



**XXIII SNTPEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GOP/23
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO-IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GOP

FERRAMENTA INTEGRADA EM AMBIENTE DE OPERAÇÃO EM TEMPO REAL: UMA ABORDAGEM BASEADA EM ÁRVORE DE DECISÃO PARA AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTÁTICA E DINÂMICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

**W. D. de Oliveira
UFPA**

**D. J. A. Vieira
UFPA**

**B. C. Bernardes
UFPA**

**D. A. Martins
UFPA**

**J. P. A. Vieira(*)
UFPA**

**U. H. Bezerra
UFPA**

**V. Castro
ELETROBRAS ELETRONORTE**

RESUMO

Este trabalho apresenta os primeiros passos de uma ferramenta integrada para suporte à operação em tempo real e ao controle preventivo visando garantir à segurança estática e dinâmica de sistemas elétricos de potência. A partir de uma consulta ao histórico operacional do SCADA/SAGE via arquivos de dados de entrada do programa ANAREDE e de arquivo de dados dinâmicos, disponibilizados pelo ONS, para simulação no programa ANATEM, estudos automatizados de fluxo de carga e de estabilidade transitória foram realizados para geração da base de dados para aplicação da técnica de mineração de dados conhecida como árvore de decisão. O modelo da árvore de decisão é utilizado para classificação do estado operacional do sistema, bem como para fornecer diretrizes à tomada de ações de controle, necessárias para evitar tanto a degradação da tensão operativa quanto a instabilidade transitória. Testes preliminares foram realizados utilizando o histórico operacional topológico e o estado estimado do SCADA/SAGE do Centro de Operação Regional do Pará da Eletrobrás Eletronorte. Os resultados obtidos validaram a metodologia e indicaram que a ferramenta possui grande potencial para a aplicação no ambiente de operação em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE

Avaliação da segurança estática e dinâmica, segurança de tensão, estabilidade transitória, controle preventivo, e árvore de decisão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos fatores vêm contribuindo para a diminuição das margens de segurança dos sistemas elétricos de potência (SEP). O contínuo aumento da demanda por energia elétrica em conjunto com o processo de desregulamentação do mercado de energia, além das pressões ambientalistas que vem atrasando a conclusão das usinas hidrelétricas há muito tempo planejadas tem levado os sistemas elétricos de potência a operar de forma cada vez mais estressada e a inserção de geração distribuída com sua maior dificuldade no âmbito de planejamento. Esses fatores vêm contribuindo significativamente com o aumento da complexidade nas redes elétricas, tornando-as mais difíceis de operar dentro dos limites recomendáveis de operação em regime e tornando os SEP cada vez mais vulneráveis a grandes perturbações, aumentando o risco de desencadear problemas de instabilidade transitória e, conseqüentemente, desastrosos blecautes [1]. Nesse contexto, a avaliação da segurança de sistemas elétricos de potência (SEPs) tem se tornado cada vez mais relevante e deve atender requisitos como precisão e robustez, onde cada vez menores tempos de atuação vem sendo exigidos.

Com a entrada em operação da interligação Tucuruí-Manaus-Macapá e a perspectiva de entrada em operação em médio prazo das usinas de Belo Monte, Teles Pires, Rio Tapajós, e também das centrais eólicas, a multiplicidade de cenários de intercâmbio aliada ao aumento das incertezas na operação certamente exigirá o desenvolvimento de uma nova geração de ferramentas computacionais que garantam a segurança do SIN. No entanto, o

(*)Parque de Ciência e Tecnologia do Guamá - Avenida Perimetral 2651, Prédio 01. CEP: 66077-830 Guamá - Belém/PA, – Brasil Tel: (+55 91) 98205-1245 - Email: jpavieira@ufpa.br

desenvolvimento de tal ferramenta tanto para estudos off-line quanto no ambiente de sala de controle, com módulos para avaliação da segurança de tensão e para avaliação da estabilidade transitória, dentre outras, não é uma tarefa simples.

Para o monitoramento da segurança em regime permanente, sistemas de medição baseados em SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) vêm cumprindo papel importante há anos, juntamente com estimadores de estados baseados em suas medidas. Atualmente, PMUs (Phasor Measurements Units) começam a ser utilizadas para diversas aplicações do setor elétrico. As elevadas taxas de amostragem conseguidas pelas PMUs (Phasor Measurement Units) e a consequente exigência de elevadas bandas de transmissão de dados e de velocidade de processamento, entretanto, vem sendo ainda um obstáculo para sua utilização em "Wide Area Monitoring Systems - WAMS e, principalmente em "Wide Area Control Systems - WACS". Desta forma, o controle sistêmico ainda deverá ficar restrito a ações oriundas de procedimentos nos Sistemas SCADA, como os tradicionais "esquemas de alívio de carga e geração". Contudo, para utilização em controle preventivo e avaliação de segurança pré-contingência, os dados adquiridos possuem informações que muitas vezes não são aproveitadas pelos operadores do sistema. Mesmo para o controle preventivo, inúmeras dificuldades são enfrentadas na avaliação da segurança dinâmica ou DSA (do inglês, "Dynamic Security Assessment") online, devido ao custo computacional envolvido em simulações no domínio do tempo. Por esse motivo é levado em conta um conjunto de contingências críticas para o sistema, comprometendo a tomada de decisão por intermédio de controles preventivos em diversas situações.

Com o avanço das técnicas de inteligência artificial, o uso de redes neurais, árvores de decisão ou DTs (do inglês, "Decision Tree"), máquinas de vetor suporte (SVM) e os mapas auto-organizáveis, fornecem uma solução promissora para atingir estes objetivos [3]. Essas máquinas de aprendizado aproveitam os estudos realizados *offline*, por meio de simulação ou de dados históricos, como o problema aqui discutido, para descobrir atributos críticos e inerentes ao SEP, relacionados a um objetivo (atributo alvo) [2]. Assim, o conhecimento obtido dessas máquinas de aprendizado pode ser diretamente utilizado para auxílio à tomada de ações preventivas, no sentido de garantir a melhoria da segurança, além de fornecer um modelo de predição rápido para aplicações em tempo real [3]. Devido a seus benefícios, diversos trabalhos propõem o uso de ferramentas inteligentes para encontrar o tempo crítico de eliminação da falta [3,4]. Outros esforços mais recentes envolvendo o uso de árvores de decisão têm utilizado medidas providas diretamente de PMU's, para avaliar a segurança dinâmica no contexto da estabilidade transitória [1,5], tanto para controle preventivo como para corretivo.

Testes preliminares foram realizados utilizando o histórico operacional do SCADA/SAGE do Centro de Operação Regional do Pará da Eletrobrás Eletronorte. Os resultados obtidos validam a viabilidade de operação da ferramenta integrada e indicaram um grande potencial para a aplicação no ambiente de operação em tempo real.

2.0 - ÁRVORE DE DECISÃO

Árvore de Decisão, Redes Neurais, Lógica Fuzzy e Computação Evolucionária, têm sido aplicadas com sucesso em diversas áreas da engenharia, resolvendo problemas que eram difíceis por métodos convencionais ou mesmo sem solução. Em geral, as soluções de problemas em inteligência computacional funcionam com considerável sucesso, desde que o ambiente e as condições de contorno do problema a resolver sejam limitados a subuniversos da realidade total e complexa com a qual o ser humano interage.

A DT é um algoritmo de classificação que possui a habilidade de aprender através de exemplos. A DT tem como objetivo classificar registros em uma base de dados. É um meio eficiente de construir classificadores que predizem ou revelam classes ou informações úteis baseadas nos valores de atributos de um conjunto de dados. A DT se destaca entre outras técnicas chamadas inteligentes devido à simplicidade na sua representação gráfica e indução de regras, bem como sua boa acurácia. Uma DT é essencialmente uma série de declarações "if-then", podendo ser usada como instrumento de apoio à tomada de decisão, sendo que uma das grandes vantagens de uma DT é a possibilidade de transformação/decomposição de um problema complexo em diversos subproblemas mais simples. Assim, os subproblemas podem ser decompostos quantas vezes forem necessárias para uma melhor análise. Um dos pontos fortes da DT é a sua eficiência em termos de processamento, além de fornecer resposta em representação simbólica simples e compreensível.

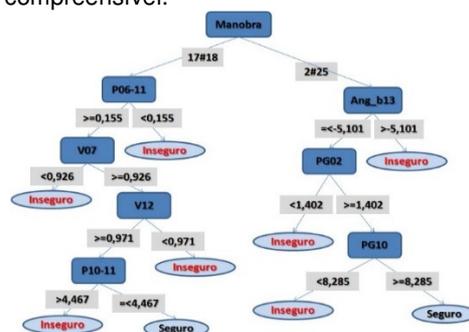


Figura 1 – Típica Árvore de Decisão Aplicada a Avaliação de SEP

A estrutura de uma DT é formada por nós que representam os atributos, por ramos (que são as ligações) provenientes dos nós e os nós folha, que representam as diferentes classes do conjunto de exemplos. Geralmente, o atributo mais efetivo dos dados é selecionado como o primeiro nó da árvore e seus valores limites são usados para criar os nós sucessores. Este procedimento é realizado em todos os nós criados, até que os nós folhas tenham somente uma classe. A figura 1 ilustra a estrutura de uma DT, onde são apresentados os nós, os ramos e os nós folhas. Para a interpretação, as regras encontradas pelo algoritmo possuem uma hierarquia que deve ser seguida, mostrando a maior influência das variáveis e seus limites em relação ao atributo alvo, nesse caso a segurança do SEP.

3.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

Os modernos sistemas elétricos de potência possuem uma vasta gama de informações providas de seus sistemas de medição, gerando assim enormes bancos de dados, no qual contém informações de diversas condições operacionais do sistema elétrico. Em geral, armazena-se uma enorme gama de variáveis que podem ser úteis para as diversas análises no sistema. Por sua vez, essa grande variedade de informações pode ser tratada por diversos processos, mineração de dados, por exemplo, que podem descobrir conhecimentos ou associações que até então não era percebidos pelos engenheiros e operadores das empresas. Assim, esses conhecimentos podem ser muito úteis para análises de planejamento, manutenção e outras atividades do setor.

Todavia, é necessário estudar qual é a reação do sistema quando o mesmo é submetido a situações adversas, como saídas de grandes blocos de cargas, retirada de geração, retiradas de linhas, curto-circuito e outras ocorrências possíveis. Contudo, é importante enfatizar que quase na totalidade do tempo, os SEPs operam em condições consideradas normais, ou seja, sem grandes perturbações ao longo do tempo. Logo, obter uma base de dados, suficientemente grande e eficiente, que leve em consideração todos os possíveis estados operacionais dentro de todas as possíveis contingências, previsíveis ou não, a que o sistema está sujeito, podem demandar anos e anos de coleta de dados nos históricos operacionais. Para que seja possível a análise ou até mesmo o desenvolvimento de ferramentas para a avaliação de um sistema de potência, o uso de simulações é de fundamental importância, pois nelas são modelados os sistemas e são aplicadas as contingências desejadas, além do que, dificilmente, encontram-se disponíveis dados rotulados nas inúmeras bases de dados das empresas do setor elétrico, que possam ser utilizadas para tal finalidade.

3.1 Esquema de Avaliação de Segurança

A ferramenta proposta aborda o monitoramento de violações de tensão online e avalia de modo preventivo os módulos das tensões para contingências críticas. A figura 2 ilustra o esquema do módulo de avaliação da segurança estática online. A partir de dados da configuração topológica oferecidos pelo configurador de redes e dos valores analógicos estimados, compondo o estado do sistema elétrico que é fornecido pelo estimador de estados, ambos integrados ao sistema SCADA, do centro de controle do sistema, a DT classifica de maneira rápida se o sistema se encontra em um estado *seguro* ou *tensão violada* do ponto de vista estático.

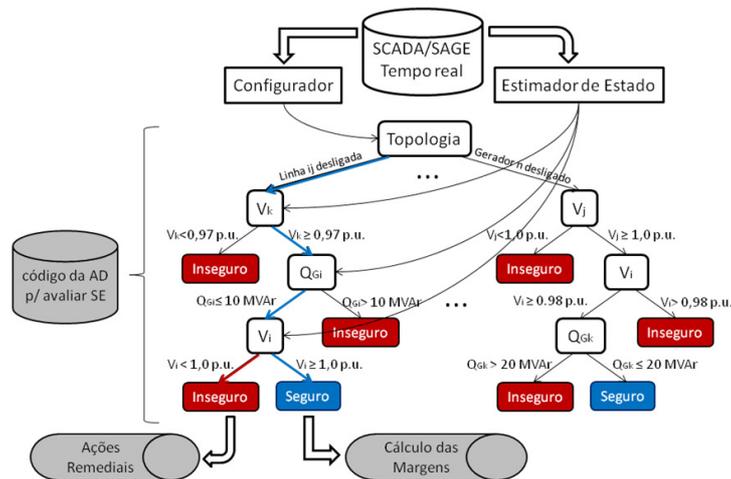


Figura 2 – Esquema do Módulo de Avaliação Estática

Caso o sistema viole alguma das restrições de tensão fornecidas pela DT, ações remediais podem ser tomadas a partir das suas regras. Essas ações podem ser tomadas com ajustes nas variáveis, de forma local ou remota, através de telecomandos. Além das funções online, a partir da topologia atual, é possível avaliar a condição para eventuais e prováveis contingências críticas já treinadas previamente, ou já antes experimentadas pelo sistema. Assim é possível operar o sistema dentro de uma região de segurança que abrange o estado atual e os principais e mais prováveis casos n-1. De modo semelhante, a DT treinada para DSA avalia a estabilidade transitória frente a curtos-circuitos trifásicos em trechos caracterizados como críticos para o sistema, para os pontos de operação criados no módulo VSA (do inglês, Voltage Security Assessment).

3.2 Construção da Base de Dados

A construção da base de dados é um dos pontos chave para que a DT tenha um alto grau de desempenho, tanto para a avaliação da segurança de tensão quanto para estabilidade transitória. A criação da base de dados utiliza os programas do Cepel (ANAREDE e ANATEM). Assim uma extensa base de dados é criada a partir de algumas premissas que são fundamentais para a eficácia e confiabilidade dos modelos (DTs) treinados. Dentre elas, pode-se ressaltar:

- Acurácia dos modelos que representam o Sistema Elétrico: A qualidade dos modelos usados por ferramentas offline ou online afeta os resultados da avaliação da segurança. Modelos com razoável acurácia geram respostas da simulação aproximadas as respostas da medição.
- Confiabilidade da Medição - A confiabilidade das medições impacta diretamente na qualidade da operação e gerenciamento de manobras, o SAGE-. Assim, o uso de estado estimado e não estado medido é essencial para um bom desempenho da ferramenta.
- Softwares de Execução das Simulações - São utilizados nas simulações as ferramentas do CEPEL, ANAREDE e ANATEM, cujo eficácia e confiabilidade são comprovadas pelo amplo uso nas empresas do Setor Elétrico Brasileiro.
- Seleção das Condições de operação - Comumente na seleção das condições de operação são utilizados dados de previsão de carga e agendamento de manobras e manutenção. Na abordagem dada, os dados do passado fornecem diretrizes para a escolha dos pontos de operação.
- Seleção das Contingências – São escolhidas as contingências que possuem maior impacto no sistema, saída de grandes blocos de geração ou carga, saída de linhas ou outros equipamentos são alguns exemplos de contingências. Nesta primeira etapa, apenas algumas saídas de linhas são testadas para exemplificar o funcionamento da ferramenta.

A figura 3 apresenta o esquemático simplificado do funcionamento da metodologia, desde a aquisição de dados a geração do código das DTs utilizadas para a avaliação de segurança.

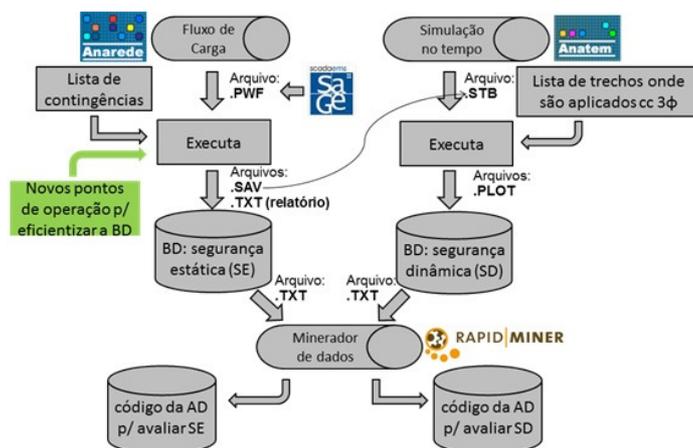


Figura 3 – Resumo dos processos para a geração das bases de dados e DTs

3.2.1 Base de Dados Avaliação de Tensão e Estabilidade Transitória

Neste trabalho, os modelos utilizados para a avaliação da segurança estática são extraídos diretamente do estimador de estados do SAGE/CEPEL. O esquema proposto baseia-se na aquisição de screenshots (SS) do sistema, amostrados a cada 5 minutos ou quando ocorre mudança topológica. Estas SS contêm toda a configuração topológica da rede em questão, bem como os vetores de tensão, de potências ativa e reativa de carga e de geração estimados a partir de medição do sistema SCADA. O estimador de estado do sistema EMS fornece para cada uma das SS em um arquivo .PWF (arquivo de entrada para o programa de análise de redes – ANAREDE). De acordo com o intervalo de amostragem tem-se um mínimo de 288 arquivos .PWF a cada 24 horas, ou seja, gera um histórico operacional completo do panorama de operação, sendo chamados CROs (Condição Real de Operação). Em seguida, faz-se a associação de cada CROs aos dados do configurador de rede, dando assim uma chave de identificação topológica (CIT). Essa CIT carrega intrinsecamente os estados lógicos de todos os elementos da rede, isto é, a assinatura topológica é o resultado da concatenação dos estados dos equipamentos, obtida pela listagem destes em ordem alfabética. Desta forma, se pode garantir a univocidade da relação lista de equipamentos vs assinatura topológica.

Com base nos CROs, cria-se novos pontos de operação (OC) com incremento/decremento de 5% nas potências nas cargas, o que aumenta a quantidade de casos apresentados ao minerador de dados. Esses novos pontos de operação, aumentam o stress de carregamento do sistema. Um fator importante a ser levado em conta, é que o número de OCs para todas as configurações topológicas que se deseja avaliar, devem possuir um número de

casos semelhantes, para garantir a orientação da DT por topologia. Portanto o número de casos criados a partir dos dados do SAGE varia de acordo com a necessidade. Em seguida é executado o fluxo de cargas para todos os OCs e então são armazenados os relatórios, que são tratados para formar a base de dados para VSA e os arquivos que são associados aos dados dinâmicos do SEP para a execução das simulações no domínio do tempo. Para a simulação dinâmica são selecionados os pontos críticos, ou seja, aqueles com maiores chances de levar o sistema à instabilidade para um tempo de eliminação de falta em 100 ms, frente a curto-circuito trifásico nesses trechos críticos. Os atributos selecionados para constar na base de dados a ser fornecida ao Rapidminer (programa minerador de dados) estão descritos na tabela 1, apresentando as variáveis selecionadas para a base de dados tanto para avaliação estática, quanto para avaliação dinâmica:

Tabela 1 – Variáveis selecionadas para a base de dados.

Variáveis	Base para avaliação estática	Base para avaliação dinâmica
Potência Ativa Gerada (P_G) para as barras V^{θ} e PV;	X	X
Potência Reativa Gerada (Q_G) para as barras V^{θ} e PV;	X	X
Magnitudes das Tensões (V) para as barras V^{θ} e PV;	X	X
Ângulos de Fase da Tensão (θ) para as barras V^{θ} e PV;	-	-
Potência Ativa da linha entre a barra "i" a barra "j", P_{ij} ;	-	-
Potência Reativa da linha entre a barra "i" a barra "j", Q_{ij} ;	-	-
Identificação Topológica	X	X
Identificação de Contingência	-	X
Label	X	X

4.0 - RESULTADOS

Para fins de testes e validação das metodologias baseadas em árvore de decisão, estudos de caso são apresentados para avaliação da segurança estática e do controle preventivo para melhoria da segurança estática e dinâmica do Sistema Elétrico da Eletrobrás Eletronorte (regional Pará), ilustrado em azul na Figura 4. As análises apresentam as principais variáveis de controle e seus limites (extraídos das árvores de decisão) que afetam a segurança estática e dinâmica do sistema.

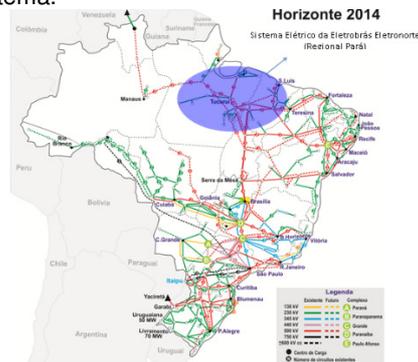


Figura 4 - Sistema Elétrico da Eletrobrás Eletronorte (Regional Pará) localizado na área azul

Foram utilizados os arquivos .PWF correspondentes a operação do dia 08/11/2013. Para ilustrar a aplicação, tomou-se uma topologia chamada A01, para ser utilizada em todos os exemplos. O sistema elétrico operou com essa topologia A01 nos horários de (00:02hs as 02:34hs) e de (09:32hs as 13:27 hs), que possui 66 dos 288 casos diários, foram simulados mais 434 casos complementares (novas condições de carregamento em torno dos 66 pontos de operação reais) a fim de totalizar 500 casos para a topologia A01, bem como para todas as 11 topologias que ocorreram no dia 08/11/2013.

Em seguida, uma base de dados foi gerada para posterior criação da árvore de decisão. Foram utilizados 70% dos dados para treino e 30% para teste. Na figura 6 é ilustrado um ramo da árvore da decisão referente à configuração topológica A01, como pode ser observado na Figura 6, o nó raiz da árvore decisão é a configuração topologia do sistema. Essa informação é extremamente útil para o operador. Ela dirige a atenção do operador para a principal fonte de risco de segurança do sistema elétrico, o foco do problema, dentre as centenas de variáveis à ele oferecidas pelo SCADA. Pode-se notar que esse ramo da árvore de decisão indica um caminho cujas regras devem ser respeitadas para garantir o sistema em um ponto de operação seguro do ponto de vista dos módulos das tensões em todas as barras, representado por um menor número de variáveis, facilitando assim o trabalho dos operadores, que poderão ficar mais atentos no acompanhamento das variáveis realmente críticas de operação para aquela topologia e condição de carga naquele instante.

Obedecendo as regras encontradas pela DT, a indicação de quais variáveis possuem maior influência com relação à segurança de tensão são por ordem hierárquica: Se $V_{119} \leq 1,054$ p.u., e $V_{10} \leq 1,016$ p.u., e $Qg_{116} > -10$ MVAR, e $V_{93} \leq 1,099$ p.u., e $Qg_{76} > -134,750$ MVAR, então o sistema é seguro, ou seja, essas poucas variáveis podem indicar ao operador e a outros sistemas de controles algumas margens de segurança adicionais. Essa facilidade se deve a uma das características da árvore de decisão, que é reduzir dimensionalidade devido ao índice que correlaciona os atributos críticos a segurança de tensão do sistema. A inteligência contida nas regras desse ramo específico da árvore de decisão pode ser diretamente utilizada para cálculo de margens de segurança de tensão, bem como em tomada de ações corretivas locais e remotas.

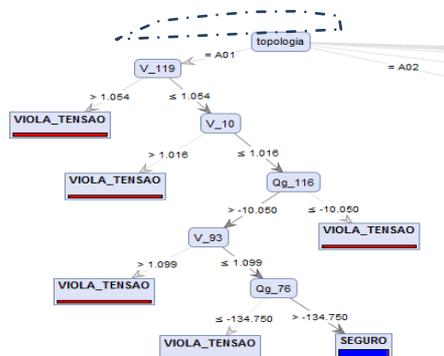


Figura 5 - Ramo da árvore de decisão que se refere à topologia A01 do dia 08/11/2013

A tabela 2 apresenta a matriz confusão correspondente à árvore de decisão da figura 5. Pode-se observar que a taxa de acerto (*acurácia*) foi de 97,58%, ocorrendo apenas 18 casos que foram preditos como seguro, enquanto que na realidade, trata-se de casos inseguros, ficando a predição da classe seguro com uma precisão de classe de 98,14%. A predição da classe inseguro ficou com uma precisão de 96,76%. Ambas as classes apresentaram excelentes desempenhos de classificação.

Tabela 2 - Matriz confusão da árvore de decisão para fins de avaliação da segurança estática

Acurácia: 97,58%	Classe Real			
	Seguro	Inseguro	Classe de Precisão	
Classe Predita	Seguro	952	18	98,14%
	Inseguro	22	658	96,76%
Classe Recall		97,74%	97,34%	

Após a criação da árvore de decisão, um arquivo .PWF do dia 08/11/2013 no instante 01:18hs foi selecionado para teste e validação das regras determinadas pela árvore de decisão. No referido horário (01:18hs) do dia 08/11/2013 duas violações de tensão foram detectadas nas barras 93 ($V_{93}=1,102$ p.u.) e ($V_{118}=1,052$ p.u.), de acordo com o relatório de monitoração de tensão mostrado na figura 6.

```

08-11-13 01:18 - Dados de entrada do Anarede (BASE colbe_ems - CONTEXTO tr)
MONITORACAO DE TENSÃO

X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
NUM.      BARRA      ARE  MIN  TENSÃO  VIOLACAO  SHUNTBAR  SHUNTLIN  SEVERIDADE
X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X-----X
          NOME      MOD.  (PU)  (Mvar)  (Mvar)
-----
  93  TUBR2G23      1  0.900  1.102  1.100  0.002
 118  VCBR6         1  0.950  1.052  1.050  0.002  111.00
-----
IND SEVER.      0.1

```

Figura 6 - Relatório de monitoração de tensão fornecido pelo ANAREDE (arquivo .PWF do dia 09/11/2013 as 00:05hs)

Para corrigir os módulos das tensões nas barras 93 e 118, percorrido o caminho de regras da DT da figura 5, a primeira regra que trata da barra 119. Neste caso não seria possível realizar um ajuste fino, ou seja, mudar o setpoint, pois se trata de um reator. Partir-se-ia então para as regras seguintes. Tanto o módulo da tensão na barra 10 ($V_{10}=1,012$) quanto a potência reativa absorvida na barra 116 ($Qg_{116}=25,87$) não seriam ajustados, pois ambos atenderiam as regras da árvore. Posteriormente, pela hierarquia das regras, seria realizado um ajuste no módulo da tensão na barra 93 de 1,102 p.u. para 1,08 p.u., atendendo a regra estabelecida pela árvore de decisão. Por fim, não seria necessário ajustar a potência reativa na barra 76 ($Qg_{76}=-132$ MVAR), de acordo com a última regra da árvore de decisão. Após os ajustes baseados nas regras da árvore de decisão, um fluxo de carga foi executado e o relatório de monitoração de tensão não detectou violações. Testes semelhantes foram realizados para Treino e teste da DT com dados do dia 08/11/2013, simulando a saída da linha de transmissão IZCO-LT7-

0101 (circuito 2) entre as barras 126 e 140, que entra como uma topologia possível para operação futura. Esses testes também apresentaram resultados com classificação de 97,33%.

DTs para avaliação de estabilidade transitória foram criadas de forma similar, conseguindo obter resultados muito bons, com taxas de acertos de 97,70%. A figura 7 ilustra um ramo da árvore da decisão referente à configuração topológica A03 para fins de controle preventivo, ou seja, se um curto-circuito de 100ms ocorrer próximo à linha IZPD-LT7-201, as regras da árvore de decisão podem ser utilizadas para evitar que o sistema seja levado para uma instabilidade, caso a perturbação ocorra.

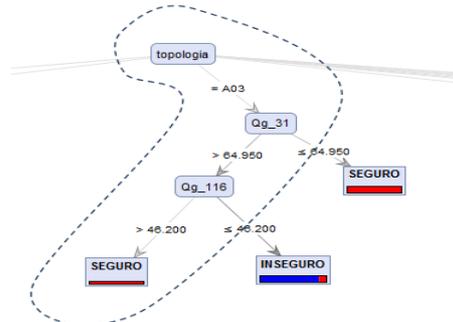


Figura 7 - Ramo da árvore de decisão que se refere à topologia A03 do dia 08/11/2013, para fins de auxílio ao controle preventivo para garantir a estabilidade transitória

Com a finalidade de testar as regras da DT, foi selecionado um caso real que operava em região instável. A figura 8 apresenta o caso antes e após a correção via regras da árvore de decisão, sendo que a primeira regra estava sendo atendida, porém a segunda regra não. Por isso o sistema foi levado à instabilidade. Portanto, um aumento na injeção de reativo na barra 116 de 39,1 MVar para 59,58 MVar foi efetuado, de acordo com a segunda da regra da árvore de decisão. Esse ajuste foi necessário para aumentar a tensão na barra 116. Após os ajustes baseados nas regras da árvore de decisão, uma simulação no domínio do tempo foi realizada no programa ANATEM. A figura 8 mostra que o ajuste solicitado pela árvore de decisão iria propiciar a manutenção da estabilidade transitória do sistema, caso ocorresse um curto-circuito próximo à linha IZPD-LT7-201 em determinado patamar de carga da topologia A03 do dia 08/11/2013.

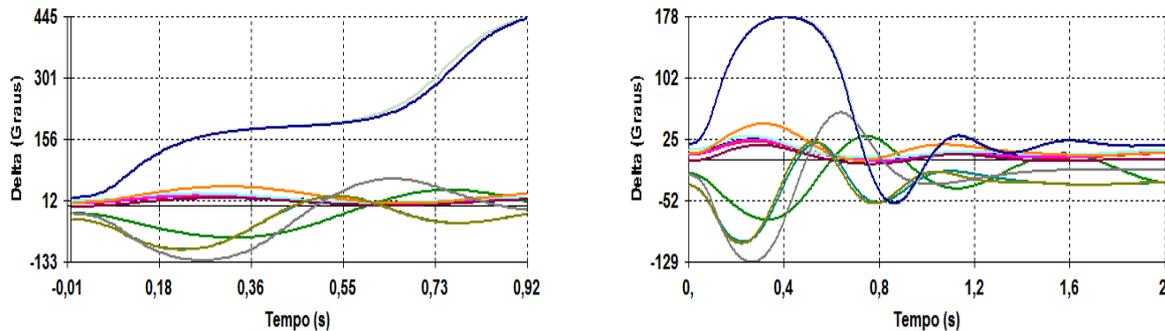


Figura 8 - Comportamento dos ângulos dos rotores das máquinas síncronas conectadas ao sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte – Antes e depois do ajuste fornecido pela DT

5.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os desenvolvimentos com validação dos métodos baseados em árvore de decisão para suporte à operação em tempo real e ao controle preventivo para melhoria da segurança estática e dinâmica. Os testes foram realizados no sistema elétrico da Eletrobrás Eletronorte, relativos a área Pará, Maranhão e Tocantins, a partir de dados reais da base de dados do SAGE. Os resultados alcançados até então validam completamente os aplicativos e ferramentas desenvolvidos, e indicam um grande potencial para a aplicação no ambiente de operação em tempo real.

Um aspecto marcante que esta abordagem exhibe como ferramenta de auxílio a operação em tempo real dos sistemas elétricos, é que ela apresenta uma descrição sistêmica, com relação às variáveis críticas que afetam a segurança do sistema elétrico, para cada configuração topológica de operação. Ou seja, estando o sistema operando com uma dada configuração de rede e geração, a ferramenta exhibe 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 em muitos dos 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 de destaque 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.

Por fim, este trabalho, resultado de um projeto de P&D entre a UFPA e Eletrobras Eletronorte, originou um segundo projeto, do tipo cabeça de série, em vias de assinatura contratual, que visa implantar o serviço como uma ferramenta adicional regular de operação no Centro de Controle do Estado do Pará. Neste projeto, serão desenvolvidos procedimentos, scripts e programas periódicos visando a aplicação da técnica descrita neste trabalho. A implantação do serviço será dividida em dois ambientes de software totalmente integrado ao SCADA/SAGE da Empresa. Um ambiente off-line onde, periodicamente, aos arquivos PWF exportados pelo estimador de estado serão acrescentados de alternativas prováveis de alteração topológica e de carga. Este conjunto servirá de base para o treinamento da DT. Em um segundo ambiente, on-line, um procedimento em tempo real, ficará aguardando por uma alteração topológica da rede ou, periodicamente, por uma alteração do estado do sistema, produzirá, de forma humanamente compreensível a DT treinada a cada instante e, dependendo da situação, oferecerá ao operador, na sua console de operação, sugestões operativas na forma de instruções de operação, apontando os pontos críticos que podem conduzir o sistema elétrico à região insegura e as alternativas de manobra ou de ajustes mais importantes para evitar

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1). 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 Syst., vol. 25, no. 2, pp. 957–965, May 2010.
- (2). 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). Wehenkel, L. A., Automatic Learning Techniques in Power Systems. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- (4). D. Srinivasan C. S. Chang A. C. Liew K. C. bong "POWER SYSTEM SECURITY ASSESSMENT AND ENHANCEMENT USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK", IEEE Catalogue No: 98EX137, 1998.
- (5). Kai Sun, Siddharth Likhate, Vijay Vittal, V. Sharma Kolluri, Sujit Mandal: "An Online Dynamic Security Assessment Scheme Using Phasor Measurements and Decision Trees", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, NO. 4, NOVEMBER 2007
- (6). Lin, Yu-Jen , "Prevention of transient instability employing rules based on back propagation based ANN for series compensation", 2012
- (7). Lin, Yu-Jen "Comparison of CART- and MLP-based power system transient stability preventive control", 2013
- (8). Rapid-i.com
- (9). Kundur, 2004 "Definition and Classification of Power System Stability IEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions"
- (10). K. Morison, L. Wang and P. Kundur, "Power System Security Assessment", IEEE Power & Energy Magazine, September/October, 2004.
- (11). Rokach, Lior ; Maimon, Oded; "Data Mining with Decision Tree – Theory and Applications", 2008
- (12). VILLANUEVA, W. J. P, 2011. "Síntese Automática de Redes Neurais Artificiais com Conexões à Frente Arbitrárias". Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Campinas, São Paulo, 2011.
- (13). Theodoro, Edson Aparecido Rozas; Benedito, Raphael Augusto de Souza; Alberto; Luís Fernando Costa, "MÉTODO RÁPIDO PARA IDENTIFICAÇÃO DE ILHAMENTO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA" - XVIII Congresso Brasileiro de Automática / 12 a 16-setembro-2010, Bonito-MS
- (14). N. Amjady, "A framework of Reliability Assessment with consideration effect of transient and voltage stability," IEEE Trans. Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 1005–1014, 2004.
- (15). Assis, Tatiana Mariano Lessa de, "Cálculo da Capacidade de Transmissão Dinâmica em Sistemas de Potência através de Ferramentas Integradas e Sistemas Inteligentes", 2007.
- (16). Mariotto, Lenois, "Avaliação da Segurança da Operação de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Limites de Estabilidade Angular e de Tensão", 2008.
- (17). HERNANDEZ, EMÍLIO DEL MORAL, Inteligência Computacional e Redes Neurais em Engenharia Elétrica, USP, São Paulo, 2005.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Werboston Douglas de Oliveira - Possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2011) e (2013), respectivamente, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica. Atualmente doutorando em Sistema de Energia pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará, atuando como membro do Laboratório de Modelagem e Simulação de Sistemas Elétricos de Potência do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON), membro do IEEE PES.



Daniel Augusto Martins é graduado em Engenharia Elétrica pela UFPA em 1972 e mestrado pela UFSC em 1975. Foi auxiliar de ensino na UFSC e professor assistente na UFPA. Trabalhou por mais de 30 anos na Eletrobras Eletronorte onde participou do desenvolvimento do Centro de Operação da UHE Tucuruí, do Centro de Operação da Transmissão em Brasília e do Centro de Operação Regional de Belém. Daniel é um entusiasta programador ANSI C e em tecnologia WEB. Atualmente é doutorando em Sistemas Elétricos de Potência na UFPA.



João Paulo Abreu Vieira - Graduado, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará em 2004, 2006 e 2009, respectivamente. Atualmente exerce a função de Professor Adjunto 2 da Universidade Federal do Pará. 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. Geração distribuída, aerogeradores. Medição fasorial sincronizada e suas aplicações. É membro do IEEE PES.



Bernard Bernardes - Possui Graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, em 2011 e 2013, respectivamente. Participa de pesquisas no CEAMAZON, fazendo parte da equipe do Laboratório de Modelagem e Simulação de Sistemas Elétricos.



Dione J. A. Vieira - Graduado e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, em 2011 e 2013, respectivamente. Atualmente é doutorando em Sistemas de Energia no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFPA) e pesquisador no Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON),



Ubiratan H. Bezerra - Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (1976), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1980) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1988). Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal do Pará. Suas áreas de atuação são: Avaliação da segurança estática e dinâmica de sistemas elétricos. Geração distribuída. Qualidade da energia elétrica.



Wilson Castro - Atualmente exerce o cargo de Analista de Sistemas na Assessoria Técnica Superintendência de Engenharia de Operação de Sistema na Eletrobras Eletronorte em Brasília - DF