



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7811  
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

## ESTUDO DE CONTROLE DE TENSÃO SISTÊMICO PARA A QUALIDADE DE ATENDIMENTO

CLÁUDIA M<sup>a</sup> C. L.  
MENEZES

ONS

ELIANE F. SILVA

ONS

LUIZ FREDERICO  
B. VASCONCELOS

ONS

MARIA EMÍLIA L.  
TOSTES

UFPA

### RESUMO

Este trabalho visa apresentar o que é um estudo de controle de tensão, quais os principais fatores que motivam a necessidade deste estudo, como o ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico trabalha pela manutenção da qualidade da tensão e quais os dados necessários para se elaborar este estudo. Serão apresentados dois estudos de controle de tensão que já se encontram operacionalizados e que, embora elaborados individualmente, são influenciados um pelo outro, quais serão: “Controle de tensão nas Interligações Norte/Nordeste, Norte/Sul e Sudeste/Nordeste” e “Controle de tensão das áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste”.

### PALAVRAS-CHAVE

Controle de Tensão, Qualidade de atendimento, SIN -Sistema Interligado Nacional.

### 1.0 INTRODUÇÃO

O principal objetivo da operação de um sistema elétrico de potência é o atendimento às solicitações dos consumidores dentro de determinados critérios e com a qualidade exigida pelos diferentes tipos de carga. Um estudo de controle de tensão define qual a melhor estratégia operativa, utilizando os recursos disponíveis no sistema elétrico em operação para otimizar a transmissão de potência, procurando minimizar as perdas e mantendo os níveis de tensão ao longo da rede em patamares aceitáveis. Isso define a qualidade de

atendimento que o SIN – Sistema Interligado Nacional exige.

Para se elaborar um estudo de controle de tensão tem-se que observar alguns fatores fundamentais como: a motivação para o estudo, que pode ser, entre outras, a mudança de uma configuração devido à entrada em operação de uma obra de grande porte para o sistema de transmissão, ou uma alteração de cenário energético com grande mudança de carregamento de fluxo de potência nas linhas de transmissão; a filosofia a ser utilizada no estudo de controle de tensão é outro fator a ser observado, pois define alguns contornos visando minimizar o impacto no sistema elétrico e conseqüentemente nos consumidores ligados à rede em estudo; outro importante fator a ser observado é a carga utilizada no estudo, pois deverá representar o mais fielmente possível, a curva de carga da área em análise.

Para efetuar o controle de tensão são utilizados equipamentos com capacidade de ajustar a tensão dos barramentos de uma área, em uma faixa requerida para operação do sistema. Os equipamentos que são mais utilizados pela Rede Básica do SIN são: compensadores síncronos, capacitores e reatores em derivação, reguladores ou transformadores com mudança de derivação sob carga, compensadores estáticos e unidades geradoras através de sua tensão terminal (geração de reativo).

O presente trabalho tem por objetivo apresentar os aspectos que são observados em estudos de

controle de tensão. Também serão apresentados dois estudos de controle de tensão.

O primeiro estudo foi motivado pela entrada em operação do quarto circuito 500 kV Tucuruí – Marabá e do segundo circuito 500 kV Marabá – Açailândia, que aumentaram significativamente a potência reativa capacitiva do sistema obrigando as máquinas da usina hidroelétrica de Tucuruí a operar próximas às suas capacidades de absorção de potência reativa. Esta situação ainda se agrava no período seco do rio Tocantins, devido à redução da disponibilidade de geração da UHE Tucuruí o que leva ao esvaziamento dos circuitos do tronco 500kV entre as subestações de Tucuruí e Imperatriz e, conseqüentemente, a uma maior solicitação de absorção de potência reativa nos compensadores síncronos das subestações de Imperatriz e Presidente Dutra.

O segundo estudo teve como fator motivador a entrada em operação da linha de transmissão Milagres – Quixadá – Fortaleza II 500kV e do autotransformador 500/230kV – 600MVA da SE Sobral III. Com estas obras em operação, apesar de corresponder a um importante incremento de confiabilidade e flexibilidade de atendimento às áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste, há uma sensível redução no fluxo de potência no eixo em 230kV entre as subestações de Paulo Afonso / Fortaleza / Sobral II, tornando-se necessário reavaliar os procedimentos operativos adotados anteriormente para o controle de tensão destas áreas.

## 2.0 ESTUDO DE CONTROLE DE TENSÃO

Normalmente um estudo de controle de tensão é feito com análises em regime permanente, podendo utilizar alguns resultados provenientes de contingências analisadas em simulações de transitórios eletromecânicos, que definem qual o perfil de tensão no qual o sistema apresenta maior estabilidade a distúrbios. Existem alguns fatores a serem observados em que levam à necessidade de se elaborar um estudo de Controle de Tensão, e norteiam as análises.

- Filosofia utilizada nos estudos;
- Carga utilizada nos estudos;
- Equipamentos disponíveis no sistema elétrico;
- Mudança de configuração no sistema elétrico:
  - Novas obras;
  - Cenários energéticos.

### 2.1 Definição da filosofia utilizada nos estudos

Em um estudo de controle de tensão deve-se preparar o sistema para operar tanto em

condição normal, como para suportar as variações impostas por contingências simples no mesmo. Logo, são utilizados alguns artifícios visando minimizar o impacto no sistema elétrico e conseqüentemente nos consumidores da rede básica:

- Na medida do possível, atuar, inicialmente, nos equipamentos que tenham efeito local e, posteriormente, de acordo com as necessidades do sistema de transmissão, nos meios que tenham efeito global;
- O controle de tensão deverá ser feito, principalmente, em função do ciclo diário de carga, compatibilizando-se a utilização dos recursos com as necessidades do sistema, tendo em mente eventuais contingências simples de perda de equipamentos ou linhas importantes;
- A utilização dos meios e equipamentos de regulação deve levar em conta a confiabilidade do sistema, assim como não provocar variações de tensão, em regime permanente, superiores a limites já estabelecidos;
- Manter o mais elevado possível os níveis de tensão na transmissão visando diminuir as perdas e dar maior estabilidade ao sistema;
- Operar com os compensadores síncronos e estáticos, em regulação automática, procurando sempre que possível, manter reserva de fornecimento e absorção de reativo, visando minimizar as variações de tensão transitórias em caso de distúrbios. Em casos excepcionais, em determinadas áreas, onde a contingência de linha de transmissão pode provocar afundamentos de tensão, pode-se utilizar os compensadores síncronos ou compensadores estáticos próximos ao extremo de absorção de reativo para que os mesmos tenham margem de resposta;
- Limitar o excursionamento dos LTC dos transformadores e autotransformadores em condição normal de operação visando ter uma margem para regulação após contingência;
- As manobras envolvendo bancos de capacitores ou reatores, que servem para ajuste “grosso” das tensões do sistema, devem ser, sempre que possível, precedidas e sucedidas de atuação em comutadores sob carga de transformadores, reguladores de tensão série ou compensadores, que se prestam para ajuste “fino” destas tensões.

### 2.2 Carga utilizada nos estudos

A dificuldade em controlar a tensão em uma determinada barra será tanto maior quanto mais importante for a variação da carga a ser alimentada.

A carga pode ter, desde uma característica pulsante segundo uma lei qualquer, até se apresentar como uma constante. Para controlar a tensão, a potência reativa poderá ser injetada seguindo uma lei compatível com aquela seguida pela variação de carga. Como a lei de variação da carga é aleatória, se conclui que só um sistema de "feedback" será capaz de prover o conveniente suprimento de reativos.

As variações de tensão produzidas pelas cargas que variam lentamente, ou seja, cargas caracterizadas pelos ciclos diários das atividades numa dada região, que resultam da soma de muitas cargas individualmente pequenas, são relativamente fáceis de controlar. A simplicidade vem do fato de que se pode estabelecer, com razoável precisão como serão as curvas de carga, ativa e reativa, a serem cobertas ao longo da jornada diária e em diferentes dias da semana. Assim, pode-se programar, com antecedência, os reativos a serem injetados em cada barra do sistema, conforme a hora do dia.

Entretanto, as perturbações produzidas pelas grandes cargas individuais, tais como fornos elétricos ou grandes motores, é que são difíceis de controlar. Por seu caráter aleatório no tempo, dificulta uma programação para injetar reativos que não seja de forma inteligente. Nestes casos, a utilização de compensadores estáticos é uma das soluções indicadas.

A carga a ser utilizada em um estudo de controle de tensão tem que estar representando o mais fielmente possível a curva de carga da área em análise, além de estimar um crescimento do mercado dependendo do horizonte que o estudo vai cobrir.

O conhecimento de um ciclo diário de carga de um dia útil típico e de final de semana ou feriado, permite avaliar o momento mais adequado para, por exemplo, decidir a manobra de um banco de capacitores e/ou reatores, ou chaveamento de uma linha de transmissão, porém esta, como último recurso.

O que se faz, via de regra, partindo-se de um sistema de "feedback" da área em análise, é estabelecer patamares de carga representativos das cargas máximas, pesada, média, leve e mínima, para um dia útil e cargas pesada, média e mínima de final de semana e feriados.

### 2.3 Equipamentos disponíveis no sistema elétrico

Para que determinados equipamentos possam ser considerados como meios de controle de tensão de uma determinada área do sistema, é necessário que a tensão de alguns barramentos desta área seja suficientemente sensível à ação destes. Além disto, tais equipamentos devem ter capacidade para ajustar a tensão destes barramentos em uma faixa requerida para operação do sistema em condições normais.

Os principais dispositivos empregados na regulação de tensão estão relacionados a seguir:

- Compensadores síncronos;
- Compensadores estáticos;
- Bancos de capacitores;
- Reatores em derivação;
- Reguladores e transformadores com mudança de derivação sob carga;
- Tensão terminal de unidades geradoras.

### 2.4 Mudança de configuração

- Novas Obras:

O principal fator que motiva um estudo, ou reavaliação de um estudo de controle de tensão, é a entrada em operação de uma obra de grande porte para o sistema de transmissão, que pode ser nova fonte geradora de energia, linha de transmissão, equipamentos de suporte de reativo, novo ponto de atendimento, ou até mesmo, liberação de equipamentos de grande porte visando expansão da capacidade de transmissão.

- Cenários energéticos:

Destaca-se que neste trabalho trataremos apenas das interligações Sudeste/Norte/Nordeste.

Uma alteração de cenário energético com grande mudança de carregamento nas linhas de transmissão ou mesmo inversão no sentido dos fluxos do sistema de transmissão, caracteriza-se como uma mudança de configuração.

Os diferentes cenários energéticos, em que se opera o SIN, depende das condições hidrológicas de cada região.

O cenário Norte Exportador retrata a exportação em conjunto das UHE Tucuruí e Lajeado. Neste cenário, o limite de exportação da região Norte é definido como resultante do somatório do fluxo do Norte para o Nordeste com o fluxo do Norte para o Sudeste. Este somatório é limitado pela emergência entre as subestações de Boa Esperança e Sobradinho e tem o objetivo de evitar instabilidade entre as regiões Norte e Nordeste e conseqüente possibilidade de atuação

de esquema regional de alívio de carga, ERAC, nestas regiões.

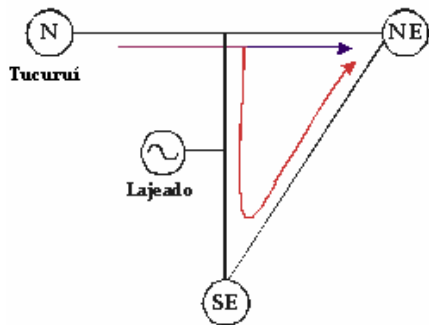


Figura – 01: Cenário Norte exportador

O cenário Sudeste Exportador retrata a exportação da Região Sudeste para as regiões Norte e Nordeste. O limite de exportação compõe-se pelo somatório do fluxo da interligação Norte - Sul com o fluxo da Interligação Sudeste – Nordeste. Este somatório é limitado pela emergência de qualquer trecho entre as subestações de Serra da Mesa e Sapeaçu e entre Boa Esperança e Sobradinho de modo a evitar instabilidade entre as regiões Norte e Nordeste e uma possível atuação de esquema regional de alívio de carga, ERAC, nestas regiões.

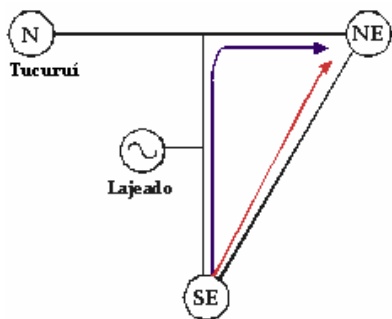


Figura – 02: Cenário Sudeste exportador

Um outro cenário energético é o Nordeste Exportador. Este cenário deve ser evitado a priori, devendo somente ser considerado quando caracterizado um cenário energético emergencial. A principal característica do desempenho do sistema neste cenário são oscilações de baixa frequência e baixo amortecimento dessas oscilações pós-contingências, notadamente para as emergências entre as subestações Boa Esperança e Sobradinho.

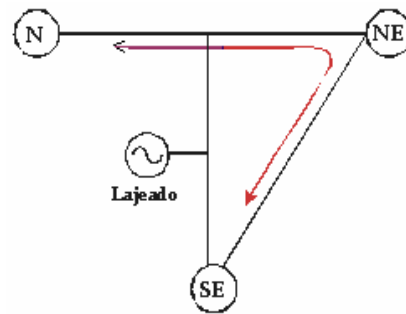


Figura – 03: Cenário Nordeste exportador

### 3.0 ESTUDOS DE CONTROLE DE TENSÃO EM OPERAÇÃO

A seguir são apresentados dois estudos de controle de tensão que estão operacionalizados. Estes estudos foram feitos individualmente, porém ao longo deste item poderá ser observada a grande influência de um sobre o outro.

Como já comentado na introdução deste trabalho, os estudos que são apresentados foram motivados pela entrada em operação do quarto circuito 500kV Tucuruí – Marabá e segundo circuito 500kV Marabá – Açailândia, na interligação Norte/Nordeste, e entrada em operação da LT Milagres – Quixadá – Fortaleza II 500kV e do autotransformador 500/230kV – 600MVA da SE Sobral III, nas áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste.

#### 3.1 Controle de Tensão das Interligações Norte/Nordeste/Sudeste

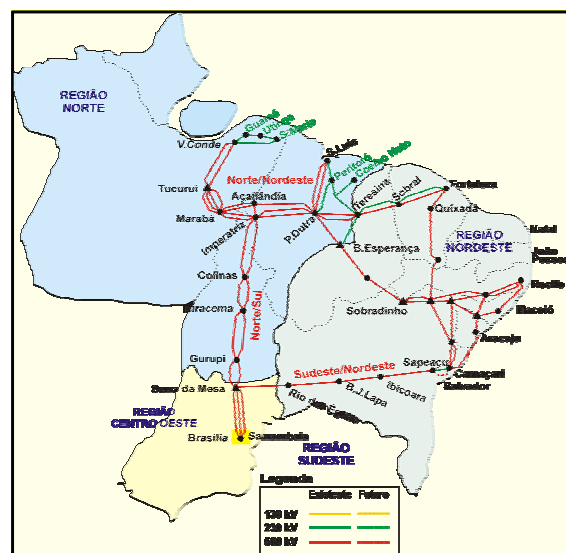


Figura – 04: Diagrama eletrogeográfico da interligação Norte/Nordeste/Sudeste

### 3.1.1 Filosofia de controle de tensão

- Configuração de reatores manobráveis

Procurou-se energizar / desenergizar reatores de barra de 500 kV de P. Dutra e Imperatriz em função do valor de absorção / fornecimento de potência reativa dos compensadores síncronos de Marabá, Imperatriz e P. Dutra.

O reator deve ser energizado quando:

- os compensadores síncronos estiverem absorvendo potência reativa em valores próximos dos limites permissíveis;
- a tensão 500 kV da Subestação estiver no limite superior da faixa;
- Desligamento de circuitos de 500 kV para controle de tensão

Foram admitidos desligamentos de circuitos como último recurso para controle de tensão, ou seja, este procedimento somente deverá ser adotado quando, após esgotados todos os recursos de chaveamento de reatores e de absorção de reativos dos compensadores síncronos e das máquinas da UHE Tucuruí, não for possível manter as tensões nas faixas recomendadas mesmo com o maior número possível de unidades geradoras na UHE Tucuruí I e II sindronizadas. No Plano de Ampliação e Reforços (PAR), 2006/2008, foram recomendadas a instalação de novos reatores de 500kV para as subestações de Imperatriz e Marabá visando eliminar a necessidade de manobra de circuitos de 500kV na interligação Norte/Nordeste para o controle de tensão.

- Desligamento das Compensações Séries Fixas das LT 500 kV Imperatriz – Colinas C1 e C2 da SE Colinas:

Na operação com baixos níveis de exportação da região Norte, poderá ocorrer o esgotamento

dos recursos para o controle da tensão das barras internas das compensações série fixas da SE Colinas, saída das LT 500 kV Imperatriz – Colinas C1 e C2. Esse esgotamento estará caracterizado se os seguintes recursos para o controle da referida tensão já tiverem sido explorados:

- Recursos da UHE Lajeado;
- Recursos da UHE Serra da Mesa e
- Recursos da interligação Norte–Nordeste (principalmente CS da SE Imperatriz)

### 3.1.2 Carga utilizada no estudo

As análises foram efetuadas nas condições de carga pesada, média, leve e mínima do SIN.

### 3.1.3 Principais procedimentos de controle de tensão

Manter as faixas de tensão nos principais barramentos de controle nos valores descritos na tabela 01 seguinte.

Manter as tensões nos limites superiores de suas faixas, uma vez que neste ponto o sistema apresenta um melhor nível de estabilidade dinâmica quando submetido a emergências;

Procurar manter energizados os reatores de barra disponíveis nas SE P. Dutra e Imperatriz, pois o sistema interligado Norte/Nordeste está com um déficit de reativo da ordem de 1000Mvar;

Garantir, como folga operativa, a absorção máxima de – 50 Mvar em cada um dos compensadores síncronos das subestações de Imperatriz e P. Dutra, para que os mesmos tenham folga para responder em contingências;

Tabela – 01: Faixas de tensão dos barramentos de 500kV das interligações Norte/Nordeste e Norte/Sul

Tucuruí	Imperatriz	P. Dutra	Fortaleza II	Sobradinho	S. Mesa	Miracema	B. Jesus
530 a 550	535 a 550	530 a 540	525 a 540	525 a 53	525 a 545	520 a 545	510 a 525

Controlar a tensão do barramento de 500kV da SE P. Dutra, utilizando os recursos de regulação da região Norte e da interligação Norte/Nordeste além das Áreas Norte e Oeste, da região Nordeste, bem como as faixas de tensão dos barramentos de 500kV de Sobradinho e Fortaleza II;

O desligamento de circuitos deve ser feito de forma a garantir sempre a operação com no mínimo dois circuitos por trecho, visando manter a confiabilidade operativa.

A operação com a região Sudeste exportando energia, pode caracterizar uma condição da região Norte importadora de energia ou atendendo sua própria carga. Nestas situações o

FNE – Fluxo entre as regiões Norte e Nordeste, é proveniente prioritariamente da interligação Norte – Sul. Nestas situações há pouca ou nenhuma contribuição da UHE Tucuruí para esses intercâmbios, o que implica em baixos carregamentos no eixo 500 kV Tucuruí – Marabá – Imperatriz e, conseqüentemente, em maior absorção de potência reativa das máquinas da UHE Tucuruí. Nestas condições, o desligamento de circuitos deste eixo é mais efetivo para o controle de tensão.

### 3.2 Controle de tensão das áreas norte e oeste do sistema nordeste

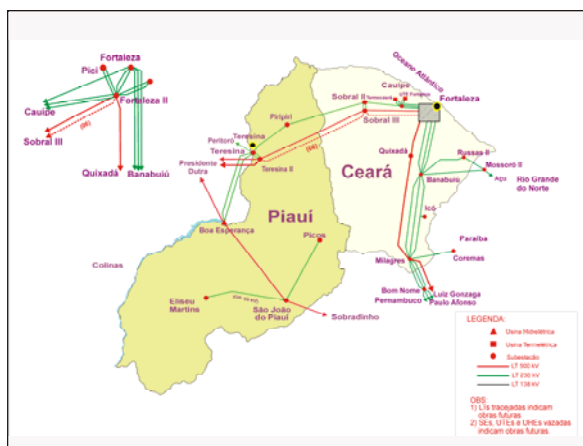


Figura – 05: Diagrama eletrogeográfico das áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste

#### 3.2.1 Filosofia de controle de tensão

- Configuração mínima de BC nas áreas Norte e Oeste:

Com o objetivo de reduzir as sobretensões transitórias de manobras de bancos de capacitores, recomenda-se manter pelo menos um BC de 69kV permanentemente energizado numa das SE Delmiro Gouveia ou Fortaleza.

- Compensadores estáticos das SE Milagres e Fortaleza:

Considera-se a disponibilidade para a operação dos compensadores estáticos (-140/200)Mvar/230kV da SE Fortaleza e (-70/100)Mvar/230kV da SE Milagres. Recomenda-se operar com estes compensadores absorvendo cerca de 70% de suas capacidades nominais, ao longo da jornada diária, para garantir um melhor desempenho dinâmico do sistema quando de contingências no 500kV que supre a SE Fortaleza II. Com o mesmo objetivo, devem ser mantidos energizados o maior número possível de bancos de capacitores na área Norte do sistema Nordeste.

Nas condições de carga leve e mínima, para definir o momento de desenergizar circuito de 230kV para regulação de tensão da área Norte, admite-se absorção de reativo de até 80% da potência nominal dos CE das SE Fortaleza e Milagres, ou seja, -112Mvar e -56Mvar respectivamente.

#### 3.2.2 Carga utilizada no estudo

As análises são efetuadas nas condições de carga pesada, média, intermediária média/leve, leve, intermediária leve/mínima e mínima, das áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste. As demandas intermediárias visam atender as características das cargas da região e dar suporte na definição das faixas de tensão.

#### 3.2.3 Procedimentos para o controle de tensão das áreas norte e oeste do sistema nordeste

Manter as faixas de tensão definidas para as principais subestações das áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste, conforme tabela 02 seguinte, e operar com os compensadores estáticos das SE Milagres e Fortaleza absorvendo cerca de 70% de suas capacidades nominais, atendendo também as necessidades de regulação da interligação Norte/ Nordeste em função dos intercâmbios praticados na mesma.

Controlar a tensão na SE Fortaleza II 500kV ao longo de toda a jornada diária de tal forma que a tensão na SE Quixadá não ultrapasse 550kV. A tensão na barra de 500kV da SE Milagres poderá flutuar ao longo do dia para manter o compensador estático desta subestação em torno de 70% de sua capacidade nominal de absorção de reativo. Vale ressaltar que a tensão do barramento de 230kV da SE Paulo Afonso e a atuação do LTC do ATR 500/230kV da SE Milagres são recursos importantes para se controlar o carregamento deste compensador estático.

A desenergização de linha de transmissão na interligação Norte/Nordeste, principalmente as linhas ligadas a SE Presidente Dutra, leva a uma folga de absorção de reativo considerável nos compensadores estáticos das SE Milagres e Fortaleza, principalmente nesta última subestação.

Na SE Presidente Dutra 500kV procurou-se manter a tensão no limite superior (540kV) para as condições de carga máxima e média. Nas condições de carga leve e mínima e em condições de intercâmbio Norte/Nordeste inferior

a 900 MW, a tensão máxima na barra de 500kV da SE P. Dutra deverá ser de 535kV e 530kV, respectivamente, com a finalidade de diminuir a absorção do CE de Fortaleza. Recomenda-se, antes de baixar a tensão na barra da SE

Presidente Dutra, esgotar todos os recursos locais de controle de tensão das áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste.

Tabela – 02: Faixas de tensão das áreas Norte e Oeste do sistema Nordeste

Demanda da área Norte (MW)	TENSÃO (kV)			
	PAF	MLG	FTZ	BEA/TSD/SBT
Superior a 850	225 a 235	233 a 238	228 a 240	230 a 240
700 a 850	223 a 230	229 a 236	230 a 240	228 a 235
Inferior a 700	220 a 227	230 a 235	233 a 240	225 a 232

#### 4.0 CONCLUSÕES

Com um estudo de controle de tensão, tem-se em mãos a melhor estratégia para operar um sistema elétrico, resguardando os equipamentos em condição normal de operação, atendendo a solicitação de todos os agentes pertencentes ao sistema elétrico e não levando o sistema à necessidade de corte de carga ou mesmo a um problema de instabilidade de tensão ou instabilidade dinâmica quando de contingência no mesmo.

O estudo de controle de tensão visa garantir a qualidade de atendimento para a região em que será operacionalizado, aumentando a segurança operativa da mesma. Para isto deve estabelecer regras claras e objetivas de modo a facilitar a operação do sistema.

Os estudos apresentados, mostraram que é possível manter níveis de tensão dentro dos limites estabelecidos. Apesar de cada estudo de controle de tensão ter sido feito especificamente para as peculiaridades de cada região, com o objetivo de atender as necessidades locais, como os sistemas elétricos são interligados, ações em determinado ponto do sistema têm reflexo em outros pontos eletricamente distantes, afetando o controle de tensão de outra região.

É importante observar que o controle de

tensão não é estático. A evolução do sistema, quer pela incorporação de novas obras ou pela evolução natural do mercado, ou mesmo por restrições novas no sistema, leva à o planejador a manter-se sempre alerta para procurar adaptar a utilização dos recursos disponíveis às necessidades do sistema.

#### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- (1) MENEZES, Cláudia M. C. L., “Estudo de Controle de Tensão Sistemico”, Monografia de Especialização, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2003.
- (2) ONS RE 3/229/2003 – Revisão 2 “Controle de Tensão das Áreas Norte e Oeste do Sistema Nordeste”, Recife, PE, 2003.
- (3) ONS RE 3/171/2005 – “Controle de Tensão das Áreas Norte e Oeste do Sistema Nordeste Considerando a entrada em operação do ATR 500/230kV – 600MVA da SE Sobral III e da SE Pici II”, Recife, PE, 2005.
- (4) ONS RE 3/120/2005 – “Planejamento da Operação Elétrica do Sistema Interligado Nacional – Quadrimestre Maio-Agosto/2005 – Área Norte/Nordeste”, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

