Dentre as soluções para melhorar a capacidade de LVRT deste tipo de turbina, estão o aumento da inércia da máquina e o uso de dispositivos para o suporte transitório da tensão terminal, tais como os compensadores estáticos de reativos (SVC – *Static Voltage Compensator*).
- Geradores Síncronos de Velocidade Variável: durante um afundamento de tensão, embora o conversor seja capaz de manter o controle da máquina, surge uma sobretensão no capacitor CC, que pode provocar o desligamento do gerador. As soluções para melhorar a capacidade de LVRT deste tipo de turbina incluem o uso de circuitos de eletrônica de potência para atenuar a tensão no capacitor ou a adoção de algum tipo de tecnologia de armazenamento de energia.
- Gerador de Indução de Velocidade Variável: durante um afundamento de tensão, as correntes que circulam no rotor e no conversor podem atingir valores inadmissíveis. Um circuito de *crowbar* (4) pode ser empregado para melhorar a capacidade de LVRT.

3.0 - REQUISITOS DE LVRT E OS CÓDIGOS DE REDE

3.1 A Curva de Low Voltage Ride-Through

O aumento da penetração de geração eólica nos sistemas elétricos trouxe preocupação em relação à filosofia de desligamento dos geradores na presença de afundamentos de tensão. Uma vez que o montante de geração desconectado pode ser alto, cenários de instabilidade podem ocorrer, colocando em risco a integridade de todo o sistema. Neste sentido, os códigos de rede de vários países no mundo foram modificados com o objetivo de prevenir tal problema e garantir a segurança do sistema. Assim, entre os requisitos atualmente incorporados aos códigos de rede, está a capacidade dos geradores eólicos de suportar afundamentos de tensão provocados por curtos-circuitos na rede elétrica. Tal requisito é conhecido como “*low voltage ride-through*” (LVRT) e é caracterizado por uma curva **tensão x tempo**. A Figura 2 mostra uma curva típica de LVRT, onde estão destacadas as características mais relevantes.

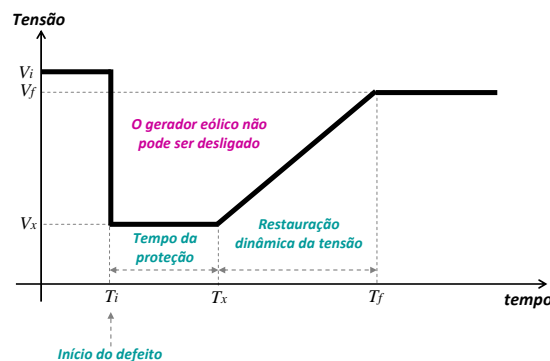


FIGURA 2 – Curva típica de LVRT

Na curva de LVRT, o eixo vertical indica a tensão terminal do gerador eólico, e o eixo horizontal mostra o tempo, considerando que o início do evento ocorre em $t = T_i$. Para atender aos requisitos de LVRT, o gerador não pode ser desconectado da rede se o perfil da tensão terminal estiver acima da curva-limite. Caso a tensão caia abaixo da curva-limite, o desligamento do gerador é permitido.

As tensões V_i , V_f and V_x (Figura 2) indicam, respectivamente, a tensão pré-falta, a tensão pós-falta e o valor mínimo da tensão durante o defeito. Com auxílio de um programa para cálculo de curto-circuito em regime permanente, o valor de V_x pode ser estimado para diferentes tipos de defeitos em diferentes pontos do sistema. A Figura 2 indica também dois períodos importantes após o início do defeito: tempo de duração da falta, que depende fundamentalmente do tempo de atuação do sistema de proteção, e tempo de recuperação dinâmica da tensão, que depende dos dispositivos de controle de tensão e da dinâmica do sistema de potência. Após a eliminação do defeito, a recuperação dinâmica da tensão em cada barra do sistema pode ser estudada com auxílio de uma ferramenta de simulação no domínio do tempo.

3.2 Códigos de Rede e os Requisitos de LVRT

Os requisitos mínimos de LVRT foram primeiramente estabelecidos na Alemanha (5) e, mais tarde, outros países adotaram regras semelhantes. A Figura 3 ilustra algumas características de diferentes países do globo (6) (7).

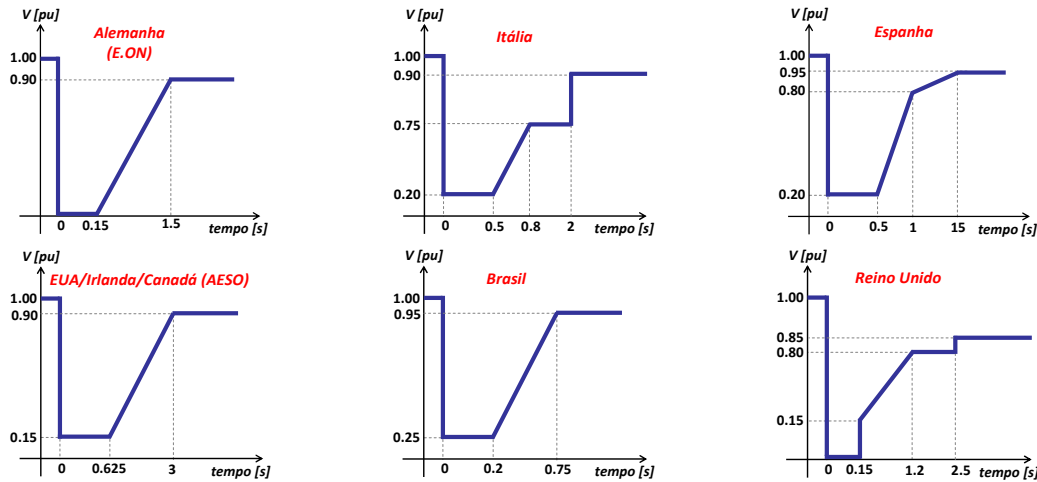
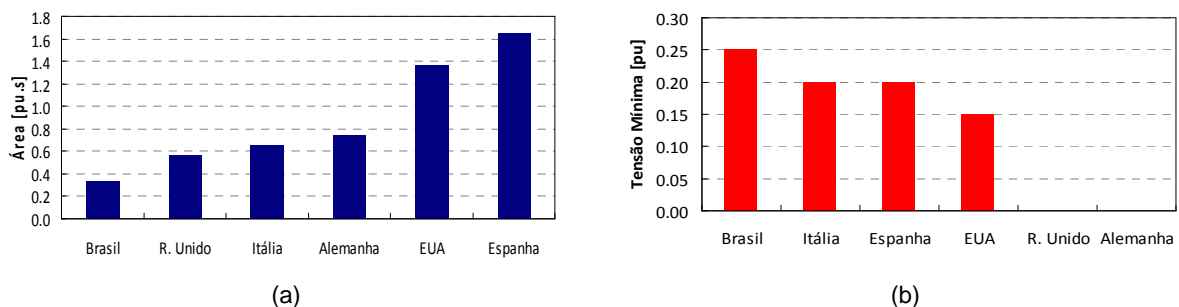


FIGURA 3 – Requisitos de LVRT em diferentes países

A Alemanha e o Reino Unido aplicam restrições severas no que diz respeito ao valor mínimo de tensão que deve ser tolerado durante o defeito (tensão nula). Os EUA, a Irlanda, o Canadá, a Espanha e a Itália são mais rígidos em relação ao tempo de atuação da proteção. A variedade de curvas observadas dificulta uma comparação global entre os requisitos adotados nos diferentes países. O gráfico da Figura 4a compara a área acima de cada curva de LVRT, em pu.s. Esse valor fornece uma medida aproximada da composição dos requisitos de tensão mínima, do tempo de proteção e do perfil dinâmico de restauração. A Figura 4b compara os valores de tensão mínima. Em cada gráfico da Figura 4, os países foram ordenados por severidade no requisito de LVRT, de acordo com os índices propostos (área e tensão mínima).



(a) (b)
FIGURA 4 – Medidas de severidade dos requisitos de LVRT

Conforme já apontado por Piwko et al. (5), é difícil imaginar a ocorrência de um único evento no sistema que provoque um perfil de tensão similar aos indicados pelas curvas de LVRT. De fato, as curvas de LVRT são envelopes que contemplam uma família de eventos passíveis de ocorrerem no sistema e para os quais o gerador eólico deve permanecer conectado à rede elétrica.

4.0 - AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

4.1 Área de Vulnerabilidade

O conceito de área de vulnerabilidade é largamente adotado em estudos de qualidade de energia para estimar a sensibilidade de cargas em face de afundamentos de tensão (1). Curtos-circuitos deslizantes são aplicados sistematicamente na rede e as tensões residuais resultantes são calculadas em determinadas subestações de interesse. Os resultados irão mostrar áreas da rede nas quais determinados curtos-circuitos causarão quedas de tensão abaixo de um limite pré-estabelecido na subestação de interesse.

Um exemplo é mostrado na Figura 5a. Cinco diferentes locais foram escolhidos para ter grandes usinas eólicas: Delmiro Gouveia 230 kV, Delmiro Gouveia 69 kV, Bongoi 230 kV, Rio Largo 230 kV and Jacaracanga 230 kV. O

cálculo automático de curtos-circuitos deslizantes foi feito com auxílio do programa ANAFAS. A Figura 5b mostra resultados obtidos para as áreas de vulnerabilidade da rede de 500 kV, considerando faltas trifásicas.

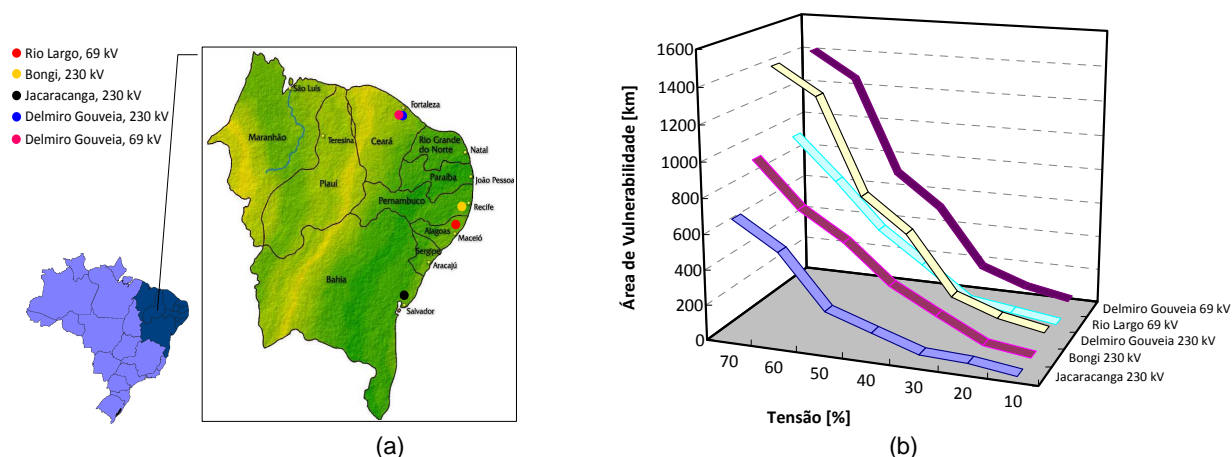


FIGURA 5 - (a) Pontos monitorados; (b) Área de vulnerabilidade para curtos-circuitos aplicados na rede de 500kV

A área de vulnerabilidade provê informações interessantes sobre afundamentos de tensão no sistema. Uma turbina eólica que deve suportar uma tensão mínima de 0,2 p.u. sem se desconectar da rede estará exposta em 35 km de linhas de transmissão de 500 kV em Jacaracanga, nos quais um curto-circuito causará afundamentos inferiores a 20%. Em Delmiro Gouveia, a mesma turbina eólica estará exposta em uma área duas vezes maior que a primeira área. Assim sendo, dependendo do padrão de afundamentos de tensão da subestação à qual está conectada, uma turbina eólica que siga os mesmos requisitos de LVRT será desligada um número diferente de vezes da rede.

Áreas de vulnerabilidade apresentam uma boa visão do valor esperado de afundamentos de tensão numa subestação. Entretanto, não são muito úteis para determinar o impacto de um curto-circuito em diferentes subestações e no sistema como um todo.

4.2 Superposição de áreas de vulnerabilidade: como afundamentos de tensão se espalham pela rede

Uma extensão do conceito de área de vulnerabilidade pode ajudar a entender como um curto-circuito pode simultaneamente impactar turbinas eólicas em diferentes subestações da rede. Curtos-circuitos deslizantes são aplicados na rede, mas agora as tensões são monitoradas simultaneamente em duas ou mais subestações. A superposição de áreas de vulnerabilidade permite entender como afundamentos de tensão se propagam pela rede. A Figura 6a mostra um mapa com parte da superposição de áreas de vulnerabilidade das subestações de Rio Largo e Jacaracanga, para afundamentos com tensões de 0,7 p.u. e 0,5 p.u.

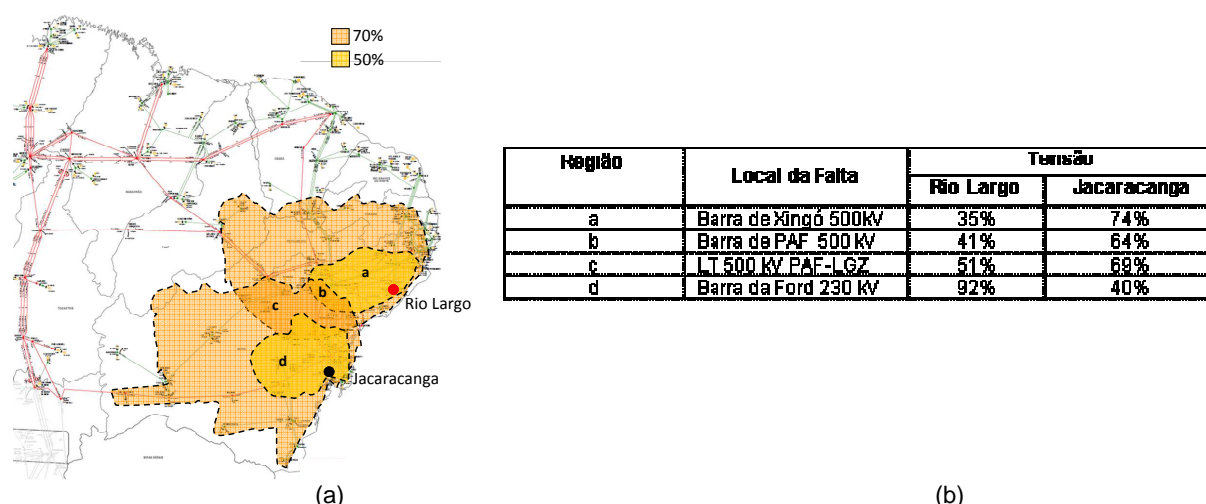


FIGURA 6: (a) Superposição de áreas de vulnerabilidade; (b) Tensões residuais mínimas em duas subestações

O mapa mostra, por exemplo, que não há nenhuma falta que cause simultaneamente um afundamento abaixo de 0,5 p.u. em Rio Largo e Jacaracanga. Como a maior preocupação é a perda de um grande bloco de geração eólica durante um afundamento de tensão, a técnica de superposição de áreas de vulnerabilidade pode ser muito útil em determinar os requisitos de LVRT. Uma vez definido o número máximo de turbinas eólicas que pode se desconectar da rede, determinam-se os patamares de afundamentos de tensão que podem ocorrer

simultaneamente nestas subestações. O valor das tensões residuais destes afundamentos simultâneos vai definir o limite V_z da curva LVRT. A Figura 6b apresenta o nível de tensão em Rio Largo e Jacaracanga, considerando faltas originadas em quatro regiões diferentes da área de vulnerabilidade superposta da Figura 6 (a, b, c, d).

4.3 Afundamentos de tensão na prática

Medições de qualidade de energia podem auxiliar a identificar os níveis de tensão mínimos e a duração de afundamentos de tensão registrados em uma dada subestação. A Figura 7a mostra a curva de Tensão Residual x Duração para uma barra de 69 kV do SIN. A Figura 7b mostra a mesma curva para uma barra de 230 kV. Estes valores isolados não são tão importantes quanto o modo como estes afundamentos se propagam ao longo do sistema – um procedimento similar ao da superposição de áreas de vulnerabilidade pode ser adotado para processamento de dados medidos.

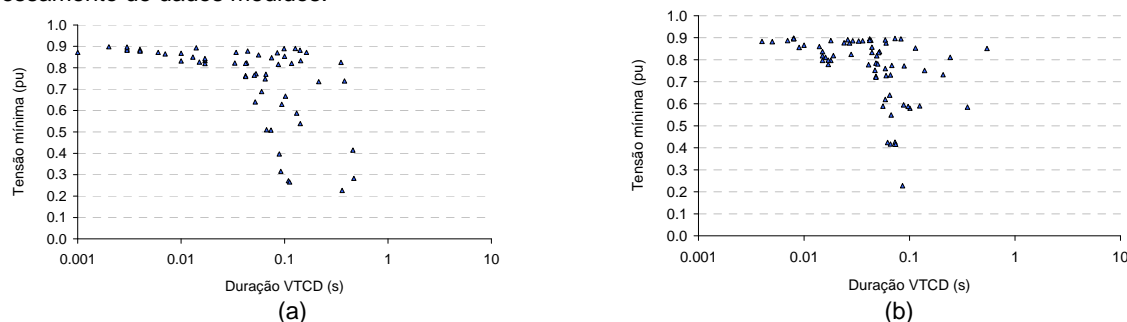


FIGURA 7– Afundamentos de tensão registrados em duas subestações ao longo de um ano: (a) 69 kV; (b) 230 kV

5.0 - INFLUÊNCIA DA PROTEÇÃO NAS CURVAS DE LVRT

Em geral, quanto maior for o nível de tensão, menor será o tempo de atuação da proteção. Esse fato pode ser observado nos Procedimentos de Rede adotados no Brasil, que estabelecem os critérios dos estudos de planejamento. Um dos critérios refere-se ao tempo de proteção utilizado nas análises de estabilidade transitória, conforme mostra a Tabela 3 (8).

Tabela 3 – Tempo de proteção adotado nos estudos de planejamento no Brasil

Tensão Nominal [kV]	Tempo de Eliminação do Defeito [ms]
765	80
345, 440, 500 and 525	100
138 and 230	150
138	150
88 ^(*) and 138 ^(*)	450
69 ^(*)	800

^(*) Sem teleproteção

Sendo conservativo, o requisito de LVRT deve considerar o maior tempo de atuação da proteção, de forma que as usinas eólicas permaneceriam conectadas à rede mesmo na presença de curtos-circuitos em pontos de tensão mais baixa. Entretanto, a imposição de um requisito tão severo deve levar em consideração o ponto de conexão de cada usina eólica. Por exemplo, se uma falta ocorrer no sistema de 69 kV, um gerador eólico conectado à rede de 230 kV pode sofrer um afundamento de tensão com duração igual ao tempo da proteção do sistema de 69 kV. Entretanto, a magnitude do afundamento será menor. Considerar como critério para a definição das curvas de LVRT a tensão mínima ocasionada por um curto-circuito no sistema de 230 kV juntamente com o tempo de proteção utilizado no sistema de 69 kV é algo fora da realidade prática.

6.0 - AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM SISTEMAS COM GERAÇÃO EÓLICA – ESTUDO DE CASO

No estudo de estabilidade, o objetivo é definir a quantidade máxima de geradores eólicos que podem se desconectar sem ameaçar a estabilidade do sistema. Diferentemente da análise de curto-circuito, na qual é possível fazer uma avaliação sistemática do comportamento da rede através de curtos-circuitos deslizantes, a análise de estabilidade eletromecânica deve ser realizada caso a caso de forma a se identificar situações críticas. Nesse aspecto, esse estudo é bastante similar a um estudo de estabilidade convencional, realizado inúmeras vezes por engenheiros de potência: uma lista de casos é selecionada e simulada. A escolha dos casos mais críticos é feita com base na experiência operativa do analista.

O sistema deve ser modelado detalhadamente nas simulações para avaliação das necessidades de LVRT. Além dos modelos detalhados de geradores, sistemas de excitação, reguladores de velocidade, compensadores

estáticos, etc., as turbinas eólicas também devem ser incluídas na representação do sistema. Vários modelos de geradores eólicos são discutidos em (9), enquanto (10) mostra os detalhes dos modelos implementados no ANATEM. Um aspecto fundamental quando se tem interesse em analisar o perfil da tensão após curtos-circuitos é a dinâmica da carga (4). Modelos dinâmicos das cargas devem ser implantados em lugar dos modelos ZIP, ao menos nas localidades próximas às usinas eólicas sob análise (11).

No estudo a seguir, usinas eólicas de 400 MW foram conectadas às cinco subestações mostradas na Figura 5 (a). Cada usina utiliza geradores de indução de dupla alimentação (GIDA). Um curto-circuito foi aplicado na rede de 500 kV próximo a Fortaleza, seguido da abertura de duas linhas de transmissão de 500 kV. Este evento causa afundamentos severos nas usinas de Delmiro Gouveia 230 kV e 69 kV. As usinas eólicas localizadas em Rio Largo, Bongi e Jacaracanga são submetidas a afundamentos de tensão menores.

Foram consideradas três situações distintas para os requisitos de LVRT: nenhum requisito, requisito pouco rigoroso e requisito muito rigoroso. Para a situação de nenhum requisito de LVRT, as cinco usinas eólicas são automaticamente desconectadas da rede, incluindo aquelas que foram submetidas a afundamentos de tensão menores. No total, 2000 MW de geração eólica são perdidos. Para o requisito de LVRT mais rigoroso, as cinco usinas eólicas permanecem em operação após o defeito. Se o requisito pouco rigoroso é adotado, apenas as usinas em Delimor Gouveia, que sofrem afundamentos mais severos, são desligadas. Neste caso, 800 MW de geração eólica são perdidos.

A Figura 8a mostra as características de LVRT adotadas. O critério mais rigoroso é similar àquele adotado no Brasil. A figura também mostra perfis de tensão em Delmiro Gouveia 230 kV para as três situações. A Figura 8b mostra os perfis de tensão em Bongi para as três situações. Quando a usina eólica permanece conectada, a tensão praticamente não varia. Mesmo quando a turbina se desconecta, o afundamento de tensão é desprezível.

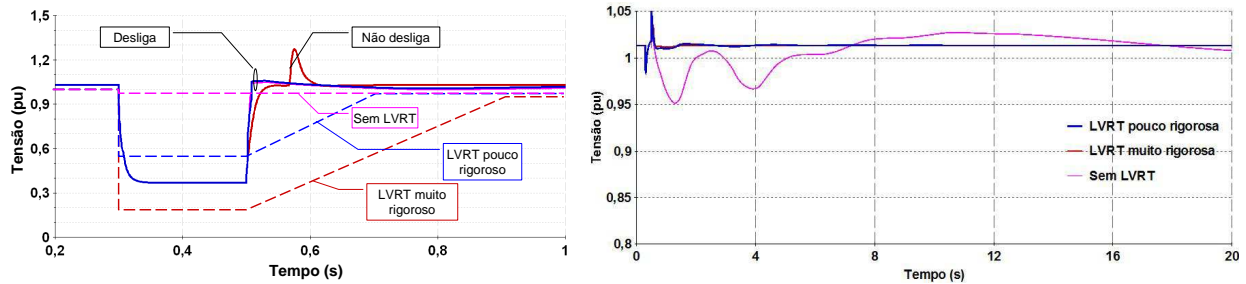


FIGURA 8 - (a) Perfis de tensão em Delmiro Gouveia 230 kV e características de LVRT consideradas; (b) Perfis de tensão em Bongi para as diferentes curvas de LVRT

O impacto do desligamento de usinas eólicas no sistema de potência pode ser avaliado nas figuras seguintes. A Figura 9a mostra o intercâmbio Norte-Nordeste para as três situações. A perda da geração eólica é compensada pelo aumento deste intercâmbio, para o caso simulado. As Figuras 9b a 9d mostram os ângulos das usinas de Xingó, Tucuruí, Itaipu e Angra, para as três situações. Enquanto para o requisito rigoroso a oscilação é desprezível, para o caso de nenhum requisito as máquinas oscilam bastante. Em ambos os casos, o sistema é estável.

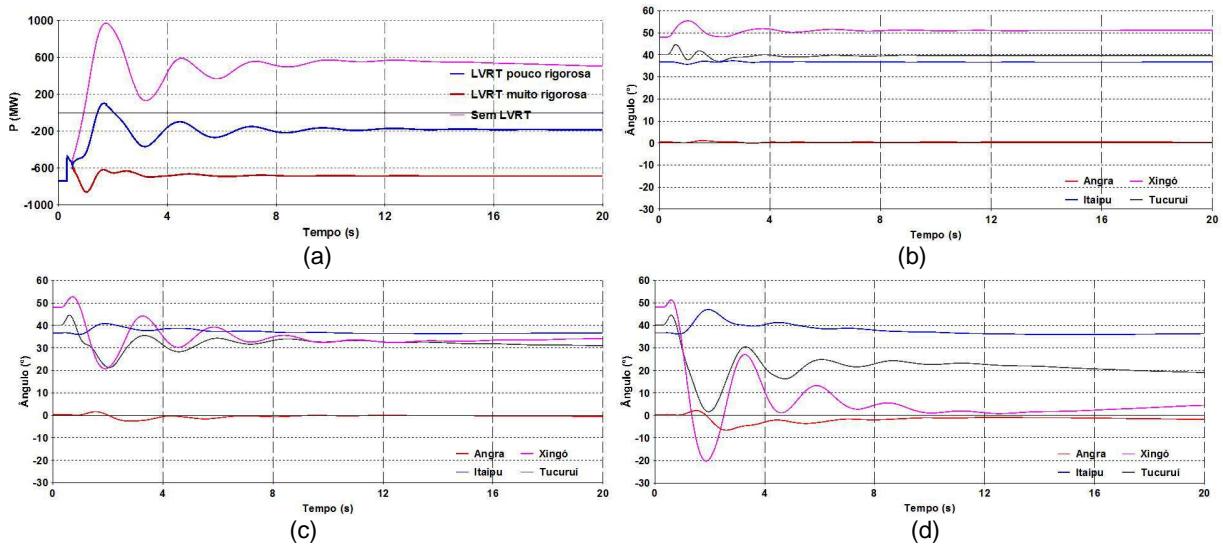


FIGURA 9 - (a) intercâmbio Norte-Nordeste para três situações de requisitos de LVRT; ângulos dos geradores das usinas de Tucuruí, Xingó, Itaipu e Angra para requisitos de LVRT (b) muito rigoroso; (c) pouco rigoroso e (d) nenhum requisito.

7.0 - CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho indicam que subestações com diferentes níveis de tensão e localizadas em diferentes regiões podem necessitar de diferentes características de LVRT das turbinas eólicas. O aspecto fundamental para a definição das necessidades de LVRT do sistema elétrico é como um afundamento de tensão irá se espalhar pela rede, uma vez que quanto maior a área afetada, maior será o número de geradores eólicos sujeitos a serem desligados da rede.

Algumas conclusões que podem subsidiar as definições de requisitos de LVRT se seguem.

- Um importante aspecto é que geradores eólicos são sensíveis a afundamentos de tensão, mas isso só se torna um problema para sistemas de potência nos quais um grande número de geradores é desconectado por afundamentos de tensão. O requisito de LVRT tem que evitar critérios desnecessariamente rigorosos.
- Através do conceito de superposição de áreas de vulnerabilidade, pode-se ver que quanto menor a tensão residual, menor a área de vulnerabilidade. Dependendo das subestações de interesse, pode ser impossível um afundamento de tensão de dada magnitude ocorrer simultaneamente em vários locais.
- Simulações de transitórios eletromecânicos ajudam a determinar o perfil de recuperação da tensão após afundamentos. As mesmas premissas adotadas para superposição de áreas de vulnerabilidade são válidas. Deve-se determinar o número de usinas desconectadas que causam problemas ao sistema. A partir desses casos, se define o perfil de tensão crítico em cada barra envolvida.
- Alguns códigos de rede adotam um valor mínimo igual a zero para a curva de LVRT. Este critério é claramente conservativo. Um afundamento de tensão igual a zero ocorre apenas para um curto franco na própria barra e não se propaga com este valor para outras barras. A menos que haja uma concentração de usinas muito grande em uma barra, não há razão para adotar um limite tão baixo.
- Um envelope de LVRT que inclua simultaneamente tempos de proteção de sistemas de tensões mais baixas e magnitudes de afundamentos oriundos de sistemas de tensão mais alta é demasiadamente conservativo. Mesmo que haja níveis de geração eólica elevados em vários níveis de tensão, o operador da rede pode definir diferentes requisitos de LVRT em diferentes níveis de tensão ou regiões do sistema.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) R.C. Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso and H.W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, Second Edition, McGraw-Hill, 2004.
- (2) I. Erlich and U. Bachmann, "Grid Code Requirements Concerning Connection and Operation of Wind Turbines in Germany", *Proceedings of the PES General Meeting*, Vol. 2, pp. 1253-1257, June 2005.
- (3) E. Fagan, S. Grimes, J. McArdle, P. Smith and M. Stronge, "Grid Code Provisions for Wind Generators in Ireland", *Proceedings of the PES General Meeting*, Vol. 2, pp. 1241-1247, June 2005.
- (4) C. Abbey, G. Joos. "Effect of low voltage ride through (LVRT) characteristic on voltage stability," *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp. 1901-1907, June 2005.
- (5) R. Piwko, N. Miller, R. T. Girard, J. MacDowell, K. Clark, A. Murdoch "Generator Fault Tolerance and Grid Codes". *IEEE Power and Energy Magazine*, pp.18-26, March/April 2010.
- (6) M. Tsili, S. Papathanassiou, "A Review of Grid Code Technical Requirements for Wind Farms". *IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, No. 3, pp. 308-332, September 2009.
- (7) ONS, "Acesso ao Sistema de Transmissão", *Procedimentos de Rede – Módulo 3*, em www.ons.org (10/jun/2010).
- (8) ONS, "Critérios de Estudo", *Procedimentos de Rede – Módulo 23*, em www.ons.org, (10/jun/2010).
- (9) N. Hatziaargyriou, M. Donnelly, S. Papathanassiou, J. A. P. Lopes, M. Takasaki, H. Chao, J. Usaola, R. Lasseter, and A. Efthymiadis, "CIGRE Technical Brochure on Modeling New Forms of Generation and Storage," CIGRE, TF 38.01.10, 2000.
- (10) R. D. Rangel, J. C. R. Ferraz, S. Gomes Jr., R. M. Henriques. "Modelagem de Geração Eólica em Programas de Fluxo de Potência e Análise de estabilidade Eletromecânica". In: *Anais do XVIII SNTPEE, IT GAT-10, Curitiba, Outubro 2005*.
- (11) I. F. Visconti, L. F. W. de Souza, J. M. S. C. Costa, N. R. Barros Sobrinho. "Estimação de Parâmetros de Modelos de Carga Dinâmicos usando Algoritmos Genéticos". In: *Anais do III SBSE, artigo SBSE2010-0166, Belém, 2010*.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Luiz Felipe Willcox de Souza, nascido em Niterói-RJ, 1972, é engenheiro eletricitista formado em 1994 pela Universidade Federal Fluminense. Obteve seu mestrado em 1998 e seu doutorado em 2007, ambos em engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica de potência, na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL desde 1996, onde atualmente é gerente de projetos. Suas principais áreas de interesse são qualidade de energia, aplicações de eletrônica de potência e dinâmica de sistemas elétricos de potência.



Tatiana Mariano Lessa de Assis nasceu no Rio de Janeiro, em 1975. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense em 1998 e obteve os títulos de mestre (2000) e doutora (2007) pela COPPE/UFRJ, ambos em Engenharia Elétrica. Entre 1998 e 2001 foi pesquisadora no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e, entre 2001 e 2003, trabalhou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), atuando nas áreas de planejamento da operação e programação diária do Sistema Interligado Nacional. Atualmente é professora da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e atua nas áreas de planejamento de sistemas interligados, dinâmica e controle de sistemas de potência e qualidade de energia.



Igor Ferreira Visconti, nascido no Rio de Janeiro em 1975, graduou-se em engenharia elétrica, com ênfase em sistemas de potência, na PUC-Rio em 2002. No mesmo ano, começou a trabalhar como Pesquisador no CEPEL, atuando em desenvolvimento de aplicativos computacionais para processamento de dados de qualidade de energia. Em 2005, terminou um curso de pós-graduação *latu-sensu* em engenharia de software na PUC-Rio e em 2010 concluiu uma pós-graduação *strictu sensu* na mesma universidade. Seu foco de atuação é implementação de métodos de inteligência computacional aplicados a problemas do setor elétrico, especialmente reconhecimento de padrões, mineração de dados e técnicas de otimização global.