

## 7

### Conclusões

#### 7.1

##### Problema Investigado

O desenvolvimento de modelos, técnicas e algoritmos computacionais para realizar uma APET (Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão) em sistemas de energia elétrica foi abordado nas seções precedentes. Os procedimentos usados para implementar estes modelos se baseiam em quatro técnicas: Enumeração, SMC (Simulação Monte Carlo), MMD (Método da Matriz D') e o MPI (Método dos Pontos-Interiores). A utilização destas quatro técnicas permitiu realizar uma APET através dos seguintes índices:

- i) RIT (Risco de Instabilidade de Tensão);
- ii) Índices de Robustez: probabilidade de o sistema ser encontrado nos estados saudável, marginal, emergência e colapso;
- iii) Valor esperado da MET (Margem de Estabilidade de Tensão) Nodal;
- iv) Valor esperado do Índice de Influência.

#### 7.2

##### Principais Realizações e Contribuições

As principais contribuições desta tese para a APET podem ser resumidas da seguinte forma:

- **Cálculo de Índices de Estabilidade de Tensão Probabilísticos para barras PV**

O MMD é a única técnica existente capaz de calcular margens de estabilidade para barras PV [Prada, 2002], [Franca, 2003]. Nesta tese o MMD foi utilizado

para estimar os valores esperados da margem de estabilidade e do índice de influência para as barras do sistema. Estes índices permitem avaliar o impacto de incertezas, associados com parâmetros da rede elétrica, nas áreas e barras da mesma. Além disso, deve ser mencionado que diversas barras de geração, do sistema brasileiro Sul/Sudeste, apresentaram problemas de perda de controlabilidade poucas horas antes do afundamento de tensão no sistema brasileiro Sul-Sudeste em abril de 1997 [Prada, 2002]. Este fato reforça a importância de se estimar índices para as barras de geração na APET.

- **Contabilização dos dois mecanismos causadores da instabilidade de tensão no RIT**

Na literatura existente sobre APET não há registro de um método que considere simultaneamente a ausência de solubilidade e a perda de controlabilidade no cálculo do RIT. Além disso, apenas em [Rios, 2008] foram incluídos problemas de instabilidade de tensão causados pela perda de controlabilidade na APET. Contudo, esta referência não considera incertezas associadas com indisponibilidade dos equipamentos. Entretanto, muitos distúrbios de instabilidade de tensão ocorridos em sistemas reais são causados por falhas nos equipamentos [Prada, 1992], [Prada, 2002], [Taylor, 2004]. É importante mencionar que a ocorrência de problemas de instabilidade de tensão, causados pela perda de controlabilidade, tem sido relatada em diversos eventos, tais como os distúrbios ocorridos na França [Prada, 1992] e no Brasil [José da Silva, 2006], [Prada, 2002] em janeiro de 1979 e em abril de 1997, respectivamente. Nesta tese, o cálculo do RIT é realizado considerando-se estados instáveis causados pela perda de controlabilidade e pela ausência de solubilidade. A contabilização destes estados no cálculo do RIT foi realizada considerando-se incertezas resultantes de erros de previsão de carga e contingências nos equipamentos. Conseqüentemente, os índices calculados pelo método proposto nesta tese refletem de forma mais precisa os cenários de instabilidade de tensão que tem ocorrido em diversas partes do mundo.

- **Quantificação da severidade dos estados de instabilidade de tensão**  
O principal índice usado na APET é o RIT. Este índice é suficiente para realizar uma APET quando os estados de instabilidade de tensão são causados apenas

por um mecanismo. Entretanto, quando a instabilidade é causada por mais de um mecanismo, o RIT não é suficiente para quantificar adequadamente a severidade dos problemas de instabilidade de tensão. Por exemplo, estados de instabilidade causados pela perda de controlabilidade são considerados menos severos do que aqueles causados pela ausência de solubilidade [Moura, 2005]. Além disso, cenários onde a RESFLUP (Restauração da Solubilidade das Equações de Fluxo de Potência) é realizada sem corte de carga são considerados menos severos do que aqueles onde a insolubilidade foi eliminada com corte de carga. Devido a estes aspectos, é necessário definir índices que possam diferenciar os estados de instabilidade de acordo com a sua severidade. Nesta tese, a análise de robustez foi usada para avaliar a severidade dos estados de instabilidade de tensão. Esta avaliação foi realizada definindo-se estados do sistema baseados nos critérios tradicionalmente usados pelos operadores. Desta forma, os operadores podem interpretar facilmente os índices probabilísticos fornecidos pela análise de robustez.

### 7.3

#### **Aplicações Práticas**

A aplicação dos conceitos e técnicas propostos para a APET foi apresentada no Capítulo 5. Estas aplicações práticas foram realizadas através de estudos em três sistemas-teste: IEEE-MRTS (Versão Modificada do sistema IEEE-RTS), EQV-65 e EQV-107 (sistemas equivalentes de 65 e 107 barras, respectivamente, derivados do sistema interligado nacional). Nestes sistemas, o impacto das incertezas na estabilidade de tensão foi analisado através dos seguintes índices probabilísticos: RIT, probabilidades dos estados de robustez e valores esperados da MET e do índice de influência nodal. Os resultados da APET também foram utilizados para identificar a causa raiz dos problemas de instabilidade de tensão e analisar a eficiência das ações de controle na RESFLUP. As principais conclusões obtidas com os testes podem ser resumidas da seguinte forma:

- i) Os erros de previsão de carga têm um fator de participação significativo no RIT.

- ii) As falhas nos geradores e compensadores são os principais distúrbios causadores de problemas de instabilidade de tensão nos sistemas IEEE-MRTS e EQV-107. Este efeito pode ser devido a existência de uma deficiência nas reservas de geração de potência reativa.
- iii) A principal causa de problemas de instabilidade de tensão no sistema EQV-65 são as flutuações no pico de carga devido aos erros de previsão. Isto é um indicativo de que o sistema EQV-65 está operando próximo ao ponto de máximo carregamento da rede elétrica.
- iv) As reduções na MET nodal estimadas pelo índice de influência podem ser usadas para identificar barras e áreas vulneráveis a problemas de instabilidade de tensão. O cálculo dos índices de influência esperados para o sistema EQV-107 revelou que as áreas deste sistema mais susceptíveis a problemas de estabilidade de tensão são a Sudeste e a de Mato Grosso. Estas áreas foram identificadas como críticas nos estudos realizados em [Prada, 2002] e [Granville, 1996]. Desta forma, o método proposto nesta tese mostra coerência com resultados previamente publicados na literatura técnica.
- v) Existe uma probabilidade considerável de ocorrência de estados de instabilidade de tensão no sistema EQV-65, causados pela perda de controlabilidade, mesmo quando apenas as barras PV são usadas no controle de tensão.
- vi) As técnicas de enumeração de estados e SMC produziram resultados semelhantes na APET realizada no sistema IEEE-MRTS. Contudo, o custo computacional da enumeração de estados é consideravelmente mais alto que o da SMC. Este mesmo padrão de desempenho computacional da enumeração com relação à SMC também tem sido relatado em estudos de confiabilidade no NH2 [Pereira, 1992], [Billinton, 1994], [Rei, 2008]. Portanto, os resultados obtidos nesta tese confirmam que a SMC é a técnica mais adequada para a APET no NH2.
- vii) A principal causa da instabilidade de tensão nos sistemas IEEE-MRTS e EQV-107 é a ausência de solubilidade. Todavia, estes problemas de insolubilidade podem ser eliminados sem corte de carga.

- viii) Existe uma probabilidade significativa de ocorrer uma persistência do problema de instabilidade de tensão após a RESFLUP nos sistemas EQV-65 e EQV-107.
- ix) É possível estimar os parâmetros do sistema equivalente de duas barras, associado com a matriz  $D'$ , sem violar as restrições de solubilidade das equações de fluxo de potência. O algoritmo de estimação do equivalente foi testado em todos os estados selecionados via SMC para os sistemas IEEE-MRTS, EQV-65 e EQV-107. Os resultados destes testes mostraram que não ocorreu nenhum caso de não-convergência associado com o algoritmo de estimação do equivalente.

## 7.4

### Sugestões para Trabalhos Futuros

O tema principal desta tese foi a Análise Probabilística da Estabilidade de Tensão. O futuro da pesquisa neste assunto concentra-se no desenvolvimento de modelos e técnicas computacionais para fornecer novos índices probabilísticos e simular de forma mais precisa a operação e o comportamento da rede elétrica. Desta forma, algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- **Modelagem da carga**

As cargas das barras estão associadas com uma agregação de diferentes tipos de dispositivos, tais como: lâmpadas fluorescentes e incandescentes, fornos de arco, equipamentos de refrigeração e aquecimento, motores de indução, etc. Estes dispositivos exibem características de potência de saída distintas quando submetidos às mesmas variações de tensão. Desta forma, a representação das cargas por injeções de potência constantes não corresponde ao comportamento real do sistema. Uma alternativa para contornar este problema é usar um modelo polinomial para representar a carga do sistema:

$$Pd_i = (a_i^p + b_i^p V_i + c_i^p V_i^2) Pn_i$$

$$Qd_i = (a_i^q + b_i^q V_i + c_i^q V_i^2) Qn_i$$

onde:

$a_i^P (a_i^Q)$ ,  $b_i^P (b_i^Q)$  e  $c_i^P (c_i^Q)$  são os fatores de participação na potência ativa (reativa) para as cargas do tipo potência, corrente e impedância, respectivamente.

$Pd_i (Qd_i)$  é carga ativa (reativa) na barra  $i$

$Pn_i (Qn_i)$  é carga ativa (reativa) nominal na barra  $i$

$$a_i^P + b_i^P + c_i^P = 1$$

$$a_i^Q + b_i^Q + c_i^Q = 1$$

Desta forma, a carga de uma barra é representada pela combinação dos modelos: potência constante ( $a_i^P = a_i^Q = 1$ ), corrente constante ( $b_i^P = b_i^Q = 1$ ) e impedância constante ( $c_i^P = c_i^Q = 1$ ). Os fatores de participação destes modelos na composição da carga do sistema podem aumentar ou reduzir o risco de instabilidade de tensão na rede elétrica. Os algoritmos de fluxo de potência e FPO usados nesta tese devem ser estendidos para incluir na APET o modelo de carga descrito. Além disso, pode-se considerar que as incertezas associadas com os coeficientes do modelo polinomial são modeladas por uma distribuição normal [Wu, 2009].

- **Inclusão de novas estratégias de controle de tensão**

Os estados de instabilidade de tensão, causados pela perda de controlabilidade, são caracterizados pelo efeito oposto das ações de controle durante a correção do perfil de tensão. Neste caso, ações de controle adicionais aumentam a deterioração do perfil de tensão, pois o sistema está operando na região instável da curva PV. No sistema EQV-65, a probabilidade dos estados de perda de controlabilidade foi bastante significativa, apesar do controle de tensão ser realizado apenas pelas barras PV. Consequentemente, é necessário investigar o impacto de outras estratégias de correção do perfil de tensão (ajustes de *taps* de transformadores e controle de tensão em barras remotas) nos índices propostos para a APET.

- **Modelagem de variações cronológicas na carga**

A SMC não-seqüencial é capaz de modelar flutuações na carga causadas por erros de previsão. Entretanto, as flutuações na carga são também causadas pela variação na demanda ao longo de um período especificado. As variações temporais na carga podem ser incluídas na APET usando-se a SMC Seqüencial [Billinton, 1992], [Li, 2005]. Adicionalmente, esta técnica permite modelar diversos aspectos cronológicos na APET, tais como: manutenções programadas, séries temporais de disponibilidade de potência em usinas hidroelétricas e variações sazonais na potência de saída de usinas que usam fontes alternativas de energia (eólica, solar e maremotriz). Desta forma, o método proposto nesta tese pode ser expandido para modelar variações temporais na carga através da aplicação da SMC Seqüencial. Esta expansão possibilitará uma avaliação da evolução temporal dos índices probabilísticos de estabilidade de tensão para um certo horizonte de tempo. Além disso, a SMC Seqüencial é capaz de estimar facilmente índices de frequência e duração associados com estados instáveis. É importante lembrar que a APET, com representação cronológica das incertezas, tem um custo computacional elevado. Contudo, esta dificuldade pode ser minimizada usando-se técnicas de processamento paralelo. Estas técnicas têm sido aplicadas em estudos de confiabilidade composta para reduzir o esforço computacional da SMC seqüencial [Borges, 2001].

- **Customização do Método de Enumeração de Estados**

A principal restrição com relação à aplicação do método de enumeração de estados, em estudos probabilísticos no NH2, é o seu alto custo computacional. Este custo é devido à necessidade de modelar contingências de alta ordem para obter uma cobertura aceitável do espaço amostral. Esta desvantagem não diminuiu o interesse pelo método de enumeração de estados, pois ele é uma extensão direta do critério N-1 usado em muitas empresas de energia elétrica. Além disso, o método de enumeração é flexível para incorporar a experiência do usuário na definição da lista de contingências. Estas características atrativas motivaram o desenvolvimento de diversas melhorias no método de enumeração, por exemplo: ordenação de contingências conforme a sua severidade [Billinton,

1989], [Yang, 2007]; classificação dos estados em ordem decrescente de probabilidade [Liu, 2008] e o agrupamento de componentes idênticos [Billinton, 1987], [Billinton, 1988]. Desta forma, é importante avaliar as reduções nos custos computacionais obtidas com a introdução destas características intrínsecas ao problema no método de enumeração.

- **Análise de sensibilidade do RIT com relação ao despacho de geração**

Nesta tese, o despacho de geração em sistemas hidroelétricos é realizado através da minimização da distância Euclidiana entre a potência de saída das usinas e um padrão de geração especificado. Este tipo de despacho é função de diversos parâmetros definidos pelo usuário, tais como: ponto de operação especificado e pesos das usinas. Desta forma, é importante avaliar o efeito das variações nestes parâmetros no RIT. Por exemplo, é possível definir os pesos relativos das usinas com base nas suas energias asseguradas. As energias asseguradas são usadas como fatores de participação para a alocação de carga entre as usinas no programa NODAL [ANEEL, 2005]. Este programa é usado pelo EPE (Empresa de Pesquisa Energética) para calcular as tarifas de uso do sistema de transmissão. Além disso, é importante considerar a minimização do desvio quadrático com relação a outras variáveis do sistema tais como os fluxos nos intercâmbios entre áreas. Este tipo de despacho pode ter grande impacto no RIT, pois problemas de instabilidade de tensão estão associados com transferências de potência excessivas nas interligações da rede elétrica. Consequentemente, a minimização das transferências de potência nos intercâmbios pode causar uma redução no RIT.

- **Inclusão de Restrições de Perda de Controlabilidade na RESFLUP**

Nesta tese a RESFLUP foi realizada através da solução de um problema de fluxo de potência ótimo não-linear. Este problema tem como objetivo minimizar o corte de carga sujeito as seguintes restrições: equações de balanço de potência ativa e reativa, limites nas injeções de potência e faixas de operação para as tensões nas barras PV e V $\theta$ . Estas restrições são suficientes para eliminar estados instáveis causados pela ausência de solubilidade. Contudo, podem ocorrer problemas de instabilidade de tensão associados com a perda de

controlabilidade após a RESFLUP. Por exemplo, o valor mínimo da probabilidade de um estado ter problemas de perda de controlabilidade, após a RESFLUP, nos sistemas-teste brasileiros é 4.5376%. Desta forma, é importante expandir os modelos de FPO usados na RESFLUP para incluir restrições de estabilidade de tensão associadas com a perda de controlabilidade. A inclusão destas restrições eliminaria a ocorrência simultânea dos dois mecanismos causadores da instabilidade de tensão.

- **APET considerando a inserção de geração eólica**

Recentemente, foram aprovadas regras para participação de geração eólica no mercado de energia elétrica nacional [EPE, 2009], [MME, 2009]. O desenvolvimento destas regras foi motivado pelos seguintes fatores: tendência mundial para a utilização de fontes de energia renováveis, diversificação da matriz energética nacional e grande potencial da região nordeste para a geração de energia eólica. A participação de geração eólica no mercado de energia elétrica pode causar mudanças significativas nas condições de segurança de tensão da rede elétrica. Além disso, a produção de energia neste tipo de geração é de natureza aleatória devido ao comportamento estocástico da velocidade do vento. Desta forma, é oportuno realizar uma APET considerando a penetração de geração eólica na rede elétrica.