



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

**Olinda - Pernambuco - Brasil**

### **Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Distribuição - Abordagem Prática Através de Indicadores de Estabilidade**

<b>Lorenzo Comassetto</b> AES Sul Planejamento e Engenharia lorenzo.comasseto@aes.com	<b>Daniel Pinheiro Bernardon</b> AES Sul Operação do Sistema daniel.bernardon@aes.com	<b>Eric Fernando B. Daza</b> AES Sul Operação do Sistema eric.daza@aes.com
<b>Cássio Giuliani Carvalho</b> UFSM/CEEMA cassio_giuliani@hotmail.com	<b>Luciane Neves Canha</b> UFSM/CEEMA lncanha@ct.ufsm.br	<b>Alzenira R. Abaide</b> UFSM/CEEMA alzenira@ct.ufsm.br

#### **RESUMO**

Os sistemas de distribuição estão diariamente sujeitos a variações de carga, pedidos de novas ligações, solicitações de pareceres de acesso, reconfigurações dos alimentadores, entre outros. Tal dinâmica provoca uma série de problemas operacionais que interferem diretamente sobre as variações nos níveis de tensão e perdas podendo, inclusive, dar origem a fenômenos de instabilidade de tensão. Para redes radiais muito extensas, tipicamente encontradas no sistema elétrico brasileiro, pequenas variações de carga podem ocasionar a ocorrência de colapsos de tensão, provocando inevitavelmente o desligamento do sistema. Tal possibilidade, por si só, já justifica a necessidade de compreensão e consideração da estabilidade de tensão nos estudos de planejamento e operação dos agentes distribuidores de energia elétrica.

Neste trabalho, além de uma abordagem teórica acerca do fenômeno de instabilidade de tensão envolvendo a influência de banco de capacitores, reguladores de tensão e geradores distribuídos, também se propõe apresentar um indicador que possibilite mensurar a proximidade da instabilidade de tensão em que se encontra um determinado sistema de distribuição real. Os resultados obtidos são resultado das análises realizadas em amostras de alimentadores da AES Sul.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Estabilidade de Tensão  
Indicador de Estabilidade  
Redes de Distribuição

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento no consumo de energia elétrica e constante necessidade de expansão das redes de distribuição forçam os sistemas a operar cada vez mais perto dos seus limites. Um sistema elétrico pode ser considerado estável, do ponto de vista da tensão, quando após ter sido submetido a uma perturbação, consegue manter-se com as tensões aceitáveis ao longo de sua extensão.

Sistemas no limiar de instabilidade são susceptíveis a colapsos de tensão mediante o aumento de carga ou uma alteração nas condições físicas do sistema, provocando assim uma progressiva e descontrolada queda nas tensões e conseqüentemente um aumento brusco na corrente do sistema. Ocasionalmente, desta forma, o desligamento do mesmo pelos dispositivos de proteção de sobrecorrente.

A instabilidade de tensão é essencialmente um fenômeno local, todavia, se o sistema em colapso apresentar um carregamento considerável, o seu corte brusco pode afetar os sistemas adjacentes, resultando em uma situação de colapso em cascata. Mediante estes fatores a manutenção de um perfil de tensão seguro, assume uma importância vital, tornando-se necessário o desenvolver métodos que permitam caracterizar e identificar os processos associados à degradação da tensão no sistema e seu grau de risco.

## 2. ESTABILIDADE DE TENSÃO

O problema de estabilidade de tensão geralmente ocorre em alimentadores com alto carregamento, baixos níveis de tensão e fornecimento insuficiente de reativos<sup>1, 2, 3</sup>. Somando-se a isto, muitos alimentadores brasileiros, na prática, apresentam seu carregamento limitado pela estabilidade de tensão e não pelo limite térmico de seus condutores<sup>1</sup>. Tal fato acontece, pois, tipicamente, os mesmos apresentam grandes extensões e por conseqüência um elevado montante de perdas de potência. Nesse contexto, estudos de planejamento são essenciais para evitar-se a construção e/ou extensão de alimentadores e a instalação de transformadores que jamais poderão atuar a plena carga (com as devidas ressalvas referentes à demanda e a diversidade) por estarem conectados em sistemas já estressados sob o ponto de vista de estabilidade de tensão<sup>1</sup>. Em relação à operação, tais estudos são importantes nas eventuais manobras necessárias para o remanejamento de cargas em situações de contingência ou de necessidade de manutenção.

Uma forma prática de explicar o fenômeno de estabilidade de tensão é a de utilizar um esquema simplificado de uma rede de distribuição<sup>3,4</sup> como o da Figura 1.

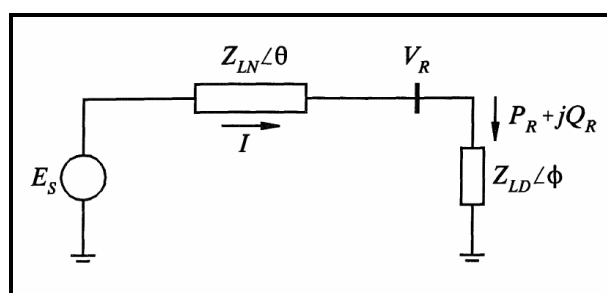


Figura 1 - Rede radial com carga concentrada

Considerando:

$E_s$  – Tensão a vazio do sistema;

$Z_{LN}$  – Impedância equivalente da rede de distribuição (módulo);

$\theta$  – ângulo da impedância da rede;

$V_R$  – Tensão na barra onde está conectada a carga;

$Z_{LD}$  – Impedância representativa da carga  $P_R + jQ_R$  (módulo);

$\Phi$  – ângulo da impedância representativa da carga;

$I$  – Módulo da corrente circulante pela rede.

A partir desse simples modelo, pode-se traçar o comportamento das principais grandezas em função de um aumento de carga, representada pela diminuição da impedância de carga e conseqüente aumento da razão  $Z_{LN}/Z_{LD}$ . As grandezas ilustradas no gráfico estão normalizadas da seguinte forma: a corrente  $I$  em função da corrente de curto-circuito na barra de carga ( $I_{SC}=E_s/Z_{LN}$ ), a potência  $P_R$  em relação à potência máxima transmissível para um fator de potência unitário ( $P_{RMAX}$ ) e a tensão na barra ( $V_R$ ) em relação à tensão em vazio do sistema ( $E_s$ ).

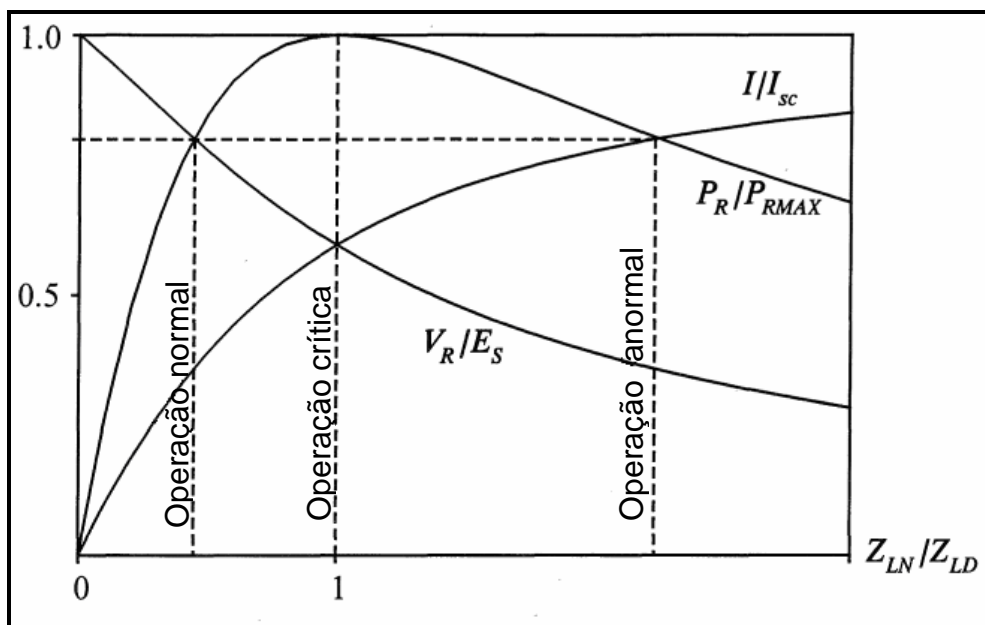


Figura 2 - Comportamento da tensão, corrente e potência considerando o aumento de carga

A Figura 2 mostra claramente o comportamento das principais grandezas de um sistema elétrico desde um estado de operação normal até a ocorrência de um colapso de tensão, em se tratando de cargas de potência constante. O ponto crítico de tal curva é o instante em que acontece a máxima transferência de potência do sistema, definido pela relação unitária entre os módulos da impedância equivalente da linha e de carga. Após esse valor crítico de potência, a continuidade do aumento de carga (matematicamente representado pela redução da impedância de carga) provoca uma queda contínua de tensão ao mesmo tempo em que a corrente circulante no sistema aumenta.

### 3. CÁLCULO DO ÍNDICE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Partindo para uma definição quantitativa, este trabalho propõe a utilização de um Índice de Estabilidade de Tensão (IET) para sistemas de distribuição baseado em um sistema equivalente simplificado como o apresentado na Figura 1. Tal índice mostra a proximidade do sistema em relação ao ponto crítico onde ocorre o desencadeamento do colapso de tensão. Para o cálculo deste, necessita-se dos resultados provenientes do estudo de fluxo de carga do sistema de distribuição para o patamar de carga cuja análise é desejada. Com tais dados, um equivalente simplificado do sistema real é obtido, e o índice de estabilidade de tensão determinado.

Tomando por base um sistema simplificado (Figura 1), demonstra que para a potência entregue ao referido sistema (sistema estável sobre o ponto de vista de tensão), o valor de IET deve ser menor que 1, sendo que IET é calculado a partir da Equação 1:

$$\text{IET} = \left[ 4 \times (x_{eq} \times P_o - r_{eq} \times Q_o)^2 + x_{eq} \times Q_L + r_{eq} \times P_L \right] \quad (1)$$

$r_{eq}$  – perda ativa total do alimentador

$x_{eq}$  – perda reativa total do alimentador

$P_o$  – Potência ativa fornecida pela subestação

$Q_o$  – Potência reativa fornecida pela subestação

$P_L$  – Potência ativa da carga alimentada pela barra “i”

$Q_L$  – Potência reativa da carga alimentada pela barra “i”

Pelo exposto, a condição de estabilidade consiste em se ter um índice de estabilidade de tensão (calculada conforme a Equação 2) que satisfaça a inequação abaixo<sup>4</sup>:

$$\text{IET} < 1$$

$$\left[ 4 \times (x_{eq} \times P_o - r_{eq} \times Q_o)^2 + (x_{eq} \times Q_L + r_{eq} \times P_L) \right] < 1 \quad (2)$$

Considerando que os indicadores necessitam dos estudos de fluxo de potência para sua determinação, e em sistemas em que há instabilidade de tensão o fluxo de potência não apresenta convergência, pode-se concluir que não há como realizar o cálculo do IET para tais. Entretanto, a utilidade desse indicador é a de revelar a estabilidade de tensão relativa em que o sistema se encontra, ou seja, a proximidade do mesmo em relação ao ponto crítico de operação (ocorrência do colapso de tensão).

O indicador proposto para a análise da estabilidade de tensão de sistemas de distribuição pode ser calculado rapidamente devido à simplicidade que apresenta ao necessitar somente dos dados provenientes de um estudo de fluxo de potência para a sua determinação. Logo, pode ser aplicada nas mais diversas atividades de engenheiros tanto de planejamento quanto de operação de sistemas. Tal propriedade ocorre, pois a análise da estabilidade de tensão se refere à capacidade de transmissão de

potência de um sistema, podendo ser considerada como uma propriedade complementar aos níveis de tensão e carregamento.

#### 4. ESTUDO DE CASO

A análise consistiu na simulação, utilizando a ferramenta computacional INTERPLAN, de uma projeção para a demanda futura do alimentador da AES Sul SAN-05, apresentado na Figura 3. Avaliando-se, desta forma, o comportamento do indicador de estabilidade de tensão bem como a convergência do estudo de fluxo de potência. O alimentador SAN-05 apresenta tensão nominal de 23,1kV, 1.209 transformadores totalizando uma potência instalada de 18.187,5 kVA, extensão aproximada de 1.300km, sendo sua troncal composta de condutores 1/0CAA em disposição trifásica. A sua máxima demanda registrada consiste de 2,41MW e 1,75Mvar.

Para a estimativa da demanda, projetou-se um aumento de carga anual de 2% entre o cenário de referência Ano Zero e Ano Três. Para a obtenção das cargas do cenário Ano Quatro, o incremento em relação ao cenário Ano Três foi de apenas 1%, pois questões de convergência. Entre os cenários, Ano Quatro e Ano Cinco, manteve-se o incremento individual de carga de 1%. Os resultados dos estudos de fluxo de carga para os diversos cenários estão resumidos na Tabela 1.

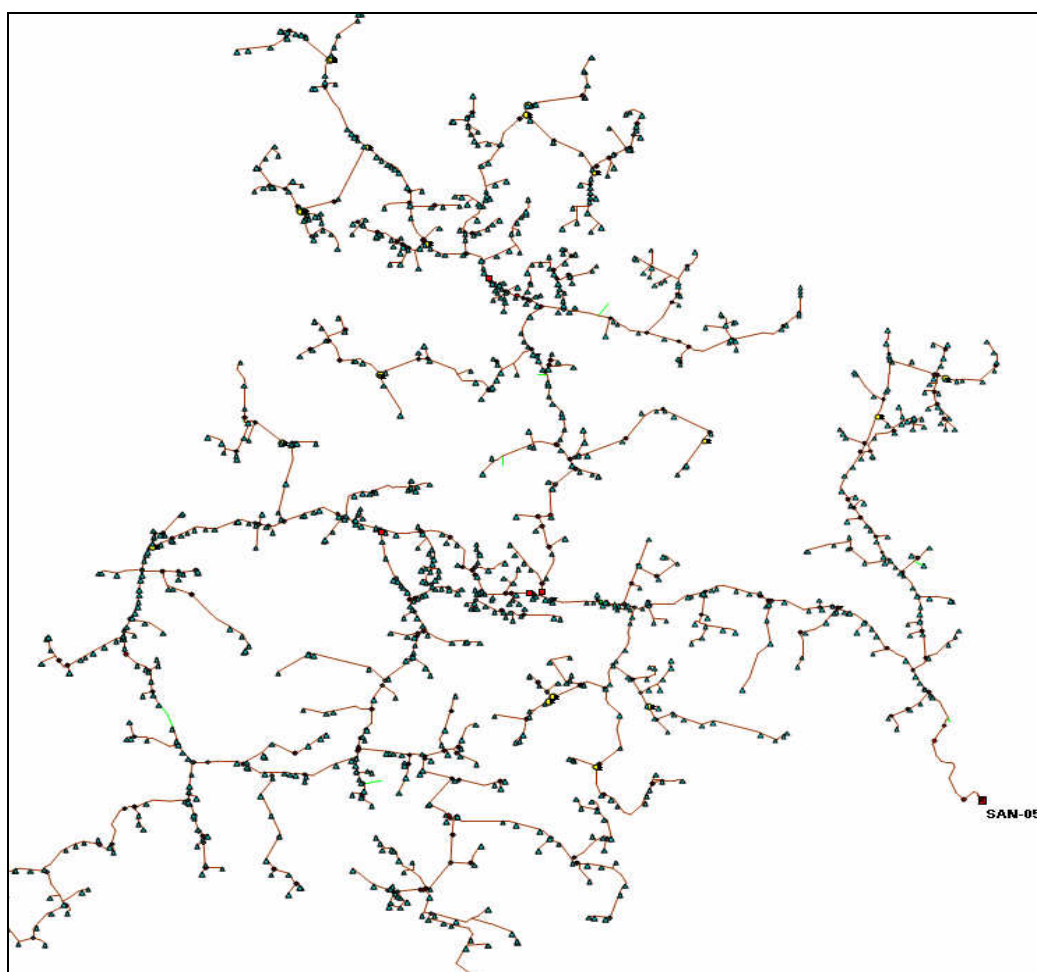


Figura 3 - Visão geral do alimentador da AES Sul SAN-05

O aumento de carga ocorrido provocou um aumento no IET do alimentador diminuindo sua estabilidade relativa de tensão. A transição entre o cenário Ano Quatro e Ano Cinco, onde houve um incremento de carga de apenas 1%, retrata a transição do sistema partindo de um estado estável para uma condição instável (ratificada pela não convergência do fluxo de potência).

Tabela 1 - Resultados do estudo de fluxo de potência do alimentador SAN 05

Cenário	Demanda Total		Perdas Totais		IET
	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)	
Ano Zero	2,4105	1,7484	0,7727	0,5797	0,877
Ano Um	2,4578	1,7806	0,8036	0,6029	0,886
Ano Dois	2,5110	1,8170	0,8375	0,6284	0,895
Ano Três	2,5697	1,8574	0,8738	0,6556	0,903
Ano Quatro	2,5978	1,8766	0,8293	0,6695	0,908
Ano Cinco	Não Convergiu				>1,000

Durante a simulação do cenário “Ano Cinco” tentou-se alterar a tolerância do algoritmo de cálculo no sentido de facilitar a convergência, entretanto, não houve sucesso. Outra alteração realizada foi a de modificar a natureza das cargas, alterando a proporção entre cargas de potência constante e impedância constante. Ao fixar no algoritmo uma proporção de 80% para cargas de impedância constante e 20% para potência constante, logrou-se a convergência do estudo de fluxo de potência.

Um outro aspecto importante a ser abordado reside no fato de que o alimentador em estudo apresenta uma capacidade máxima de transferência de potência (limitada pela sua estabilidade de tensão) de aproximadamente 2,6MW e 1,88 Mvar, carregamento bem aquém da potência instalada ao longo do mesmo (aproximadamente 18MVA) mesmo considerando devidas ressalvas referentes à demanda e diversidade.

Além da análise da estabilidade relativa de um alimentador, nota-se que o uso do IET pode nortear projetos de readequação de topologia de alimentadores existentes e em novos projetos sempre buscando um aproveitamento mais otimizado de seus condutores. Além disso, pode auxiliar nos estudos de planejamento de forma a prever carregamentos futuros de demanda como uma propriedade complementar aos níveis de tensão e de carregamento.

## 5. INFLUÊNCIAS SOBRE A ESTABILIDADE DE TENSÃO

### 5.1. Influência da Natureza das Cargas

Do ponto de vista da operação do sistema, considerando uma carga com comportamento de potência constante, percebe-se que partindo de um carregamento nulo até um valor crítico, ocorre uma redução de tensão na barra de carga, um aumento da corrente circulante e o aumento da potência entregue para a carga. Prosseguindo com o aumento desta, após o valor crítico, a tensão continua sua trajetória descendente ao mesmo tempo em que a potência entregue começa a cair. Para compensar tais reduções e manter o equilíbrio energético, a corrente circulante no sistema aumenta indefinidamente. Na prática,

o aumento da corrente no sistema fará com que haja a atuação de alguma proteção ao longo do sistema. No caso de cargas com natureza de impedância constante, após ultrapassar o carregamento crítico, o sistema estabilizará em um ponto de operação com tensão e potência reduzidas.

## **5.2. Dispositivos com Comutação Automática**

Em sistemas de distribuição é comum a presença de equipamentos dotados de comutação automática de tap's sob carga (transformadores das subestações e reguladores de tensão). Esses dispositivos ao detectarem a redução da tensão no sistema comutam seus terminais internos, aumentando a relação de espiras de seus enrolamentos numa tentativa de restabelecer níveis aceitáveis de tensão. Entretanto, em sistemas operando próximo ao carregamento crítico, a atuação desses dispositivos pode comprometer a operação do sistema levando-o a instabilidade. Isso ocorre, pois a impedância equivalente de carga vista pela fonte se reduz, uma vez que houve o aumento da relação de transformação. Isso acarreta um aumento adicional de carga, podendo levar o sistema a um colapso de tensão.

## **5.3. Banco de Capacitores**

Os bancos de capacitores conectados em derivação em alimentadores provêm uma das soluções para o problema de nível de tensão através da compensação local de reativos, e conseqüente redução dos níveis de corrente. Entretanto, com patamares baixos de carga, tais equipamentos podem causar sobretensões indesejáveis no sistema, sendo a sua alocação uma tarefa a ser cuidadosamente planejada quando o mesmo não apresenta controle automático.

Embora os bancos de capacitores auxiliem a melhoria nos níveis de tensão, os mesmos apresentam uma importante limitação em se tratando de estabilidade de tensão: a potência reativa gerada é proporcional ao quadrado da magnitude da tensão em seus terminais. Portanto, em condições de maior carregamento e conseqüentes baixos níveis de tensão, os bancos de capacitores têm sua operação prejudicada contribuindo para a ocorrência do colapso de tensão. Outra forma de instalação de capacitores é a conexão desses em série com o sistema, embora tal aplicação não seja comum em sistemas de distribuição. A potência reativa fornecida por capacitores instalados em série é proporcional ao quadrado da corrente que passa pelo mesmo independentemente do nível de tensão existente. Tal característica permite um controle natural da potência reativa fornecida ao sistema, fazendo com que o dispositivo forneça um montante maior de energia reativa nos períodos de maior carregamento.

## **5.4. Geração Distribuída**

A necessidade de expansão do parque gerador brasileiro vem se tornando uma das principais preocupações do governo federal, tendo em vista que é essencial para o desenvolvimento da indústria e conseqüentemente da economia nacional. Assim, aliando a reestruturação do setor elétrico, que criou a figura dos autoprodutores e produtores independentes de energia elétrica<sup>5</sup>, com os incentivos governamentais para a ampliação do parque gerador, espera-se para os próximos anos um aumento no número desses agentes conectados aos sistemas de distribuição.

Do ponto de vista da estabilidade de tensão, a geração distribuída se mostra promissora ao auxiliar na melhoria da capacidade de atendimento de demanda no período de maior carregamento. Entretanto, a obtenção desses benefícios depende de um planejamento cauteloso e um regime de operação eficiente.

A inserção de agentes geradores em sistemas de distribuição provoca alterações no fluxo de carga do mesmo, modificando o perfil de tensão bem como as perdas de potência e energia. Tais mudanças, podem ser positivas (redução de perdas e melhoria nos níveis de tensão) ou negativas (aumento das perdas e piora no perfil de tensão), sendo determinadas a partir da potência a ser injetada e do local de instalação do gerador<sup>6</sup>.

A possibilidade da inserção de máquinas elétricas e/ou conversores abre um horizonte favorável para a melhoria da estabilidade de tensão devido aos sistemas de controle incorporados. Tais sistemas podem manter constante o fornecimento de potência reativa de tais fontes durante situações de alto carregamento, contribuindo para a manutenção da estabilidade de tensão, ao contrário dos bancos de capacitores em derivação. Mas em contrapartida, condições de baixo fornecimento, por limitações de geração ou operação defeito, podem comprometer a confiabilidade do sistema relativos a estabilidade de tensão. Estes fatos justificam a importância do estudo apresentado neste trabalho.

## **6. CONCLUSÕES**

O presente trabalho teve como enfoque o fenômeno de estabilidade de tensão e a interferência desse sobre a operação dos sistemas radiais de distribuição extensos, comuns em sistemas de distribuição brasileiros. Além de ter uma abordagem teórica acerca do fenômeno, o trabalho apresentou também, um indicador para mensurar a proximidade da instabilidade de tensão em que um alimentador qualquer se encontra.

Outro tópico de interesse abordado residiu na influência da geração distribuída, reguladores de tensão e transformadores com dispositivos de comutação sob carga sobre a estabilidade de tensão. Além da questão das cargas de potência constante apresentarem comportamento de impedância constante no transitório de comutação dos equipamentos. Em regime permanente, o aumento da tensão provoca um aumento do consumo das cargas de impedância constante, podendo desencadear um colapso de tensão por insuficiência de transferência de reativos pelo alimentador. Somando-se a isso, abordou-se a questão dos bancos de capacitores conectados em derivação, que tem suas capacidades de injeção de reativos reduzida quando o sistema está à iminência do colapso de tensão.

A ocorrência de um colapso de tensão provoca um aumento indefinido na corrente do sistema, provocando o desligamento do mesmo através dos dispositivos de proteção. Todavia, se o sistema a ser desligado for de dimensão considerável, o respectivo corte brusco de carga pode afetar os sistemas adjacentes, provocando perda de sincronismo das máquinas e conseqüente perda de geração resultando em uma situação de blecaute. Tal possibilidade, por si só, já justifica a necessidade de compreensão e consideração de tal fenômeno nos estudos de planejamento e operação dos agentes distribuidores de energia elétrica.



Por fim, o trabalho apresentou o assunto de estabilidade de tensão desde as minúcias referentes ao tratamento físico e matemático do assunto, até a sua aplicação prática como ferramenta de auxílio aos responsáveis pelo planejamento e operação de sistemas de distribuição. Conseqüentemente, espera-se que os conhecimentos desenvolvidos nesse trabalho possam contribuir positivamente para a melhoria na performance da operação dos sistemas de distribuição bem como do sistema elétrico brasileiro como um todo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 PRADA, R.B. SOUZA, L.J. Voltage stability and thermal limit: Constraints on the maximum loading of electrical energy distributions systems. **IEE Proceedings – Generation, Transmission, Distribution**, v. 145, n.4, p.573-577, set. 1998

2 GUBINA, F. STRMCNIK, B. A simple approach to voltage stability assessment in radial networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.12, n.13, p. 1121-1128, Ago.1997.

3 KUNDUR, Prabha Shankar. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill.

4 JASMON, G. B.; LEE, L.H.C.C. New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion. **IEE PROCEEDINGS-C**, v. 140, n. 2, p. 87-90, mar. 1993.

5 BRASIL. Decreto n. 2.003, de 10 de setembro de 1996. Regulamenta a produção de energia elétrica por produtor independente e por autoproductor e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 11 set. 1996. Disponível em:  
<<http://www.aneel.gov.br/cedoc/dec19962003.pdf>>. Acesso em:05 jun. 2007.

6 ACKERMANN, T.; KNYAZKIN, V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES. **Anais...** V. 2, 6-10 Oct. 2002. p.1357 – 1362.