



**GRUPO IV  
ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)**

**AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA SIMULAÇÃO E ANÁLISE  
DO FENÔMENO DE INSTABILIDADE E COLAPSO DE TENSÃO**

Amélia Yukie Takahata *	Luiza Carijó	Antônio Carlos Barbosa Martins	Anderson Cortez	Luiz B. Aguiar
LIGHT	FURNAS	FURNAS	CEMIG	COELBA
Édiu Campos	Arlindo Faria Neto	Albert G.Melo	Sérgio Granville	
ELETROSUL	COPEL	CEPEL	CEPEL	

**FORÇA TAREFA DE ESTABILIDADE DE TENSÃO - GTCP**

**RESUMO:**

O artigo descreve sucintamente as ferramentas utilizadas na análise de instabilidade e colapso de, com ênfase no planejamento de sistemas de transmissão. Apresenta os resultados para um caso real de sistema de pequeno porte, analisado em separado e também integrado ao sistema de grande porte. Analisa ainda algumas aplicações em outros sistemas. O trabalho propõe relatar a interpretação das soluções encontradas e destacar as potencialidades das ferramentas, bem como discutir a influência da modelagem da carga e dos controles sobre o fenômeno em foco. Os resultados das simulações efetuadas com tais ferramentas apresentaram coerência e podem contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno de instabilidade de tensão. Conclui-se que a utilização do ferramental disponível deve ser feita de forma complementar já que os programas permitem análises distintas dos aspectos que envolvem o fenômeno de instabilidade de tensão.

**PALAVRAS CHAVE :** Estabilidade de Tensão, Colapso de tensão, Margem de Carga, Modelagem da Carga, Controles.

**1. INTRODUÇÃO**

O sistema elétrico brasileiro tem apresentado um agravamento de suas condições de operação decorrente de um acentuado crescimento do mercado e de restrições financeiras que dificultam a aplicação de investimentos necessários para melhoria do seu desempenho e atendimento às cargas. Assim, os componentes do sistema são solicitados a operar em condições mais próximas a seus limites, e o sistema como um todo apresenta um comportamento crítico, conduzindo com mais frequência a situações de instabilidade de tensão.

Devido a essa situação foi criada uma Força Tarefa no âmbito do planejamento, com participantes de várias empresas do setor, para análise do ferramental disponível e estabelecimento de metodologia e de critérios com relação ao fenômeno de instabilidade de tensão.

O objetivo deste artigo é avaliar as ferramentas atualmente disponíveis no Brasil para análise estática do fenômeno de instabilidade de tensão, apresentar os resultados para sistemas reais e levantar os aspectos relevantes para o estabelecimento de critérios e procedimentos tais como: modelagem da carga, identificação da abrangência do problema (instabilidade localizada ou global), determinação das áreas de influência e atuação de controles.

**2. DESCRIÇÃO SUCINTA DAS FERRAMENTAS UTILIZADAS**

As metodologias mais utilizadas internacionalmente são baseadas em levantamentos de curvas P<sub>x</sub>V e V<sub>x</sub>Q, além de utilização de técnicas de análise modal. As ferramentas avaliadas foram os programas NH2, ANAREDE e PACDYN, por estarem disponíveis para a maioria das empresas de energia elétrica do Brasil. Esses programas vêm incorporando novas funções e aperfeiçoamentos, conforme destacado a seguir.

O **Programa NH2**, desenvolvido originalmente para estudos de confiabilidade, incorporou a técnica de otimização de pontos interiores, que permite maior robustez no processo de convergência do fluxo de potência, alcançando soluções próximas ao “nariz da curva” P<sub>x</sub>V. Com os recursos da otimização é possível se obter o ponto de máximo carregamento, de forma análoga ao identificado por método

de continuação, e o ponto de máximo carregamento com otimização do crescimento de carga, além de indicar as barras críticas e o mínimo corte de carga para restaurar a solubilidade do caso.

O Programa **ANAREDE** foi implementado com técnicas que permitem maior robustez no processo de convergência, traçado automático da parte superior da curva PxV e traçado das curvas VxQ.

O Programa **PACDYN**, desenvolvido originalmente para estudos de estabilidade eletromecânica a pequenas perturbações, foi complementado com rotinas para avaliação de estabilidade de tensão, utilizando a análise modal, permitindo a identificação das barras críticas, dos melhores locais para alocação/atuação de equipamentos para controle de tensão e aumento da margem.

### 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA ANALISADO

Para a avaliação das ferramentas disponíveis, optou-se preliminarmente por analisar um sistema que atualmente vem apresentando problemas com relação a estabilidade de tensão, descrito a seguir.

A região Leste de Minas Gerais é suprida por uma linha de transmissão de 500 kV Neves-Mesquita, por três linhas de 230 kV que partem da SE Taquaril, e conta com uma interligação em 230 kV com a ESCELSA, através da LT Conselheiro Pena-Mascarenhas.

A análise foi dividida em duas etapas, a primeira contemplando somente a parte mais crítica desse sistema, que compreende os níveis de tensão de 138 kV e 230 kV, totalizando-se 423 km de linhas e uma carga de 340 MW. Na segunda etapa, avaliou-se o problema considerando essa área integrada ao sistema completo Sul-Sudeste.

A Figura 1 apresenta um diagrama unifilar simplificado do sistema da região em análise.

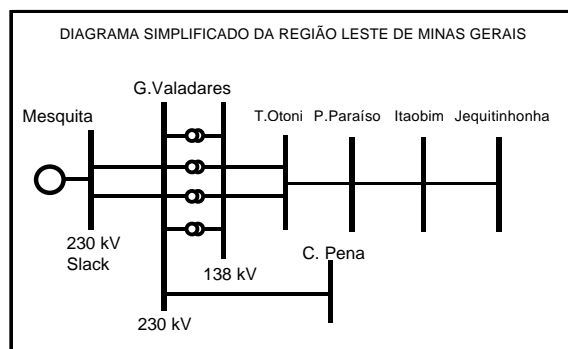


FIGURA 1 - Diagrama Unifilar

### 4. ANÁLISE PARA SISTEMA DE PEQUENO PORTE

Foram efetuados processamentos com cada programa, inicialmente para o sistema simplificado, considerando as seguintes situações:

- Processamentos com modelagem da carga tipo potência constante, sem a atuação dos tapas da transformação de Governador Valadares e processamentos similares com modelagem tipo impedância constante;
- Processamentos com modelagem da carga tipo potência constante, com a atuação dos tapas da transformação de Governador Valadares e processamentos similares com modelagem tipo impedância constante;
- Processamentos com modelagem da carga tipo impedância constante, com a atuação dos tapas da transformação de Governador Valadares e incluindo a representação da transformação 138-13,8 kV, com LTC, em Jequitinhonha.

### Programa NH2

Para levantamento de curvas PxV, representativas das situações descritas acima, foram efetuados processamentos sistemáticos de incremento de carga. De forma ilustrativa, os resultados referentes a situação “a” são apresentados nas Figuras 2 a 5.

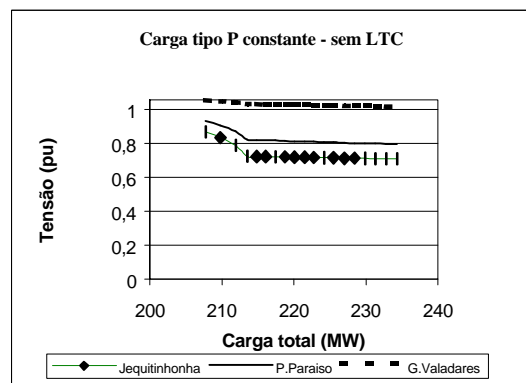


FIGURA 2 - Curvas PxV em Função da Carga Total

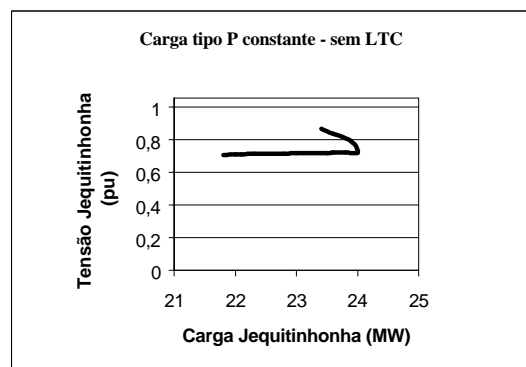


FIGURA 3 - Curva PxV da Barra Jequitinhonha 138 kV em Função da Carga Própria

Pode-se observar que o aumento máximo de carregamento obtido para a área, sem otimização do crescimento de carga e com modelagem da carga tipo potência constante, foi da

ordem de 2,7%. Um aumento de carga da região acima desse valor só seria possível com a redução da carga efetiva das barras mais críticas, como Jequitinhonha (Figura 3).

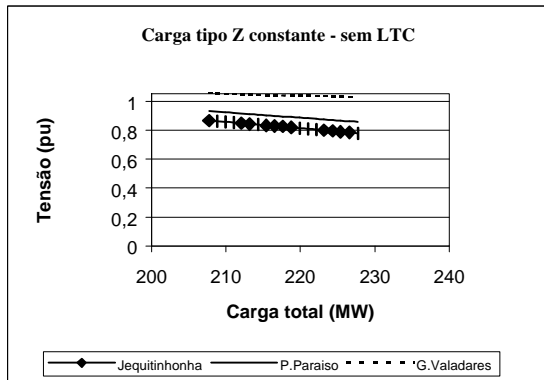


FIGURA 4 - Curvas PxV em Função da Carga Total

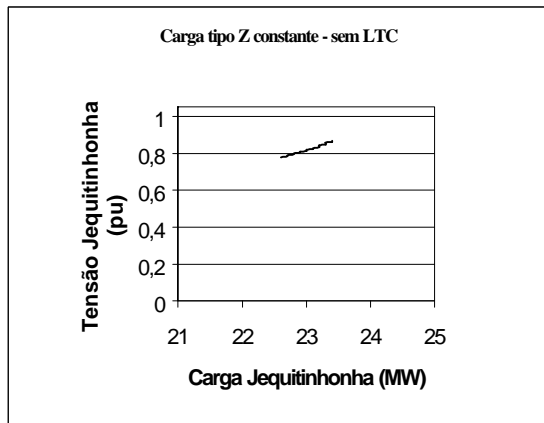


FIGURA 5 - Curva PxV da Barra Jequitinhonha 138 kV em Função da Carga Própria

Outro aspecto relevante refere-se aos resultados com modelagem da carga tipo impedância constante. Uma análise somente das curvas PxV indica que o sistema suporta um aumento significativo de carregamento. No entanto, focalizando-se a barra de Jequitinhonha, verifica-se uma redução da carga própria efetiva. Este é um aspecto que deve ser ponderado no estabelecimento de procedimentos e critérios com ênfase no planejamento.

Quando a modelagem da carga é do tipo impedância constante, não há ponto de bifurcação, não havendo caracterização de ponto de colapso. No entanto, com uma modelagem de carga diferente de potência constante, deve-se monitorar a carga efetiva alcançada nos processamentos pois, dependendo da situação, algumas barras podem estar com as cargas efetivas reduzidas.

Deve-se ressaltar que a carga representada em Conselheiro Pena, por representar outra área, não sofreu alteração nos processamentos, sendo a principal causa de não se ter obtido, para este caso simplificado, praticamente um sistema radial, o mesmo carregamento máximo para as duas modelagens de carga.

Estes resultados ressaltam a diferença entre máximo carregamento e ponto de colapso, que somente são coincidentes para uma modelagem de carga potência constante. A máxima potência efetiva transferida por um sistema é dependente da característica da rede e não do modelo de carga.

Com a consideração da atuação dos tapas da transformação de Governador Valadares, o comportamento do sistema foi similar ao descrito acima, porém obteve-se um valor de máximo carregamento da ordem de 6,6% sem corte de carga. Para este caso, a atuação dos tapas foi benéfica com relação ao aumento do valor de máximo carregamento.

### Programa Anarede

Os mesmos casos foram processados com o programa Anarede e os resultados obtidos para o carregamento máximo, sem considerar otimização, foram semelhantes.

Deve ser ressaltado que o processo de traçado das curvas PxV e VxQ está automatizado, podendo-se obter com facilidade as curvas para as barras de interesse.

De forma ilustrativa, a Figura 6 apresenta a curva VxQ para a barra de Jequitinhonha referente a condição do caso base, com modelagem da carga tipo potência constante, sem atuação dos tapas da transformação de Governador Valadares, obtendo-se um valor de margem de potência reativa de 2,7 MVar.

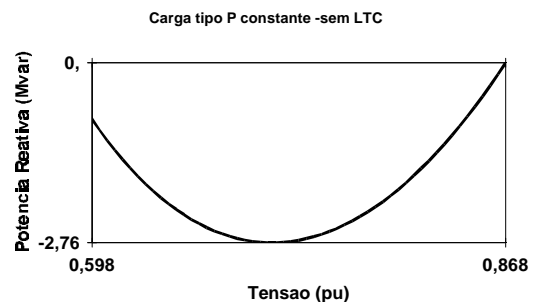


FIGURA 6 - Curva VxQ da barra Jequitinhonha 138 kV

A Figura 7 apresenta a curva VxQ para a barra de Jequitinhonha, também para o caso base, mas com modelagem da carga tipo Z constante. Nesta situação, a margem de potência reativa indicada é de 26 MVar, valor bem diferente do observado com a carga modelada tipo potência constante. Deve-se ponderar que, com uma modelagem da carga tipo impedância constante, a alteração da tensão da barra implica em alteração das próprias cargas.

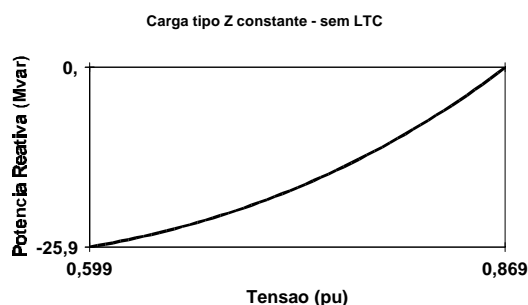


FIGURA 7 - Curva VxQ da Barra Jequitinhonha 138 kV

Adicionalmente, foram realizados processamentos para o mesmo sistema, incluindo a representação da transformação 138-13,8 kV, com LTC, em Jequitinhonha. Com uma representação da carga da região por tipo impedância constante e considerando atuação de tapes, verificou-se que, enquanto possível o controle da tensão em Jequitinhonha 13,8 kV, o comportamento da carga foi similar a uma representação tipo potência constante. Após a saturação do controle de tapes, há uma redução da tensão e redução da carga efetiva da barra. A Figura 8 mostra o traçado da curva PxV para este caso.

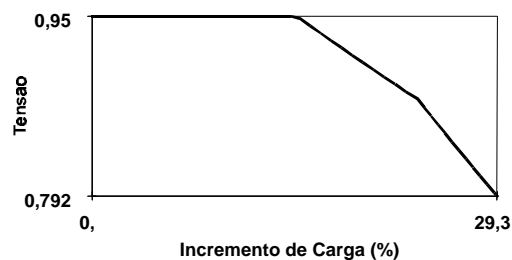


FIGURA 8 - Curva PxV da Barra Jequitinhonha

A Figura 9 apresenta a curva VxQ da barra de Jequitinhonha para o caso base, com modelagem da carga tipo Z constante. Nesta situação, a margem de potência reativa indicada é de 24 MVAR, valor semelhante ao observado no caso sem a representação dos transformadores com LTC's em Jequitinhonha.

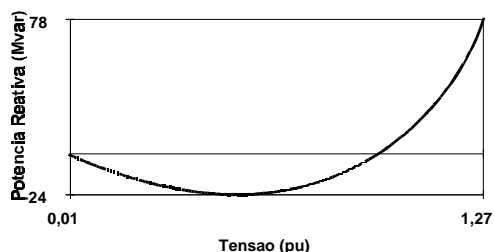


FIGURA 9 - Curva VxQ da Barra Jequitinhonha

## Programa Pacdyn

Através do programa Pacdyn foram realizadas análises modais para o caso base e para os casos correspondentes aos de máximos carregamentos, nas situações de modelagem de carga tipo potência constante.

Para o caso base obteve-se um autovalor de  $-0,14$  e para o caso de máximo carregamento, sem atuação dos tapes dos transformadores de Governador Valadares, o autovalor encontrado foi de  $-0,003$ , valor este bem inferior ao do caso base, indicando uma grande aproximação do ponto de colapso. A barra de maior sensibilidade a esse modo foi a de Jequitinhonha, seguida das barras de Itaobim, Padre Paraíso e Teófilo Otoni, sendo também esta a ordem das barras de maior controlabilidade do modo.

## 5. ANÁLISE PARA SISTEMA DE GRANDE PORTE

Na análise da Área Leste da CEMIG incorporada ao sistema completo Sul-Sudeste foram realizados alguns processamentos adicionais. Os resultados encontrados foram coerentes com os obtidos anteriormente, podendo-se destacar:

- Considerando-se um crescimento de carga somente na região Leste de Minas Gerais, com modelagem da carga tipo potência constante e sem a atuação dos tapes da transformação de Governador Valadares, obteve-se uma margem de crescimento de carga de 1,9%. A diferença em relação ao caso isolado deve-se à queda de tensão da barra de Mesquita ao longo do incremento de carga.
- Ao se considerar o crescimento de toda a carga do sistema da CEMIG observou-se uma redução maior da margem, obtendo-se 1,6% do carregamento máximo, devido à uma redução maior no perfil de tensão de Mesquita, o que provocou uma maior degradação dos níveis de tensão na região Leste de Minas Gerais.
- Ao se considerar o crescimento de toda a carga do sistema da CEMIG com uma modelagem da carga da Região Leste tipo impedância constante, obteve-se uma margem de 5,2%, porém a carga efetiva em Jequitinhonha, de forma similar ao já observado com o sistema isolado, sofreu redução.
- Estes resultados mostram a importância de uma identificação apropriada das áreas que afetam a região de interesse, inclusive para estabelecimento adequado das direções de crescimento de carga para o levantamento das curvas PxV.

## 6. OUTRAS ÁREAS ESTUDADAS

Algumas subáreas do sistema interligado foram analisadas, a exemplo da área Rio de Janeiro/Espírito Santo e área Leste de Santa Catarina onde têm sido observadas situações de instabilidade de tensão; analisou-se também um subsistema da área da COELBA.

### Área Rio de Janeiro

O suprimento de energia elétrica a região Rio de Janeiro/Espírito Santo é feito por linhas de transmissão de 500 e 345 kV, as quais trazem a energia elétrica gerada nas

grandes usinas do sistema interligado Sul/Sudeste até a subestação de Adrianópolis, no município de Nova Iguaçu.

Da subestação Adrianópolis, a energia é levada aos bairros de Grajaú, Jacarepaguá e as cidades de São João de Meriti e Campos. A partir dessas localidades e também da própria subestação Adrianópolis a energia elétrica é passada para uma malha interligada em 138 kV que abrange praticamente toda extensão territorial do estado, suprimindo, assim, os consumidores das áreas de concessão da LIGHT, CERJ e ESCELSA.

Em termos de energia elétrica produzida no próprio Estado, o estado do Rio de Janeiro conta com um parque gerador hidráulico de cerca de 1060 MW (770 MW na LIGHT, 70 MW na CERJ e 220 MW em FURNAS) e com um parque gerador térmico convencional de cerca de 625 MW (600 MW em S. Cruz, 25 MW em Campos e S. Gonçalo) e com a usina nuclear de Angra I (600 MW).

Apesar deste parque gerador térmico/hidráulico próprio, a característica principal do suprimento de energia elétrica ao estado do Rio de Janeiro/E. Santo é de um sistema radial, ou seja, a carga atendida é muito maior que a energia produzida localmente, marcado assim uma elevada dependência do desempenho da rede de Extra Alta tensão (EAT).

As situações descritas nos itens anteriores não compreenderam problemas advindos de perda de controle de tensão devido a limites de potência reativa. Foram então realizados processamentos adicionais, enfocando a área Rio, considerando incremento de carga das empresas LIGHT, CERJ e ESCELSA, para a situação de carga pesada considerada na análise do item 5. Esta área contém dois síncronos muito importantes para suporte de tensão, Grajaú e Vitória que foram então foco dos processamentos. Alguns resultados obtidos merecem destaque e são pontos de reflexão de alguns aspectos levantados nos itens anteriores.

O máximo carregamento obtido com o programa Anarede foi para um incremento de 2,2% e corresponde a solução imediatamente anterior a quando o síncrono de Vitória atinge o seu limite máximo de geração de potência reativa. Ao se levantar as curvas VxQ, caso limite, para as barras de Vitória 345 kV e Grajaú 138 kV, onde estão representados os síncronos, verifica-se que o ponto de operação do síncrono de Vitória pertence ao lado esquerdo, região de “soluções invertidas”, ou seja, menor tensão, maior requisito de potência reativa, e o ponto de operação de Grajaú se encontra bem próximo ao mínimo da curva, conforme ilustrado nas Figuras 10 e 11.

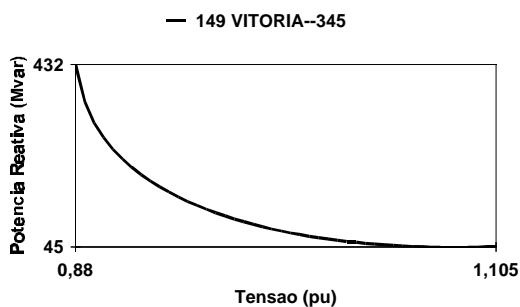


FIGURA 10 - Curva VxQ do Barramento de Vitória 345 kV

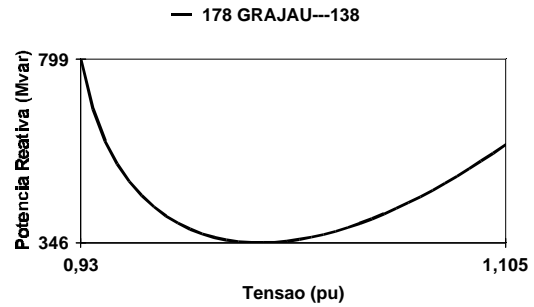


FIGURA 11 - Curva VxQ do Barramento de Grajaú 138 kV. O máximo carregamento obtido com o programa NH2, aparentemente seria superior ao encontrado com o programa Anarede, conforme ilustrado na Figura 12. Com o programa NH2 obteve-se convergência para a situação em que os síncronos atingem o seus limites de potência reativa, com conseqüente perda de controle de tensão, mas as soluções dos fluxos de potência passam a pertencer à região de “soluções invertidas”, ou seja, aumento de carga, aumento do nível de tensão. Se considerarmos como ponto de máximo carregamento o correspondente quando os síncronos atingem os seus limites, o máximo carregamento seria similar ao obtido com o programa Anarede.

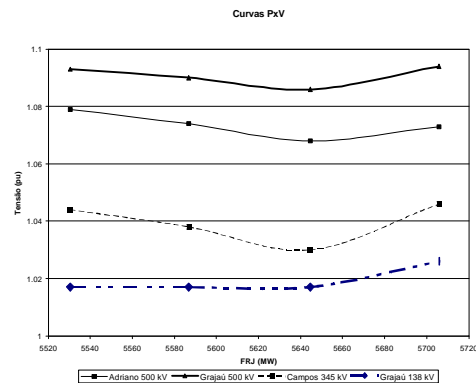


FIGURA 12 - Curvas PxV de Barramentos da Área Rio

### Área Leste de Santa Catarina

A região Sul, formada pelas empresas distribuidoras CEEE, CELESC, COPEL e ENERSUL, tem como empresa transmissora a ELETROSUL, que dispõe de um sistema tronco em 500 kV que interliga as usinas do rio Iguaçu e as futuras usinas do rio Uruguai com os principais centros de carga da região, Porto Alegre, Curitiba, Norte do Paraná e Leste de Santa Catarina. Essa malha é também responsável pela interligação com a região Sudeste do país, via tronco de 750 kV de Itaipú, em Ivaiporã.

A área utilizada para a análise do fenômeno de instabilidade de tensão corresponde a área Leste de Santa Catarina, de concessão da CELESC, com uma carga estimada em torno de 1000 MW. O atendimento a área é feito pela ELETROSUL, sendo ao Norte, por uma linha em 500 kV, mais duas em 230 kV e um terceiro ponto em 230/139 kV.

Já ao Sul, pelo complexo térmico de Jorge Lacerda, através de duas linhas em 230 kV.

O caso utilizado para análise de instabilidade de tensão, nesta área, e teste no programa NH2, foi o caso referente a situação das 18 horas do dia 24/04/97, quando houve uma ocorrência grave de instabilidade de tensão na área São Paulo. A análise efetuada teve como enfoque o traçado de curvas PxV para as barras mais críticas da área.

Desta forma, constatou-se que a margem de estabilidade de tensão encontrada, ou seja, a distância entre o ponto de operação inicial e o ponto de colapso de tensão, foi da ordem de 12% ou 215 MW, para a operação do sistema em condição normal. Já para a condição de emergência, perda da LT 500 kV Curitiba-Blumenau, esta margem é zero, fato este comprovado pelas áreas de operação das empresas que já instalaram sistemas automáticos de alívio de carga para as contingências mais severas na área. Cabe ressaltar que nas simulações realizadas as cargas foram representadas como potência constante e que uma alteração da modelagem da carga poderá levar a resultados mais otimistas.

### Área de Brumado – Coelba

Paralelamente às avaliações feitas no âmbito da Força Tarefa, foi realizado estudo de colapso de tensão para área da COELBA, cujos resultados subsidiaram a tomada de decisão para o planejamento da área.

Um dos casos estudados refere-se à avaliação dos problemas de colapso de tensão para o Subsistema Vitória da Conquista, que deriva da subestação e usina hidroelétrica de Funil e atende a região Sudoeste do Estado, cujos principais centros são as cidades de Vitória da Conquista e Brumado. As cargas atuais dessa área totalizam cerca de 95 MW, prevendo-se 103 MW para 2001 e 118 MW para 2004.

A região é atendida atualmente através da LT 138 kV Funil - Poções - V. Conquista - Patagônia - Brumado, 320,5 km de extensão, sendo o trecho Funil - Poções de 117,7 km, circuito duplo, condutor 636 MCM, isolado para 230 kV, e o restante da linha em 138 kV, condutor 336,4 MCM. De Brumado derivam linhas de 69 kV de grandes extensões.

No estudo da expansão desse Subsistema ficou definida a construção de uma nova linha de 230 kV entre Poções e Brumado, resultando entre Funil e Brumado uma linha de 263,1 km, devendo operar inicialmente em 138 kV e a partir de 2001 em 230 kV. Os estudos de colapso de tensão do sistema operando em 138 kV, para as configurações atual e futura, utilizando o programa NH2, ajudaram na escolha dessa alternativa.

## 6. CONCLUSÕES

Com base na avaliação realizada pode-se concluir que são muito importantes as ferramentas disponíveis para a análise de instabilidade e colapso de tensão, sendo as mesmas complementares apesar das diferenças de metodologias utilizadas.

O Programa Anarede apresenta atualmente facilidade para levantamento da parte superior de curvas PxV e levantamento de curvas VxQ e, em conjunto com o Pacdyn, permite um “diagnóstico” do ponto de operação com identificação dos pontos críticos, abrangência do modo e localização de pontos adequados para atuação de controles e alocação de equipamentos para aumentar a margem de carregamento do sistema.

O Programa NH2, através das rotinas de otimização, permite a identificação adicional de margens de carregamento com otimização do crescimento de carga e atuação de controles.

As ferramentas computacionais disponíveis atualmente no Brasil estão adequadas para análises estáticas do fenômeno de instabilidade de tensão. No momento, estão sendo desenvolvidos esforços no sentido de se estabelecer critérios e procedimentos adequados para aplicação ao sistema elétrico brasileiro, assim como de continuar analisando novas ferramentas e aperfeiçoamentos nos programas disponíveis.

A modelagem de carga é um fator importante na definição do comportamento do sistema quando da ocorrência de um colapso de tensão, tendo sido levantados alguns aspectos básicos importantes como máximo carregamento de um sistema e carga efetiva em função do tipo de carga. A modelagem como potência constante é a mais severa sob o ponto de vista de colapso de tensão.

A ação automática de tapes em algumas situações pode ser benéfica com relação ao fenômeno de instabilidade de tensão, mas, em geral, como atuação de LTC na distribuição implica em comportamento da carga equivalente a potência constante, tendem a diminuir as margens com relação ao ponto de colapso.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Força Tarefa de Estabilidade de Tensão do GTCP/GCPS, - Relatório Parcial - “Metodologias para Avaliação de Estabilidade de Tensão”, 1996.
- [2] IEEE Power Engineering Society 1998 Summer Meeting, “IEEE Special Tutorial Course Voltage Stability”, San Diego, CA, July 13, 1998.
- [3] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL, ELETROBRÁS, “Manual do Programa de Análise de Redes - Anarede”, Versão 01/99.
- [4] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL, ELETROBRÁS, “Manual do Programa NH2”, Versão 10/98.
- [5] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPTEL, ELETROBRÁS, “Manual do Programa Pacdyn”, Versão 01/99.
- [6] P. Kundur, “Utilização Eficiente de Sistemas de Potência”, CIGRE, Maio 1998, Salvador, Brasil.

[7] A. C. Zambroni de Souza “Análise de Estabilidade de Tensão” – FUPAI – 1997.

[8] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, Mc Graw-Hill, 1994.

[9] Carson Taylor, “Power System Voltage Stability”, Mc Graw Hill, 1994

[10] A..C.B. Martins, L.M.S. Carijó, H.J.C.P. Pinto, A.G. Melo, R.D. Rangel, C.H.C. Guimarães, A.Y. Takahata, “Avaliação de Soluções para o Fenômeno da Instabilidade de Tensão no Sistema Interligado Sul/Sudeste Brasileiro”, V SEPOPE; Maio/1998.