



**GRUPO IX**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)**

**MEDIDAS OPERATIVAS DE CURTO PRAZO NO CONTROLE DE COLAPSO DE TENSÃO**

Luiz Cláudio de Araújo Ferreira\*  
FURNAS

Antônio Carlos Zambroni de Souza  
Escola Federal de Engenharia de Itajubá  
EFEI

Sérgio Granville  
CEPEL

**RESUMO**

O presente artigo relata as ocorrências no sistema interligado Sul/Sudeste brasileiro ligadas ao fenômeno de colapso de tensão, mostrando como a associação de ágeis e robustas técnicas de análise estática é capaz de estabelecer uma atraente metodologia para controle do fenômeno a curto prazo.

Utilizando os métodos de pontos interiores nas otimizações, o método da continuação no cálculo da margem de carga do sistema e a técnica do vetor tangente na sinalização de áreas críticas para ações de controle, o artigo propõe uma filosofia de controle de tensão baseada na otimização dos recursos do sistema como também uma técnica para alocação de recursos adicionais. A aplicação da metodologia desenvolvida em um caso real do sistema elétrico brasileiro, habilitam as idéias propostas para uso prático em estudos de planejamento e na operação de sistemas elétricos de potência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Colapso de Tensão, Fluxo Ótimo, Vetor Tangente.

**1. INTRODUÇÃO**

A combinação do elevado crescimento do consumo de energia elétrica com o aumento das incertezas no âmbito do planejamento da expansão, contribuíram para a ampliação das dificuldades de decisão de novos investimentos em sistemas elétricos e no conseqüente esgotamento dos recursos deste sistema no horizonte de operação a curto prazo.

A operação dos grandes troncos de transmissão com carregamentos próximos dos limites, ajudada pelas soluções hoje apresentadas para a estabilidade angular,

contribuíram para o aumento das perdas de potência reativa, para o esgotamento dos recursos deste tipo de potência e para os problemas de estabilidade de tensão.

Ocorrências recentes no sistema elétrico brasileiro ilustraram com casos reais o mecanismo de colapso de tensão e confirmaram as discussões à respeito da natureza do fenômeno, mostrando que o sistema pode atingir um ponto de colapso através de pequenas perturbações.

A seção 2 deste artigo mostra como as perturbações sofridas confirmaram a relação da instabilidade de tensão com o esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema, indicando a urgente necessidade da otimização destes recursos. Neste cenário, foi buscada, pelas equipes de planejamento da operação, uma política de gerenciamento dos recursos além de ferramentas e técnicas de análise capazes de garantir o seguro desempenho do sistema.

A seção 3 aborda as medidas propostas de curtíssimo prazo de forma a controlar o problema. Uma filosofia otimizada de controle é mostrada em um caso real do sistema elétrico brasileiro.

A seção 4 propõe uma técnica para alocação de compensação shunt de forma a garantir o aumento da margem de carga do sistema em relação à estabilidade de tensão e a seção 5 conclui o artigo.

**2. OCORRÊNCIAS RECENTES**

Duas ocorrências em Abril e outra em Novembro no ano de 1997, ligadas ao fenômeno de instabilidade de tensão, acometeram o sistema elétrico brasileiro no ano de 1997.

\* FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS

Nos dias 24 e 25 de Abril de 1997, uma demanda de carga recorde no sistema e uma combinação de manutenção em importantes equipamentos de controle de tensão, culminaram com uma interrupção de suprimento de cerca de 7600 Mw no sistema S/SE/CO brasileiro [1].

No dia 24, a área São Paulo já se encontrava com baixo perfil de tensão e com todos os recursos esgotados no início de sua rampa de carga (780 Mw/10 minutos). A rápida tomada de carga e o esgotamento dos compensadores síncronos de Ibiúna, fizeram com que a tensão do barramento de 345 kV, controlados por estes síncronos, caísse rapidamente, provocando a atuação da proteção de sobre-excitação de um dos três compensadores síncronos em operação nesta estação. A interrupção de cerca de 320 Mvar gerados por este síncrono ocasionou mais queda de tensão, provocando a atuação dos relés de subtensão dos centros de cargas essenciais de Ibiúna, a interrupção da alimentação para os serviços auxiliares dos síncronos remanescentes e o desligamento automático destes, indisponibilizando mais 650 Mvar.

A indisponibilidade de quase 1000 Mvar em acentuada rampa de carga provocou o desligamento automático do bipolo 2 do elo CC, ligado ao barramento de 345 kV de Ibiúna, pela atuação das proteções de mínima tensão DC, rejeitando 3000 Mw, e o desligamento automático de dois outros síncronos importantes para a área São Paulo - T. Preto (300 Mvar) e Embuguauçu (250 Mvar).

Após estes desligamentos o sistema operou num quadro de subfrequência e subtensão, com as ações pré-estabelecidas para corte de carga manual para subfrequência sendo tomadas no período de carga ainda crescente, dificultando o restabelecimento das condições normais de operação.

A entrada da rampa de carga da área Rio de Janeiro/Espírito Santo, área vizinha à área São Paulo, fez com que piorasse ainda mais o cenário de subtensão e houvesse o desligamento automático da unidade termonuclear Angra 1 (620 Mw), localizada naquela primeira área.

O desligamento automático do bipolo remanescente do elo CC com 2386 Mw, finalizou a seqüência de eventos, fazendo com que a frequência atingisse 58,10 Hz e provocando a atuação dos 1 e 2<sup>os</sup> estágios do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC).

No dia 13 de Novembro de 1997, a coincidência de temperaturas elevadas na região sudeste também provocou um rápido esgotamento dos recursos de potência reativa e um afundamento generalizado da tensão do sistema. O desligamento automático de uma linha de transmissão em 230 kV, com cerca de 160

Mw, provocou um colapso de tensão, e rejeição de 1210 Mw na Área Rio de Janeiro / Espírito Santo.

As perturbações sofridas pelo sistema elétrico brasileiro confirmaram as discussões à respeito da natureza do fenômeno de colapso de tensão, mostrando que o sistema pode atingir um ponto de colapso através de pequenas perturbações. Esta característica, junto com outras considerações, permite o uso de equações de fluxo de carga para modelar alguns comportamentos dinâmicos de um sistema elétrico [2].

A busca de um índice capaz de prever o ponto de colapso de tensão a partir de um ponto de operação conhecido tem sido largamente estudada na literatura. A idéia é, para um ponto de operação conhecido, estimar a variação de carga para a qual o sistema se mantenha estável.

Nas proximidades do ponto de colapso de tensão a matriz Jacobiana torna-se mal condicionada e a convergência do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson pode não ser possível. A referência [3] compara diversos métodos para identificação do ponto de colapso, mostrando que nenhum deles apresenta comportamento previsível. Como estes métodos utilizam o fluxo de carga convencional (Newton-Raphson), algumas informações importantes, como identificação da barra crítica, podem ser erroneamente interpretadas, uma vez que a referência [3] mostra que variações bruscas no comportamento destes índices podem ocorrer próximo ao ponto de colapso de tensão. Na referência [4] esta comparação foi feita com o auxílio do método da continuação, de forma que o problema de mal condicionamento da matriz Jacobiana não se manifesta. O método da continuação foi exaustivamente discutido na literatura e, por esta razão, não será apresentado neste artigo. O leitor interessado poderá consultar as referências [4, 5, 6] onde os conceitos fundamentais do método são apresentados.

Outro método de convergência robusto que otimiza o despacho de potência reativa foi proposto [7] e incorporado em um programa de fluxo de potência ótimo - FLUPOT [8]. Este programa tornou-se uma ferramenta importante na análise de sistemas elétricos de potência sobretudo pela necessidade de consideração, na análise de colapso de tensão, de todos os limites e recursos para controle de tensão do sistema e as crescentes dificuldades de convergência dos programas de fluxo de potência convencional sob esta consideração.

### 3. MEDIDAS OPERATIVAS DE CURTÍSSIMO PRAZO

As ocorrências de Abril e Novembro de 1997, mostram a dependência do sistema em relação aos recursos de

potência reativa e a necessidade urgente de uma otimização destes recursos e do controle de tensão. Atendendo este objetivo, Furnas propôs, nos grupos de estudos, mudança no modo de controle do Elo CC [9], apoiou tecnicamente o estudo da viabilidade da retirada de reatores do sistema de 440 kV da CESP [10] e sugeriu, no Grupo Comitê da Operação Interligada - GCOI, uma filosofia otimizada de controle de tensão associada a uma metodologia para aplicação de um critério de corte de carga, como último recurso, para garantir a segurança do sistema sob vários cenários [11].

### 3.1. Otimização dos recursos de potência reativa

O comum defasamento entre as pontas de carga de grandes áreas do sistema elétrico brasileiro torna a definição de cenários de carregamentos importante para ajuda mútua e melhor exploração dos recursos de potência reativa através da adoção de uma filosofia de controle de tensão apropriada a cada condição particular. Entretanto, a mútua influência entre as áreas torna necessário o estabelecimento de pré-condições para que a área auxiliadora não seja prejudicada no final do processo.

#### Filosofia otimizada de controle de tensão

A referência [11] mostra como um programa de otimização pode ser muito útil para a adequação de uma filosofia de controle de tensão a um determinado cenário de carga. Através do FLUPOT buscou-se uma filosofia de controle de tensão que favorecesse o crescimento de carga de uma determinada área sem que houvesse violação das faixas de tensões da área vizinha ou remetimento desta a uma operação em regime de alerta. Adicionalmente, instruiu-se o programa para usar os recursos de controle de tensão de forma a manter uma maior disponibilidade possível de potência reativa nas máquinas síncronas visando assegurar, prontamente, a rápida demanda de reativo na transição entre períodos de carga.

Como o fenômeno de instabilidade de tensão está associado ao esgotamento dos recursos de potência reativa do sistema, a principal estratégia na procura de uma filosofia de controle de tensão foi a da otimização da disponibilidade destes recursos.

As manobras de equipamentos de controle de tensão requerem coordenação e as solicitações de atendimento à carga costumam ser rápidas. Desta maneira, a busca de uma filosofia que privilegiasse a pronta disponibilidade de potência reativa foi perseguida.

Com o objetivo de aumentar a margem de carga do sistema em relação ao colapso de tensão, buscou-se otimizações dos recursos de controle de tensão do sistema de forma a melhorar sua disponibilidade de

potência reativa, através de funções objetivo que minimizassem as perdas elétricas e/ou minimizassem a geração de potência reativa nos geradores do sistema.

### Resultados

A Tabela 1 mostra um quadro comparativo das otimizações com o objetivo de melhorar a disponibilidade de potência reativa e aumentar a margem de carga na região sudeste do sistema elétrico brasileiro. A segunda coluna mostra um sumário do caso base, enquanto as colunas seguintes apresentam os resultados obtidos quando o FLUPOT é usado para:

- Minimizar perdas na região de interesse (sudeste).
- Minimizar geração de potência reativa em todas as máquinas da região de interesse.
- Minimizar geração de potência reativa nos compensadores síncronos localizados na área de interesse.

O método da continuação, incorporado em um programa de fluxo de potência desenvolvido em Furnas – LFLOW [12], é usado para avaliar os resultados das otimizações na margem de carga em relação ao colapso de tensão ( $\lambda$ ).

TABELA 1 – Otimização dos Recursos Disponíveis

Sumário	Base	Perdas	Máquinas	Síncronos
Geração Reativa Global	2919	2167	4239	3651
Geração Reativa Sudeste	-164	-634	752	248
Shunt (Mvar)	4874	4959	4937	4880
Perdas Reativas	-6943	-7602	-5553	-6196
Disponibilidade Potência Reativa	-	1496	-2648	-1474
$\lambda$ (%)	2,60	1,68	2,82	4,32
$\lambda$ (Mva)	780	442	742	1138

Na Tabela 1 observa-se que a otimização que visou a redução de perdas, dentre todas as funções objetivo escolhidas, foi a única que possibilitou um ganho na margem de potência reativa do sistema em relação ao caso base. Nota-se também que tanto a minimização de geração em todas as máquinas da área de interesse, como também a minimização de geração de potência reativa nos síncronos, provocam uma redução na disponibilidade de potência reativa do sistema. A função custo adotada nas minimizações de geração de potência reativa, é a quadrática, passando pela origem dos eixos, ou seja, os ajustes no sistema são buscados de forma a minimizar a geração ou absorção deste recurso nos geradores da área de interesse, preparando o sistema também para perda de grandes blocos de carga.

Na Tabela 1, observa-se também que a geração de potência reativa nos geradores é reduzida na medida em que há uma diminuição do número de geradores que participam da otimização, indicando, portanto, que algumas máquinas da área de interesse precisam ter suas gerações de potência reativa exploradas a fim de evitar a importação deste recurso de áreas vizinhas e o conseqüente aumento das perdas através de longos troncos de transmissão. A concentração da minimização da geração de potência reativa em geradores próximos às áreas críticas ao aumento de carga e a liberação da geração deste recurso nos demais geradores do sistema, resultou em uma melhor otimização desta geração nos geradores da área de interesse e em ganho na margem de carga do sistema, apesar destes ajustes implicarem na redução da disponibilidade deste tipo de potência. Uma técnica para a determinação da área crítica ao colapso de tensão é proposta na seção seguinte.

Uma outra importante observação é que os ajustes que possibilitaram a redução de perdas, não implicaram em um aumento da margem de carga do sistema, apesar do ponto de colapso de tensão estar associado a altas perdas no sistema.

Na minimização de perdas observou-se que os ajustes necessários para este objetivo possibilitaram um ganho de cerca de 1500 Mvar na disponibilidade de potência reativa, mas um fraco resultado na ampliação da margem de carga do sistema. Por outro lado, a minimização da geração de potência reativa nos síncronos resultou em ganho na margem de carga, mesmo com uma redução de cerca de 1500 Mvar naquela disponibilidade.

Com a intenção de reunir os melhores desempenhos das otimizações *Perdas e Síncronos*, instruiu-se o FLUPOT com dupla função objetivo: minimizar perdas e geração nos síncronos, dando origem à otimização *Perdas + Síncronos*. A Tabela 2 destaca o sucesso na busca de ajustes de forma a manter uma disponibilidade nos compensadores síncronos próximos às áreas críticas e garantir, ao mesmo tempo, um aumento na disponibilidade de potência reativa provocado pela redução das perdas.

TABELA 2 – União de Otimizações

Sumário	Perdas + Síncronos
Geração Reativa Global	2171
Geração Reativa Sudeste	-671
Shunt (Mvar)	4983
Perdas Reativas	-7575
Disponibilidade Potência Reativa	1488
$\lambda$ (%)	4,53
$\lambda$ (Mva)	1194

Na Tabela 2, observa-se que a união das funções objetivo apresentou um pequeno ganho na margem de carga em relação ao já conseguido na otimização *Síncronos* (Tabela 1), apesar da diferença de cerca de 3000 Mvar na disponibilidade de potência reativa entre estas otimizações, sugerindo uma limitação ao crescimento da margem de carga por parte de um grupo de barras críticas a este crescimento e a necessidade de ações de controle para melhor exploração da disponibilidade conseguida.

#### 4. AÇÕES DE CONTROLE

A referência [13] descreve o colapso de tensão como um fenômeno que se espalha pela vizinhança. Desta forma, a determinação da barra crítica é de fundamental importância para a análise do fenômeno. Por barras críticas entende-se as barras cujas variáveis de estado apresentam maior variação no ponto de colapso. Sabe-se que no ponto de colapso, pequenas variações de carga produzem grandes variações de tensão. Entretanto, a barra crítica avaliada em um ponto de operação conhecido pode não ser a mesma no ponto de operação seguinte. Assim, a maioria dos métodos propostos somente identificam a barra crítica no ponto de colapso, dificultando as ações para controle do fenômeno.

O uso do vetor tangente como índice de previsão do ponto de colapso de tensão e para a identificação das barras críticas, foi proposto nas referências [14, 15].

O vetor tangente é usado como passo predictor no método da continuação [4] e é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta q_g \\ \Delta q_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta \lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_{go} \\ P_{lo} \\ Q_{lo} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde  $\lambda$  é o parâmetro que conduz o sistema de um ponto de equilíbrio para outro, usualmente uma fator aplicado à carga total;  $J$  é a matriz Jacobiana do fluxo de carga;  $g$  e  $l$  referem-se as barras de geração e carga, respectivamente;  $P_{go}$ ,  $P_{lo}$ ,  $Q_{lo}$  são as potências ativa e reativa iniciais, enquanto  $q$  é o ângulo de fase e  $V$  o módulo da tensão.

O vetor tangente mostra como as variáveis de estado mudam na presença de uma variação paramétrica  $\lambda$ . Este vetor pode ser facilmente calculado e a referência [15] mostra que ele pode identificar a barra crítica previamente, em pontos afastados do ponto de colapso de tensão, tornando esta técnica atraente principalmente para ações de controle em tempo real [16].

#### 4.1. Considerando instalação de compensação shunt

A seção anterior mostrou que um ganho significativo na margem de carga do sistema pode ser obtido através de ajustes sugeridos por um programa de otimização. Contudo, este ganho atingiu um limite de forma que uma ação de controle em uma região crítica pareceu ser necessária para um novo aumento da margem de carga.

A idéia aqui proposta consiste na combinação das técnicas de otimização e do vetor tangente. Esta última é usada para identificar as barras críticas sob o ponto de vista de colapso de tensão de forma a fornecer um grupo para o programa de fluxo de potência ótimo - FLUPOT. A técnica de otimização é usada para quantificar o montante da compensação shunt adicional atendendo ainda, diferentes funções objetivo.

O uso desta metodologia também em grupo de barras candidatas à redução de perdas e a comparação dos efeitos dessa compensação, na margem de carga do sistema, com a praticada em grupos de barras críticas, é tratada na referência [17].

No ponto de máximo carregamento obtido na Tabela 2, foram calculadas, pelo LFLOW, as 30 barras mais críticas pelo método do vetor tangente. Para este grupo de barras e a partir do ponto de máximo carregamento (4,53%), o FLUPOT calculou o montante mínimo de compensação shunt de forma a atender a função objetivo *Perdas+Síncronos* (otimização que mostrou melhor resultado). O caso, com a compensação adicional, é reajustado com o FLUPOT e o ganho na margem de carga é então mais uma vez calculado pelo LFLOW através do método da continuação. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.

TABELA 3 – Compensação Shunt

Compensação Shunt	Nível Ótimo	Nível Aumentado
Montante (Mvar)	108	170
Disponibilidade Potência Reativa	932	1078
$\eta$ (Mvar/Mvar)	8.6	6.3
$\lambda$ (%)	2.90	2.91
$\lambda$ (Mva)	796	799
Ganho (Mva/Mvar)	7.4	4.7

Na Tabela 3, observa-se que a metodologia proposta para compensação foi capaz de aumentar em cerca de 800 Mva a margem de carga do sistema, além dos 1194 Mva anteriormente conseguidos com a otimização dos recursos pré-existentes. A união das técnicas de otimização e do vetor tangente foi capaz de especificar uma compensação shunt ótima de forma a se obter maior margem de carga com um mínimo de compensação. Os resultados apresentados na última coluna da Tabela 3, mostram claramente que o aumento da compensação mostrou-se inefetivo através

da análise da relação  $Mva/Mvar$ , significativamente menor.

## 5. CONCLUSÕES

A curto-prazo, o corte de carga é a ação mais comum para controle do fenômeno de colapso de tensão, em virtude dos prazos envolvidos para o aumento da margem de carga através da expansão do sistema. Este artigo mostrou que a incorporação, em um programa de fluxo de potência ótimo, de informações obtidas pela técnica do vetor tangente parece promissora por permitir previamente a identificação de barras críticas para a ação de controle, ao mesmo tempo que assegura a utilização de todos os recursos operativos do sistema, antes da tomada deste tipo de decisão.

Este artigo também mostrou que os ajustes nos recursos de controle de tensão de forma a minimizar as perdas de potência reativa podem reduzir a margem de carga do sistema, apesar do aumento na disponibilidade de potência reativa que esta atuação oferece ao sistema.

A concentração da minimização da geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas sinalizadas como críticas à estabilidade de tensão pelo método do vetor tangente e a liberação da geração deste recurso nos demais geradores do sistema, pode resultar em ganho na margem de carga do sistema, mesmo que estes ajustes signifiquem em redução na disponibilidade deste tipo de potência.

A união de otimizações que objetivem ao mesmo tempo a minimização de perdas e geração de potência reativa nos geradores próximos às áreas críticas, pode sugerir ajustes ótimos nos recursos do sistema de forma a elevar significativamente sua margem de carga e a disponibilidade de potência reativa até um limite em que uma ação de controle é necessária para a utilização da disponibilidade conseguida. Nestes casos, a união das técnicas propostas foi capaz de especificar valores e localizar compensação shunt adicional de forma a se obter maior margem de carga com um mínimo de compensação.

Estes resultados qualificam a técnica proposta em estudos do planejamento da operação, onde as ações visando o aumento de margem de carga são baseadas atualmente em ajustes ou alocação de compensação adicional de forma a reduzir as perdas ou geração de potência reativa no sistema, na medida em que alerta para os riscos dessa metodologia e propõe em troca, uma atraente estratégia de otimização dos recursos de potência reativa.

Por estar baseada em ágeis e robustas técnicas de análise estática, a metodologia proposta é também indicada para utilização em tempo real, sinalizando de forma segura aos operadores do sistema, ajustes nos

recursos de controle de tensão, visando o aumento da margem de carga e os impactos de impedimentos destes recursos nesta margem a cada condição operativa.

## 6. REFERÊNCIAS

1. GCOI - Grupo Coordenador para Operação Interligada, *Análise das perturbações dos dias 24 e 25/04/97 no sistema interligado S/SE/CO*, Relatório SCO/SCEL-01/97, 1997.
2. SAUER, P. W., PAI, M. A., "Power system steady-state stability and the load-flow Jacobian", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.5, n.4, pp. 1374-1381, 1990.
3. CAÑIZARES, C. A., SOUZA, A. C. Z., QUINTANA, V. H., "Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.11, n.3, pp. 1441-1447, August 1996.
4. CAÑIZARES, C. A., ALVARADO, F. L., "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.8, n.1, pp. 1-8, 1993.
5. VENKATARAMANA, A., COLLIN, C., "The Continuation Power Flow: a Tool for Steady-State Voltage Stability Analysis," *IEEE PICA Conference Proceedings*, pp. 304-311, May 1991.
6. SEYDEL, R., *From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis*, Elsevier Science, North-Holland, 1988.
7. GRANVILLE, S., "Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.9, n.1, pp. 136-142, February, 1994.
8. GRANVILLE, S., LATORRE, M. L., OLIVEIRA, M. L. G., PEREIRA, L. A. C., *Programa de Fluxo de Potência Ótimo - FLUPOT, Manual de Usuário - V.4.2 - 01/99*, Cepel, 1999.
9. MACEDO, N. J. P., MENZIES, D. F., SANTO, S. E., FERREIRA, L. E. S., DAMIÃO, C. H. B. P., "Instalação de um Limitador de Mínimo na Tensão Ud do Elo de Corrente Contínua", Nota Técnica DEEE.O 09/1997, Furnas Centrais Elétricas, 1997.
10. RIBEIRO, C., et al., "Estudos para Retirada de Reatores no Sistema de 440 kV da CESP", *VI Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning*, May 1998.
11. FERREIRA, L. C. A., "Medidas Operativas para Evitar Colapso de Tensão no Sistema Interligado Sul/Sudeste", Nota Técnica DANS.O.003.97, Furnas Centrais Elétricas, Outubro 1997.
12. JARDIM, J. L. A., SILVA NETO, C. A., FERNANDES, M. A., *Programa de Fluxo de Potência para Sistema de Avaliação Dinâmica - LFLOW, V.1.2 - Manual do Usuário*, Furnas Centrais Elétricas, 1998.
13. MANSOUR, Y., "Industry Practice in Voltage Stability Analysis of Power Systems", *Bulk Power System Voltage Phenomena - III, Voltage Stability, Security & Control*, 22-26 August 1994, Davos, Switzerland.
14. SOUZA, A. C. Z., CAÑIZARES, C. A., QUINTANA, V. H., "Critical Bus and Point of Collapse Determination Using Tangent Vectors", *28th North American Power Symposium*, pp. 329-333, Cambridge, 1996.
15. SOUZA, A. C. Z., CAÑIZARES, C. A., QUINTANA, V. H., "New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors", *IEEE/PES Summer Meeting*, Paper PE-219- PWRS-0-11-1996, Berlin, July 1997.
16. FERREIRA, L. C. A., SOUZA, A. C. Z., GRANVILLE, S., "Uma Proposta para Implantação de Controle Automático de Colapso de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência", *XII Congresso Brasileiro de Automática*, Uberlândia, 1998.
17. FERREIRA, L. C. A., *Uma Avaliação da Estabilidade de Tensão Abordando Perdas Elétricas em Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado, EFEI, Minas Gerais, 1999.

## BIOGRAFIAS

**Luiz Cláudio A. Ferreira** nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1961. Foi graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET), em 1990. Em 1999, foi graduado como mestre em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia Elétrica de Itajubá, Minas Gerais. Admitido em Furnas em 1982, trabalhou nas áreas de operação e de planejamento da operação por 16 anos. Atualmente presta serviço como profissional cedido ao Operador Nacional do Sistema, no Centro de Operação Regional Sudeste.

**Antônio C. Zambroni de Souza** nasceu em Volta Redonda, Brasil, em 1963. Em 1987 foi graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Em 1990, obteve seu grau de mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC). Seu Ph.D. em Engenharia Elétrica foi obtido em 1995 pela Universidade de Waterloo, Canadá. Atualmente é pesquisador e Professor Assistente da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Minas Gerais.

**Sérgio Granville** foi graduado em Matemática em 1971 e mestre em Matemática Aplicada em 1973, ambos pela PUC/RJ. Seu Ph.D. em Pesquisa Operacional foi obtido em 1978 pela Universidade de Stanford. Desde de 1986, é Pesquisador Sênior do Centro de Pesquisas Elétricas (CEPEL), no Rio de Janeiro.