

Método de Avaliação da Segurança Dinâmica com Foco na Capacidade de Sobrevivência a Afundamentos de Tensão de Aerogeradores de Indução Duplamente Excitados

D.J.A.Vieira, M.V.A. Nunes

Resumo-- Este artigo apresenta uma metodologia de avaliação da segurança dinâmica com foco na capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão de aerogeradores de indução duplamente excitados (DFIG) e nas ações preventivas baseadas em árvores de decisão (DT). A base de dados necessária às árvores de decisão é gerada a partir de históricos de operação SCADA/EMS modificados e dados simulados em programas de fluxo de carga e estabilidade transitória. As DT auxiliam na classificação da condição operacional do sistema e na orientação ao controle preventivo fornecendo as variáveis críticas e seus limites relativos à capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão do DFIG. Utilizando dado operacional topológico e as condições estimadas da rede elétrica Eletrobrás Eletronorte operado pelo EMS Centro Regional do Pará – Brasil, acrescido da rede elétrica do nordeste do Pará e parque eólico na região litorânea do estado, estudos foram realizados e os resultados obtidos demonstram potencial para aplicação em ambiente operacional em tempo real.

Palavras chaves—Avaliação da segurança dinâmica, árvore de decisão, capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão, controle preventivo e gerador de indução duplamente excitado.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, os modernos sistemas elétricos de potência atendem a operar sob maior estresse com linhas de transmissão transportando energia elétrica próxima de seus limites físicos e operacionais para atender o aumento da demanda e a desverticalização das empresas de energia elétrica [1]. Ao mesmo tempo, o aumento da integração de fontes renováveis, como a geração eólica, traduz-se em crescimento das exigências dos padrões de qualidade e confiabilidade.

O crescimento dos parques eólicos em todo o mundo tem estimulado a realização de estudos dinâmicos de sua integração nos sistemas elétricos. Os códigos de rede, exigidos aos acessantes de parques eólicos, são atos de assistência às redes elétricas com a finalidade de melhorar a segurança operacional [11]. Fatores como variações bruscas de tensão em relação ao valor nominal, levam a novos desafios e a obrigatoriedade da alteração de procedimentos nas redes elétricas, de modo a evitar instabilidades angulares e de tensão, e garantir a integridade do sistema.

Um procedimento efetivo para reduzir os riscos de blecautes na operação de um sistema elétrico em tempo real é a avaliação da segurança dinâmica, do inglês “dynamic

security assessment” (DSA), por meio da qual os operadores podem tomar medidas preventivas, a fim de garantir a segurança do sistema [2]. No entanto, o desenvolvimento de aplicativos para DSA, que possibilitem a operação em tempo real, ainda é um grande desafio devido à alta não linearidade e a alta dimensionalidade do problema, o que torna difícil em curto prazo verificar todas as contingências em diversos cenários operativos.

O uso de técnicas de aprendizado automático de máquinas, como as árvores de decisão, do inglês “decision trees” (DT), é uma proposta de solução promissora no desenvolvimento de ferramentas para DSA. As DT aproveitam os estudos off-line para descobrir atributos inerentes ao sistema elétrico, relacionados a um objetivo, e fornecem um modelo de predição rápido para aplicações em tempo real [10]. Diversas aplicações de árvores de decisão foram investigadas envolvendo o desenvolvimento de metodologias para avaliar a segurança dinâmica de sistemas de potência. Em [3], árvores de decisão foram treinadas para predição do tempo crítico de falta no sentido de avaliar a estabilidade transitória. Em [4], um método para predição da estabilidade transitória em tempo real foi proposto, por meio da formação de uma base de dados que considerava os ângulos dos rotores dos geradores síncronos pós-contingência como atributos. Outros esforços mais recentes envolvendo o uso de árvores de decisão também foram reportados para avaliar a segurança dinâmica do ponto de vista da estabilidade transitória [5]-[6]. Em [7], árvores de decisão são treinadas para a DSA de sistemas elétricos de potência considerando a alta penetração de geração eólica.

A segurança de um sistema elétrico de potência refere-se ao grau de risco contido em sua habilidade para sobreviver a iminentes perturbações sem a interrupção do serviço. Assim, ela reflete a robustez do sistema elétrico em relação a perturbações, sendo que o nível de sua robustez depende das condições operativas (patamar de carga, despacho e intercâmbio de geração, além da topologia da rede), assim como da probabilidade de ocorrência das perturbações [8]. Nesse contexto, esse artigo propõe uma metodologia de avaliação da segurança dinâmica com foco na capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão de aerogeradores de indução duplamente excitados, do inglês “doubly fed induction generator” (DFIG), e nas ações preventivas baseadas em árvores de decisão. A base de dados necessária para a construção das DT é gerada a partir de históricos de operação SCADA/EMS modificado, acrescido da rede elétrica do nordeste do Pará e parque eólico no litoral do paraense. Os

dados são simulados em programas de fluxo de carga e estabilidade transitória. A partir de uma lista de perturbações prováveis, o resultado do processamento fornece aos operadores a informação de quais medidas devem ser tomadas para aumentar o nível de segurança do sistema. A avaliação da segurança tem como base critérios pré-definidos no que se refere às análises e métodos utilizados na determinação do estado de segurança, assim como quais perturbações são avaliadas.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas as principais características dos aerogeradores de indução duplamente excitado, assim como as metodologias de avaliação desta tecnologia.

A. Gerador de Indução Duplamente Excitado

O gerador de indução duplamente excitado caracteriza-se por ser um sistema de velocidade variável, ou seja, é conectado à rede elétrica de forma parcial através de conversores estáticos. Neste sistema, a potência reativa pode ser fornecida pelo estator da máquina ou pelo conversor ligado à rede.

O DFIG apresenta como principal característica a capacidade de controlar a potência ativa e a potência reativa de forma independente, além de aumentar a margem de estabilidade transitória [9]. Na Figura 1 é apresentado o gerador de velocidade variável conectado a rede elétrica.

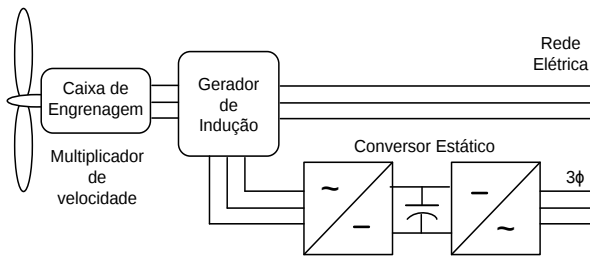


Fig. 1: Gerador de indução duplamente excitado

B. Códigos de rede

Os requisitos técnicos ou códigos de rede, exigidos aos acessantes de parques eólicos, são atos de assistência às redes elétricas com a finalidade de melhorar a segurança operacional e a qualidade de serviço. Na Figura 2 são apresentados os limites admissíveis da tensão terminal de parques eólicos conectados a rede elétrica diante de grandes perturbações.

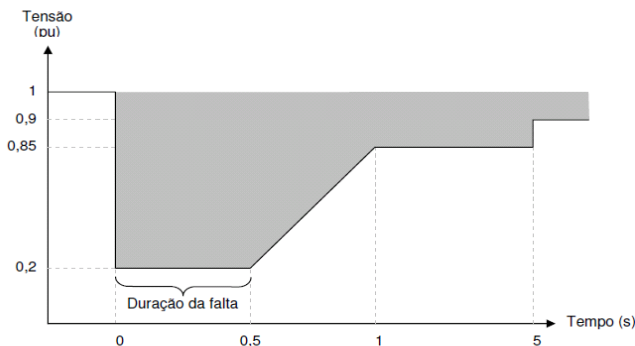


Fig. 2: Tensão nos terminais dos geradores (Fonte: ONS)

A gestão destes requisitos é essencial para o bom funcionamento dos sistemas elétricos e tem como principais objetivos a capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão, controle de potência reativa/tensão e controle de frequência.

O requisito técnico capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão, define-se como sendo a capacidade de um gerador em suportar faltas na rede elétrica com consequentes afundamentos de tensão e permanecer conectado a rede [11]. Para isto, é necessário que a tensão nos terminais do gerador permaneça acima da curva definida, e que a falta seja eliminada durante os tempos definidos pela mesma curva. Caso haja afundamento de tensão em uma ou mais fases no ponto de conexão da central de geração eólica na rede básica, a central deve continuar operando se a tensão nos seus terminais permanecer acima da curva indicada.

C. Árvore de decisão

A árvore de decisão é um algoritmo de classificação no ambiente da mineração de dados e tem a habilidade de aprender por meio de exemplos com o objetivo de classificar registros em uma base de dados. Uma de suas características mais importantes é particionar de forma recursiva um conjunto de dados, em diversos subconjuntos até que eles contenham apenas os casos de uma única classe desejada para uma melhor análise do problema. A árvore de decisão assim que construída apresenta resultados gráficos e dados organizados de forma simples e de fácil interpretação que poderão ser utilizados com uma ferramenta de suporte a tomada de decisão.

Uma árvore de decisão é essencialmente uma série de declarações "if-then", e a sua construção é baseada no modelo hierárquico, isto é, do nó raiz para as folhas. Os nós correspondem a nomes de atributos, as ligações de um nó representam os valores dos atributos, e as folhas representam as diferentes classes. A classificação ocorre seguindo o caminho que vai do nó raiz até as folhas onde está a classe atribuída, conforme indicado em destaque na Figura 3.

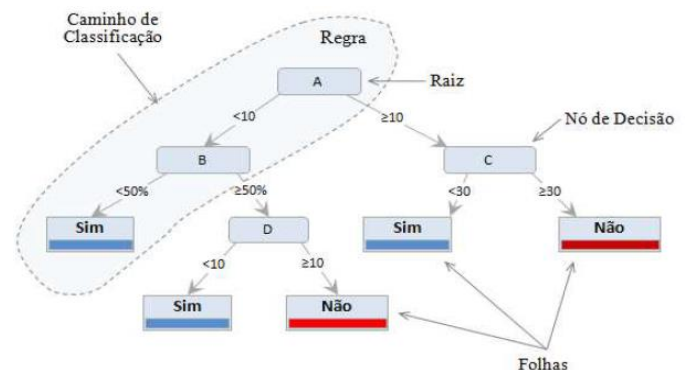


Fig. 3: Exemplo de uma árvore de decisão

Os primeiros classificadores baseados em árvores de decisão surgiram no final da década de 50, a partir do trabalho de Hunt, onde foram apresentados vários experimentos para indução de regras. Posteriormente, foi desenvolvido o algoritmo CART, do inglês "Classification and Regression Trees" por Friedman, e Quinlan desenvolveu o algoritmo ID3 e como seus sucessores surgiram os algoritmos C4.5 e C5.0.

D. Método proposto

Nesta seção será apresentada a metodologia de formação da base de dados para a avaliação da segurança dinâmica com foco na capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão de aerogeradores no sistema elétrico Eletrobrás Eletronorte do Estado do Pará modificado, acrescido da rede elétrica do nordeste do Pará e de parque eólico na região litorânea do estado, em Salinópolis. Na Figura 4 é apresentado o Sistema elétrico Eletrobrás Eletronorte destacado em azul.

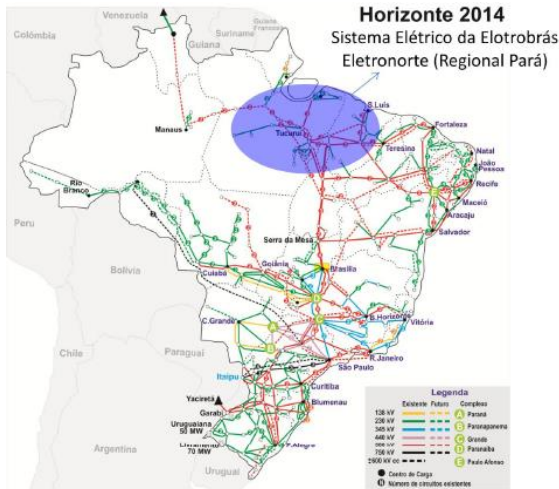


Fig. 4: Sistema elétrico Eletrobrás Eletronorte (Fonte: ONS)

O sistema elétrico do Nordeste do Pará está conectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através da subestação de Santa Maria pertencente à concessionária de distribuição CELPA (Centrais Elétricas do Pará). Na Figura 5 é mostrado o diagrama unifilar do sistema composto basicamente por linhas de transmissão de 230 kV, 69 kV e 13,8 kV. O DFIG foi integrado a subestação de 69 kV de Salinópolis.

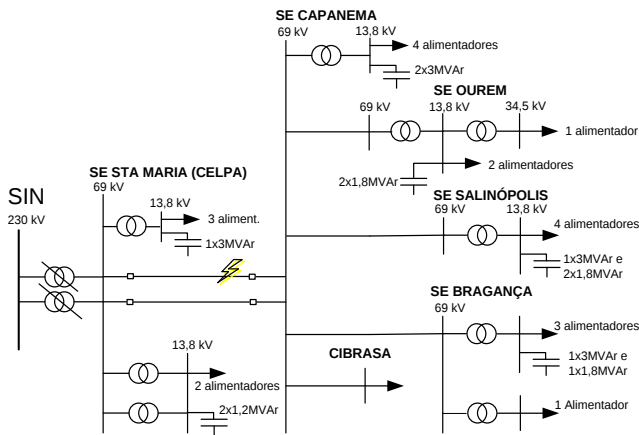


Fig. 5: Diagrama unifilar do Nordeste do Pará

E. Formação da base de dados

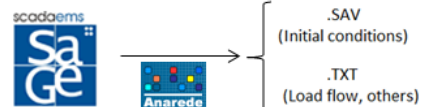
Inicialmente, os dados da rede elétrica do Pará são exportados pelo SCADA em formato .PWF em um total de 288 arquivos, que representam a história do estado operacional do sistema elétrico de um dia (24 horas), amostrados a cada 5 minutos. Esses arquivos são acrescidos da rede do nordeste do

Pará e parque eólico com capacidade de 25 MW, com curva de carga e regime de vento característico da localidade. Esses arquivos são simulados no software ANAREDE [12] para obtenção dos arquivos .SAV (condições iniciais) e .TXT (relatórios de fluxo de carga, monitoração da tensão, carregamento e geração de reativo).

No 2º passo, com a finalidade de enriquecer a base de dados, os arquivos .SAV são complementados com novos casos com incremento de $\pm 5\%$ nas barras de carga. Os arquivos .SAV serão utilizados como condições iniciais no ANATEM [13], programa de simulação no domínio do tempo.

Posteriormente, no 3º passo, com a finalidade de realizar simulações dinâmicas simultâneas, é criado o arquivo saianatem.STB, que deve ser associado aos arquivos DataControls.CDU (dados dos controles dos geradores), DataMachine.BLT (dados das máquinas) e .SAV (condições iniciais). Para tanto, o usuário deve antes definir o trecho crítico do sistema elétricos onde será aplicado um curto-circuito trifásico de 100 ms (tempo máximo de abertura de linha pela atuação da proteção). Após a execução da simulação dinâmica para todos os casos, o usuário terá acesso, por meio do programa ANATEM, aos arquivos .PLT, que consistem das respostas dinâmicas da tensão terminal do DFIG. Na Figura 6 é apresentado o diagrama esquemático da criação da árvore de decisão orientada por topologia.

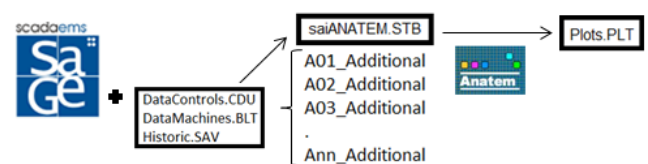
Passo 1: Base de dados



Passo 2: Complementar



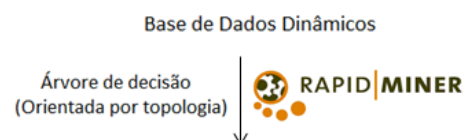
Passo 3: Simulações dinâmicas



Passo 4: Conversor da base de dados



Passo 5: Árvore de decisão



precisão de classe de 82,44. A predição da classe “fault ride through” ficou com uma precisão de 88,14%. Ambas as classes apresentaram bons desempenhos de classificação.

Tabela 1: Matriz confusão da árvore de decisão para fins de avaliação da segurança estática.

Accuracy: 84,67%		Classe Real		
		Disconnection	Fault Ride through	Class Precision
Classe Predita	Disconnection	75	16	82,44%
	Fault Ride through	7	52	88,14%
Class Recall		91,46%	76,47%	

Na Figura 8 é apresentado o comportamento dinâmico do sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte (Regional Pará) quando um curto circuito de 100 ms ocorre próximo a linha 6905-6908, referente a Sta. Maria 69 KV e Capanema 69 KV, na topologia A01. O resultado mostra que, em função da perturbação, a tensão terminal do DFIG viola os limites da curva de tensão estabelecidos por norma, o que levaria a atuação da proteção, desconectando o parque eólico, caso estivesse operando neste cenário operativo.

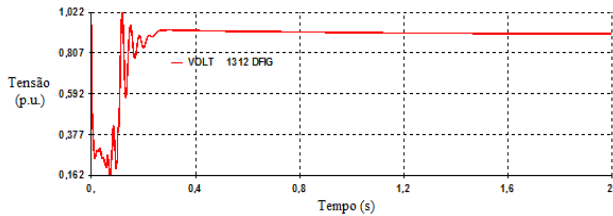


Fig. 8: Tensão terminal do DFIG conectado ao sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte.

Com a finalidade de prevenção contra afundamentos de tensão, verificou-se que as regras da árvore de decisão não estavam sendo atendidas, logo a tensão do aerogerador estava abaixo dos limites estabelecidos por norma, sendo assim, o parque eólico seria desconectado. Portanto, um aumento na injeção de reativo na barra B1312 de 2,1 MVar para 6,0 MVar foi efetuado, de acordo com a regra estabelecida pela árvore de decisão. Esse ajuste foi necessário para elevar a tensão na barra B1312. Após os ajustes baseados nas regras da árvore de decisão, uma simulação no domínio do tempo foi realizada no programa ANATEM. Na Figura 9 é mostrado que o ajuste apresentado pela árvore de decisão proporcionaria a manutenção da tensão do aerogerador, caso ocorresse um curto-circuito próximo à linha 6905-6908 na topologia A01.

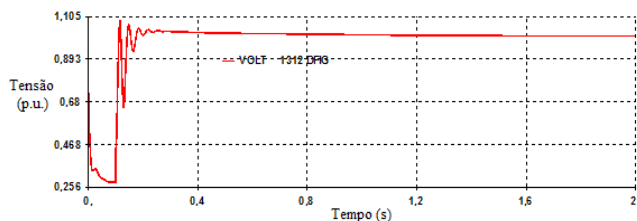


Fig. 9: Tensão terminal do DFIG conectado ao sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte, com os ajustes da árvore de decisão.

Pode-se observar na Figura 10 que as regras da árvore de decisão circuladas pelo caminho destacado, se adotadas,

tornam o sistema seguro para a topologia A02. As regras encontradas pelo algoritmo que possuem maior influência com relação à segurança de tensão são por ordem hierárquica: Se $V_{1310} > 0,971$ p.u. e $V_{6910} \leq 0,964$ p.u., então o DFIG apresentará capacidade de sobrevivência a afundamentos de tensão.

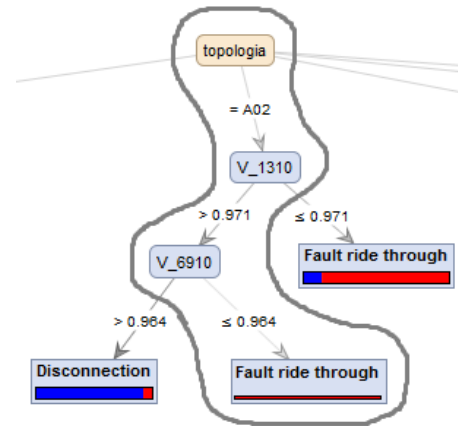


Fig. 10: Ramo da árvore de decisão referente à topologia A02

Na Figura 11 é apresentado o comportamento dinâmico do sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte quando um curto circuito de 100 ms ocorre próximo a linha 6905-6908, referente a Sta. Maria 69 KV e Capanema 69 KV, na topologia A02. O resultado mostra um caso de instabilidade de tensão de curto prazo. Esse fenômeno poderia comprometer a integridade do sistema.

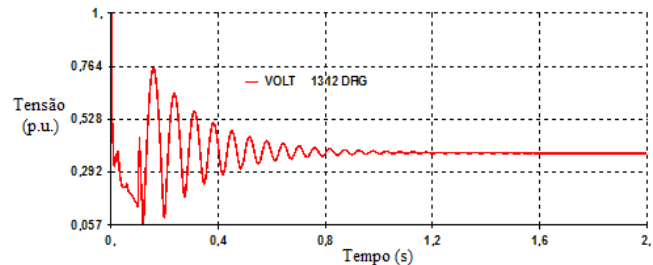


Fig. 11: Tensão terminal do DFIG conectado ao sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte.

Com a finalidade de prevenção contra a instabilidade de tensão, verificou-se que as regras da árvore de decisão não estavam sendo atendidas, sendo assim, o desligamento do parque eólico seria inevitável, uma vez que a instabilidade de tensão poderia desencadear um problema de aspecto global no sistema elétrico. Portanto, uma redução na injeção de potência ativa na barra B1312 de 25MW para 17MW e na potência reativa de 6,5 MVar para 6,0 MVar foi efetuada, realizando assim um ajuste remoto da tensão da barra B6910 de 1,0p.u. para 0,958p.u., seguindo as regra da árvore de decisão. Esses ajustes foram necessários para aumentar a tensão na barra indicada pela árvore de decisão. Uma simulação no domínio do tempo foi realizada no programa ANATEM. Na Figura 12 é apresentado que o ajuste solicitado pela árvore de decisão propiciaria a manutenção da tensão do aerogerador, caso ocorresse um curto-circuito próximo à linha 6905-6908, em determinado patamar de carga da topologia A02.

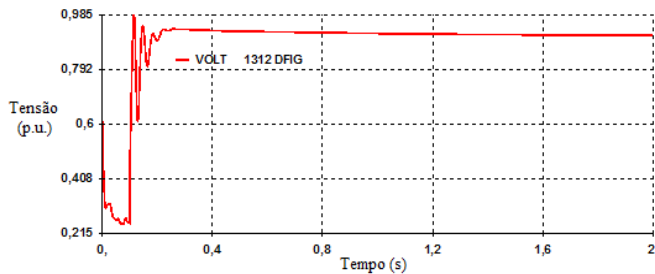


Fig. 12: Tensão terminal do DFIG conectado ao sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte, com os ajustes da árvore de decisão.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia de avaliação da segurança dinâmica com foco na capacidade de sobrevivência a afundamento de tensão de aerogeradores de indução duplamente excitados. Os testes foram realizados no sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte (Regional Pará) modificado, acrescido da rede elétrica do nordeste do Pará e parque eólico na região litorânea paraense, em Salinópolis-PA. Os resultados alcançados indicam um grande potencial para a aplicação em ambiente operacional em tempo real. Um aspecto inovador marcante que esta abordagem exibe como ferramenta de auxílio a operação dos sistemas elétricos, é que ela apresenta uma descrição sistêmica, com relação às variáveis críticas que afetam a segurança dinâmica, para cada configuração topológica de operação. Ou seja, estando o sistema operando com uma dada configuração de rede e geração, a ferramenta exibe para o operador as variáveis críticas, cujos limites devem ser respeitados para que o sistema se mantenha seguro. O caráter sistêmico aqui é importante, pois, como ocorreu nos exemplos testados, o conjunto de variáveis críticas pode estar distribuído por diversos pontos do sistema elétrico, muitas vezes em locais do sistema que não necessariamente seriam tão evidentes para a operação. Outro aspecto inovador é que em um sistema real tem-se um conjunto grande de variáveis a ser analisado simultaneamente para caracterizar a segurança do sistema, o que torna esta tarefa difícil e estressante para o operador. Com a ferramenta aqui proposta este conjunto se reduz significativamente e o operador pode ficar mais focado no acompanhamento das variáveis realmente críticas para a operação, utilizando também as variáveis de aerogeradores para auxiliar no controle preventivo e na manutenção do sistema elétrico.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Periódicos:

- [1] Morison, K., Wang, L., Kundur, P., "Power System Security Assessment", IEEE Power & Energy Magazine, Sep/Oct 2004.
- [2] I. Genc, R. Diao, V. Vittal, S. Kolluri, S. Mandal, "Decision Tree-Based Preventive and Corrective Control Applications for Dynamic Security Enhancement in Power Systems," IEEE Trans. Power Systems, vol. 25, no. 3, pp. 1611–1619, Aug 2010.
- [3] L. Wehenkel, M. Pavella, and E. Euxibie et al., "Decision tree based transient stability method a case study," IEEE Trans. Power Systems, vol. 9, no. 1, pp. 459–469, Feb. 1994.
- [4] S. Rovnyak, S. Kretsinger, J. Thorp, and D. Brown, "Decision trees for real-time transient stability prediction," IEEE Trans. Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1417–1426, Aug. 1994.

- [5] K. Sun, S. Likhate, V. Vittal, V. Kolluri, and S. Mandal, "An online dynamic security assessment scheme using phasor measurements and decision trees," IEEE Trans. Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 1935–1943, Nov. 2007.
- [6] R. Diao, V. Vittal, N. Logic, "Design of a real-time security assessment tool for situational Awareness Enhancement in Modern Power Systems," IEEE Trans. Power Systems, vol. 25, no. 2, pp. 957–965, May 2010.
- [7] C. Liu, K. Sun, "A Systematic Approach for Dynamic Security Assessment and the Corresponding Preventive Control Scheme Based on Decision Trees," IEEE Trans. Power Systems, Vol. 29, no. 2, Mar 2014.
- [8] KUNDUR, P. "Definition and classification of power system stability", IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions" 2004.
- [9] NUNES, M. V. A.; PEÇAS LOPES, J. A.; ZURN H. H., BEZERRA, U. H., ALMEIDA, R. G. – Influence of the Variable Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids in IEEE Transactions on Energy Conversion, v.19, n.4, pp.692-701, Dez, 2004.

Livros:

- [10] L. A. Wehenkel, Automatic Learning Techniques in Power Systems. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [11] ONS Submódulo 3.6 – Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica, Sep 2010.
- [12] CEPEL – ELETROBRAS: R&D Center in Electrical Energy: ANAREDE- Electrical Networks Analysis Program; User Guide, Version 07-08, Aug. 1999.
- [13] CEPEL – ELETROBRAS: R&D Center in Electrical Energy: ANATEM- Electromagnetic Transient Analysis Program. User Guide, Version 09, Dec. 2002.
- [14] RapidMiner: Data Mining Use Cases and Business Analytics Applications Chapman & Hall/CRC ©2013.

VI. BIOGRAFIA



Dione J. A. Vieira graduado e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará, em 2011 e 2013, respectivamente. Atualmente é doutorando em sistemas de energia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFPA). Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem, simulação, estabilidade, controle e segurança de sistemas elétricos; mineração de dados aplicados a sistemas de potência.



Marcus V. A. Nunes Possui Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (1996) e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003). Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal do Pará, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. Tem larga experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência.