



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT - 16
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

EFEITO DA MODELAGEM DINÂMICA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA ESTUDOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Roberval Madeira da Silva *

Arlindo Lins de Araújo Júnior

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma comparação quanto ao efeito da representação de cargas por modelos estáticos e dinâmicos, em sistemas de distribuição nos quais se tem uma quantidade significativa de motores elétricos, em estudos de estabilidade transitória de tensão.

Para tanto, foram realizadas simulações computacionais comparando os resultados obtidos.

Faz-se uso ainda de registros de ocorrências visando verificar qual dentre as duas modelagens utilizadas é capaz de reproduzir as medições de campo.

Tal comparação valida o uso de modelos dinâmicos para representação de cargas, sinalizando a necessidade do uso destes modelos em sistemas com características similares aos aqui analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade Transitória – Sistemas de Distribuição – Modelo Dinâmico – Resultados de Medições.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos estudos de planejamento elétrico da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) faz-se necessário avaliar as conseqüências de contingências em linhas de transmissão, bem como definir procedimentos para manobras em equipamentos responsáveis pela interligação entre sistemas elétricos. Tanto as contingências, quanto as manobras em questão, podem implicar em instabilidade transitória do sistema, caracterizada por acentuadas oscilações de tensão e fluxo de potência, podendo levar a rejeições de carga nos sistemas de distribuição.

A instabilidade de tensão ocorre devido a falta de capacidade do sistema de transmissão atender à demanda de potência reativa solicitada pela carga (1). Um caso particular de instabilidade de tensão é o problema de recuperação da tensão, que são níveis de tensão baixos e sustentados por alguns segundos após a perturbação. Uma das principais características de sistemas que estão sujeitos a problemas de recuperação da tensão é a grande participação de motores na composição da carga.

Normalmente, nas simulações efetuadas, as empresas de distribuição têm seus sistemas representados por cargas equivalentes nos barramentos de conexão destas empresas com a Rede de Operação, sendo ainda essas cargas representadas pelo modelo estático, combinando parcelas de impedância constante, corrente constante e potência constante, modelo este tradicionalmente conhecido como modelo "ZIP".

Este tipo de representação torna-se insatisfatório quando de situações que impliquem em afundamentos de tensão e/ou oscilações angulares, podendo nestes casos ser necessária a modelagem do comportamento dinâmico das cargas e ainda a representação dos sistemas de distribuição envolvidos.

Neste trabalho, é avaliado o efeito da modelagem dinâmica da carga, bem como a representação do sistema de distribuição, quando de estudos em sistemas elétricos.

Para tanto, são analisadas duas áreas geoeletricas do sistema Nordeste do Brasil, com a utilização de registros obtidos a partir de medições em situações de ocorrências.

A partir destes registros são efetuadas simulações computacionais, com o objetivo de comparar os resultados obtidos quando da utilização de modelos estáticos e dinâmicos para as cargas. Dos resultados obtidos com as simulações, é também possível validar a modelagem dinâmica de cargas dos sistemas de distribuição em análise, demonstrando assim a importância de se considerar tais modelos em determinadas análises de sistemas de potência.

2.0 - MODELAGEM DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Nos estudos para análises no sistema de transmissão, vários sistemas de subtransmissão e distribuição não são representados nos casos de referência, sendo os mesmos representados unicamente através de um valor de carga equivalente no barramento de conexão destes sistemas com a Rede de Operação.

Para áreas com elevada potência de curto-circuito e com pequenas redes de subtransmissão e/ou distribuição, esta representação pode ser adotada sem o comprometimento dos resultados obtidos nestes estudos. Entretanto, para áreas com baixa potência de curto-circuito, em especial sistemas radiais, e para sistemas de distribuição com longos circuitos, a modelagem descrita pode não ser adequada para representar o comportamento real de tensões e fluxos de potência quando de manobras programadas ou de ocorrências na rede.

Outro fator de extrema importância, que deve ser considerado, é o comportamento dinâmico das cargas que são atendidas pelas redes de distribuição nesta situação.

Em uma ocorrência no sistema de transmissão, seja uma manobra programada ou a perda intempestiva de um elemento, o comportamento da carga ao longo do tempo, após a ocorrência, pode levar o sistema a um ponto de operação não desejado, bem como levá-lo à perda de estabilidade, agravando assim a situação da ocorrência. Isto porque, durante um evento que tenha como consequência um afundamento de tensão, diversas cargas poderão ser desligadas, pela atuação de dispositivos de proteção, enquanto outras poderão solicitar maior suporte de reativo do sistema, levando a um quadro de instabilidade de tensão com a consequente abertura de linhas (2).

Objetivando a atenuação dos efeitos causados por perdas intempestivas de elementos, são definidos Sistemas Especiais de Proteção (SEP), os quais promovem o corte controlado de cargas, permitindo assim a recuperação das condições normais de operação o mais rápido possível. Para correta definição destes SEP, e seus ajustes, é necessária a representação mais precisa possível do comportamento do sistema quando das contingências consideradas. A correta representação está ligada à modelagem da carga atendida pelo sistema em análise.

As cargas podem ser modeladas de duas formas, sendo elas, cargas estáticas e cargas dinâmicas. A modelagem como carga estática é tradicionalmente utilizada para estudos de regime permanente e considera o comportamento da carga em função da tensão e da frequência em um ponto de operação fixo. A modelagem dinâmica considera essa dependência ao longo do tempo. Nas seções a seguir é apresentado um resumo de cada um destes modelos.

2.1 – Modelo estático da carga (ZIP)

A modelagem estática da carga é feita através da combinação de três parcelas: Impedância constante (Z), Corrente constante (I) e Potência constante (P). Este modelo é também conhecido como modelo ZIP (1).

A parcela da carga representada como impedância constante possui comportamento exponencial, variando com o quadrado da tensão. A parcela de corrente constante varia linearmente com a tensão. Por fim, a parcela de potência constante mantém-se inalterada, independentemente do comportamento da tensão, o que pode agravar mais ainda a ocorrência (ver Figura 1).

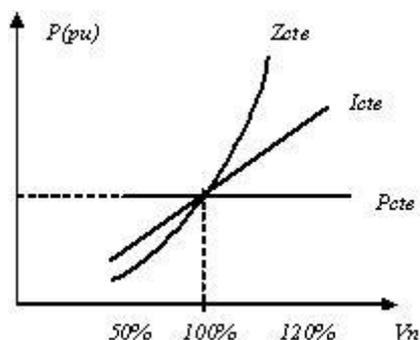


FIGURA 1 – Representação da carga em função da tensão

Observa-se que a representação por potência constante é a mais conservadora.

A representação da carga através da combinação linear de potência, corrente e impedância constante pode ser expressa na forma polinomial como:

$$\begin{aligned} P &= k_1 Zc + k_2 Ic + k_3 Pc \\ Q &= k_4 Zc + k_5 Ic + k_6 Pc \end{aligned}$$

onde os coeficientes k_1 e k_4 representam a parcela de impedância constante, k_2 e k_5 a parcela de corrente constante e k_3 e k_6 a parcela de potência constante das componentes ativa e reativa da carga, sendo $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ e $k_4 + k_5 + k_6 = 1$, ou na forma exponencial em função da tensão:

$$\begin{aligned} P &= P_0 (a + bV + cV^2) \\ Q &= Q_0 (d + eV + gV^2) \end{aligned}$$

Quando se considera a influência da frequência no modelo da carga, um fator que representa esta dependência deverá ser multiplicado a esta expressão.

2.2 – Modelo dinâmico da carga

Quando de estudos em áreas elétricas de baixa potência de curto circuito e/ou com elevada parcela de motores em sua carga, é necessário representar o comportamento dinâmico destas cargas. Adicionalmente, as simulações devem ser efetuadas em programas de simulação de transitórios eletromecânicos.

Os motores elétricos possuem seu torque, potência ativa e reativa e ainda a corrente solicitada da rede dependente da tensão terminal (1). Com a redução da tensão, o motor perde velocidade, passando a operar em um ponto de maior consumo de corrente e potência reativa, menor fator de potência e menor rendimento. A queda do rendimento se deve ao aumento das perdas, que se soma a queda de ventilação pela perda de velocidade, podendo causar temperaturas elevadas no motor se a queda de tensão permanecer por um tempo prolongado.

Para valores de tensão terminal muito baixos, o motor pode entrar em colapso, aumentando significativamente o consumo de potência reativa e a corrente, perdendo velocidade até a parada total ou, mais comumente, até o desligamento pela atuação de proteções de subtensão ou sobrecarga.

O modelo dinâmico expressa a potência ativa e reativa da carga como função da magnitude da tensão e da frequência ao longo do tempo. Durante a operação do sistema elétrico, as variações de tensão e frequência são pequenas e o sistema rapidamente atinge a condição de regime permanente. Para estas condições a representação da carga pelo modelo estático mostra-se satisfatória. Porém, para estudos de colapso de tensão, oscilações entre áreas e estabilidade de longo termo a representação adequada do comportamento dinâmico da carga é vital para obtenção de resultados confiáveis.

Uma das dificuldades enfrentadas para a modelagem dinâmica das cargas é o conhecimento da parcela de participação de motores nestas cargas. O IEEE propõe duas estratégias (2) (3):

- Determinar o percentual da carga consumida por cada componente da carga dentro de cada classe de carga;
- Determinar o percentual de cada classe na carga total da barra considerada.

3.0 - DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS EM ANÁLISE

Para as análises consideradas, foram utilizadas duas áreas geoeletricas do sistema Nordeste do Brasil, sendo elas:

- Área Oeste do estado da Bahia: Por se tratar de uma região cortada por vários rios, afluentes do rio São Francisco, no período seco desta bacia, as cargas são predominantemente compostas por motores de indução para acionamento de bombas de irrigação (ver Figura 2).



FIGURA 2 – Área Oeste do estado da Bahia

A área em questão possui como fonte de suprimento dois autotransformadores 300MVA, 550/230kV na subestação de Sobradinho, conectando esta área à interligação em 500kV entre as regiões Norte e Nordeste do Brasil, além de dois autotransformadores 300MVA, 550/230kV na subestação de Bom Jesus da Lapa II, conectando esta área à interligação em 500kV entre as regiões Sudeste e Nordeste do Brasil. Estes dois pontos de suprimento caracterizam um anel 500/230kV denominado aqui por 'anel 500/230kV Sobradinho/Bom Jesus da Lapa II'.

A perda do suprimento na SE Bom Jesus da Lapa II, leva esta área a ser alimentada unicamente pela SE Sobradinho, podendo levar o sistema a uma condição de instabilidade de tensão. Esta situação será o objeto de análise utilizado para esta área.

- Região metropolitana de Fortaleza (CE): As cargas representativas da região metropolitana de Fortaleza, capital do estado do Ceará, possuem parcela de motores de indução de características industriais e de acionamento de aparelhos condicionadores de ar (ver Figura 3).

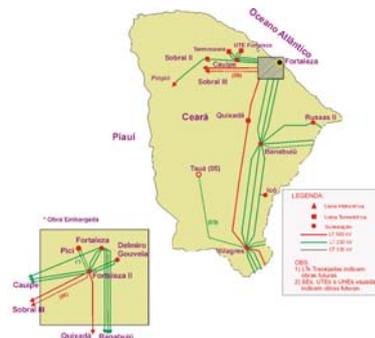


FIGURA 3 – Estado do Ceará

A região da cidade de Fortaleza é atendida, em 230kV, por uma linha de transmissão, composta por três circuitos provenientes da subestação de Paulo Afonso III. Existe ainda o suprimento em 500kV, composto por duas linhas de transmissão, sendo uma proveniente da subestação de Luiz Gonzaga e outra proveniente da subestação de Presidente Dutra (interligação entre as regiões Norte e Nordeste).

Ocorrências de curto-circuito internas aos sistemas de distribuição, derivados das subestações da região metropolitana de Fortaleza, as quais em algumas situações são caracterizadas por elevados tempos de eliminação, podem levar a uma condição de instabilidade de tensão. Esta foi a situação analisada para esta área.

Atualmente, quando da realização de estudos elétricos que envolvam afundamentos de tensão e/ou grandes variações de fluxo de potência nas áreas em questão, as cargas são modeladas considerando parcelas de carga estática e parcelas de carga dinâmica.

4.0 - ESTUDOS REALIZADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No sentido de avaliar os modelos de carga estático e dinâmico, bem como reproduzir os registros obtidos com medições de ocorrências, foram realizadas simulações de transitórios eletromecânicos para as duas áreas

geolétricas consideradas. Nas seções que se seguem serão detalhadas as análises efetuadas em cada uma destas áreas.

4.1 – Área Oeste do estado da Bahia

Conforme citado no item 3, esta área é caracterizada pela predominância de motores para acionamento de bombas de irrigação, nas cargas atendidas pelas subestações de Bom Jesus da Lapa e Barreiras.

Nos meses de maio e junho de 2003, quando da realização de manobra de abertura do anel 500/230kV Sobradinho/Bom Jesus da Lapa II na subestação de Bom Jesus da Lapa II, a área Sudoeste foi levada a uma condição de instabilidade de tensão, caracterizada por variações acentuadas de tensão, as quais resultaram em desligamento descontrolado de carga nas subestações de Bom Jesus da Lapa e Barreiras.

As análises dos registros destas ocorrências indicaram a influência das parcelas de carga dinâmica quando da realização da manobra em questão, evidenciando ainda a necessidade de representação dos sistemas de subtransmissão em 69kV, derivado das subestações de Bom Jesus da Lapa e Barreiras.

Após consulta à concessionária da área em análise, observou-se uma elevada participação de motores para acionamento de bombas de irrigação nas cargas atendidas pelos sistemas de subtransmissão citados, podendo chegar a 95% da carga de algumas subestações de distribuição, além de um considerável valor de carga industrial. A partir do conhecimento das parcelas de carga e de consultas a bibliografias (1), foi possível efetuar a modelagem para as cargas das subestações atendidas pelos sistemas de subtransmissão provenientes das subestações de Bom Jesus da Lapa e Barreiras.

Após o correto ajuste do caso de referência, fazendo uso do programa Anarede (Programa de Análise de Rede) (4), partiu-se para simulações de transitórios eletromecânicos, fazendo uso do programa Anatem (Análise de Transitórios Eletromecânicos) (5), no intuito de avaliar a influência da modelagem das cargas, bem como da representação dos sistemas de subtransmissão.

Inicialmente, simulou-se a abertura programada do anel 500/230kV Sobradinho/Bom Jesus da Lapa II, nos autotransformadores da subestação Bom Jesus da Lapa II, objetivando comparar os resultados obtidos quando considerado o sistema de subtransmissão proveniente das subestações Bom Jesus da Lapa e Barreiras concentrado, como carga equivalente, nos barramentos de conexão em 69kV (Curva em azul) e os mesmos sistemas representados com as cargas distribuídas pelas subestações atendidas por estes sistemas de subtransmissão (Curvas em vermelho e verde). Em ambos os casos, considerou-se as cargas representadas por parcela de carga estática e parcela de carga dinâmica (Ver Figura 4).

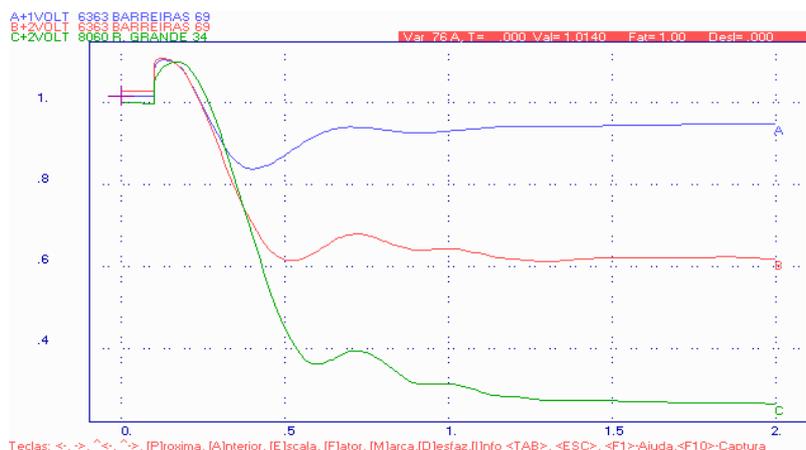


FIGURA 4 – Comparativo entre representação concentrada e distribuída dos sistemas de subtransmissão e suas cargas

Onde:

Tensão A (**Azul**): Tensão no barramento 69kV (em p.u.) da subestação de Barreiras, com sistemas de subtransmissão modelados como carga concentrada neste barramento.

Tensão B (**Vermelho**): Tensão no barramento 69kV (em p.u.) da subestação de Barreiras, com sistemas de subtransmissão representados e cargas distribuídas nestes sistemas.

Tensão C (**Verde**): Tensão no barramento de 34,5kV (em p.u.) da subestação Rio Grande, suprida pelo sistema de subtransmissão proveniente da subestação de Barreiras.

Observa-se na Figura 4 que a manobra de abertura do anel 500/230kV Sobradinho/Bom Jesus da Lapa II, considerando o sistema de subtransmissão concentrado no barramento de 69kV apresenta comportamento satisfatório da tensão. No entanto, quando considerado este mesmo sistema de subtransmissão representado, observa-se que o sistema fica sujeito à instabilidade de tensão, provocando níveis baixos de tensão no

barramento de 69kV da subestação de Barreiras e, principalmente, nos barramentos de carga da concessionária, o que certamente levaria à rejeição descontrolada de cargas.

No objetivo de comprovar a validade da modelagem adotada para as cargas provenientes das subestações de Bom Jesus da Lapa e Barreiras, foram efetuadas simulações de forma a representar registros de ocorrências de afundamentos de tensão nestas subestações.

A Figura 5 apresenta o registro da tensão no barramento 230kV da subestação de Barreiras, quando da manobra de abertura do anel 500/230kV Sobradinho/Bom Jesus da Lapa II, efetuada no dia 22 de junho de 2003.

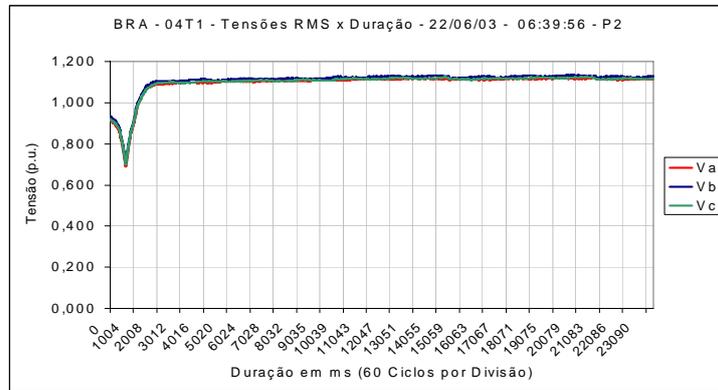


FIGURA 5 – Registro de tensão no barramento de 230kV da subestação de Barreiras em manobra realizada em 23 de junho de 2003

O caso de referência foi então ajustado nas mesmas condições de carga, tensões e fluxos de potência registrados no momento da execução da manobra em questão.

A Figura 6 apresenta o resultado das simulações nas condições descritas anteriormente, onde pode-se observar a correta representação da ocorrência, validando assim os modelos adotados para representação das cargas atendidas pelas subestações de Bom Jesus da Lapa e Barreiras.



FIGURA 6 – Representação do registro de tensão 230kV na subestação de Barreiras

4.2 – Região metropolitana de Fortaleza

A região metropolitana da cidade de Fortaleza é caracterizada por um tipo de carga que inclui uma elevada parcela de motores do tipo industriais e de acionamento de condicionadores de ar. Da mesma forma que no caso descrito anteriormente (área Oeste do estado da Bahia), a parcela dinâmica destas cargas influi fortemente no comportamento do sistema, quando o mesmo é submetido a perturbações que podem levar a uma condição de instabilidade de tensão. O sistema que supre esta carga tem uma característica peculiar de concentrar da ordem de 70% da carga na extremidade do sistema de transmissão, que fica localizado a cerca de 700Km da fonte de geração. Estando indisponível uma das linhas de transmissão em 500kV (liberação para manutenção, por exemplo) que suprem a região metropolitana de Fortaleza, a contingência na segunda linha de transmissão em 500kV, provoca afundamentos de tensão de graves conseqüências. Só é possível representar o comportamento da tensão numa situação deste tipo, considerando a representação de parcelas de motores do tipo industriais e de ar condicionado. Os percentuais e os tipos de motores que foram utilizados nestas simulações são similares às

obtidas em estudo realizado anteriormente para a representação do comportamento dinâmico da carga em uma outra região metropolitana do Nordeste (Natal) (1).

Quando da entrada em operação da primeira linha de transmissão em 500kV na região metropolitana de Fortaleza, foi necessário implementar um Sistema Especial de Proteção (SEP) por subtensão, o qual promove o desligamento controlado de cargas nas subestações desta região, evitando assim que o sistema seja submetido a uma condição de instabilidade de tensão.

Com o intuito de avaliar a influência da modelagem das cargas, foram efetuadas simulações de transitórios eletromecânicos, quando foi simulada a contingência de perda de uma das linhas de transmissão em 500kV para suprimento a região metropolitana de Fortaleza, estando a segunda linha de transmissão liberada para manutenção programada.

A Figura 7 apresenta o comportamento da tensão no barramento 69kV da subestação de Fortaleza, considerando as cargas da região metropolitana de Fortaleza representadas com modelo estático (Curva em vermelho) e as mesmas cargas representadas com modelos dinâmicos (Curva em azul).

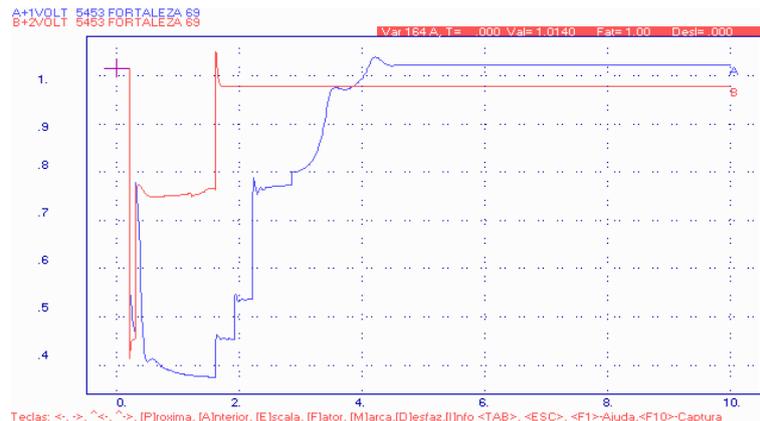


FIGURA 7 – Comparativo entre modelo estático e modelo dinâmico de cargas

Pela Figura 7 observa-se que, caso fosse considerado apenas o modelo estático para as cargas, as tensões se estabilizariam com atuação de apenas um dos estágios do esquema de corte de carga por subtensão. Por outro lado, considerando o modelo dinâmico para as cargas observa-se a necessidade de atuação dos três estágios do referido esquema de corte de carga. Tal conclusão implica na correta definição de procedimentos operativos objetivando o atendimento à liberação programada da referida linha de transmissão.

Com o objetivo de comprovar a validade da modelagem adotada para as cargas provenientes das subestações da região metropolitana de Fortaleza, foram efetuadas simulações de forma a representar registros de ocorrências de afundamentos de tensão nestas subestações.

A Figura 8 apresenta o registro da tensão no barramento 69kV da subestação de Fortaleza, quando da ocorrência de uma falta monofásica na linha de transmissão 69kV Água Fria – Papicú, a qual foi eliminada em um tempo de 1200ms

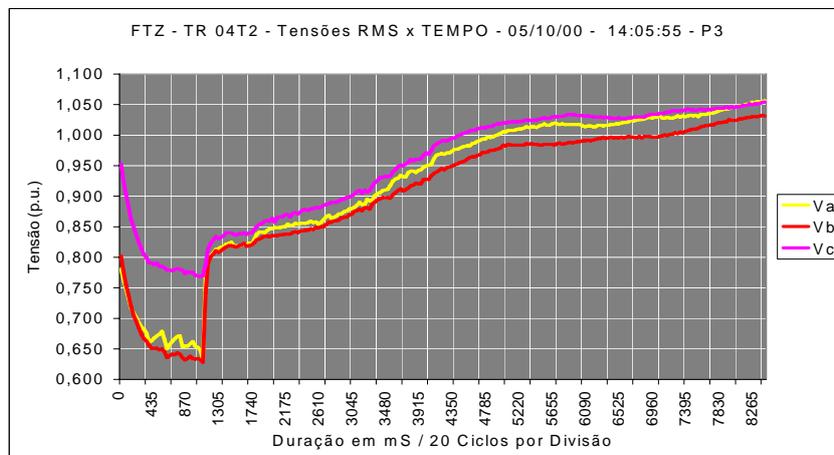


FIGURA 8 – Registro de tensão no barramento de 69kV da subestação de Fortaleza em contingência no dia 05 de outubro de 2000

O caso de referência foi então ajustado nas mesmas condições de carga, tensões e fluxos de potência registrados no momento da execução da manobra em questão.

A Figura 9 apresenta o resultado das simulações nas condições descritas anteriormente, onde pode-se observar a representação do afundamento de tensão, bem como a recuperação imediata da mesma a valores da ordem de 85% da tensão nominal, através da atuação de esquema automático de corte de carga por subtensão e conseqüente redução controlada de carga.

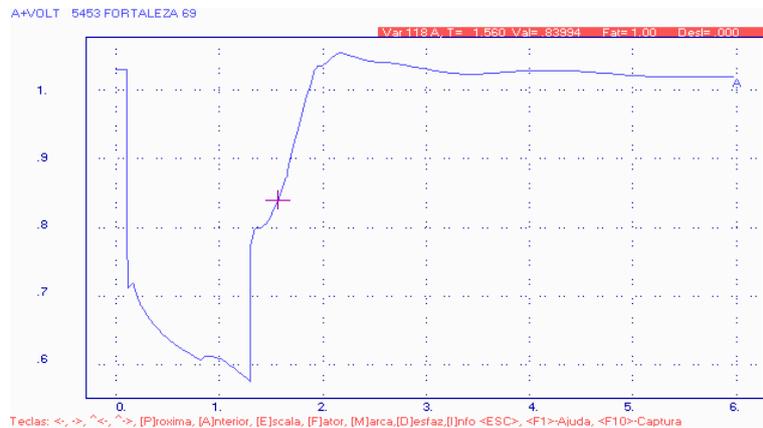


FIGURA 9 – Representação do registro de tensão 69kV na subestação de Fortaleza

5.0 - CONCLUSÕES

A modelagem das cargas de forma mais aproximada da realidade é de fundamental importância para a realização de estudos que envolvam estabilidade transitória de tensão e de ângulo.

A partir desta premissa, este trabalho se propôs a apresentar situações reais do Sistema Interligado Nacional (SIN), onde a modelagem da carga influenciou de forma decisiva no comportamento dos sistemas analisados, levando inclusive a condições de instabilidade de tensão.

A modelagem estática da carga (ZIP) pode ser considerada satisfatória para condições que impliquem em pequenas variações de tensão. No entanto, em simulações que objetivem analisar manobras de anel e contingências de linhas de transmissão, entre outras, em sistemas considerados frágeis (sistemas radiais ou de baixa potência de curto-circuito) é necessário considerar o comportamento dinâmico das cargas, representando assim sua dependência com a tensão e frequência ao longo do tempo.

Para algumas áreas geoeletricas, poderá ainda ser necessária incluir a representação do sistema de subtransmissão e/ou distribuição, uma vez que a elevada impedância existente nestes sistemas pode fazer com que os resultados obtidos nos barramentos de conexão com a Rede de Operação não representem o comportamento da tensão nos barramentos de carga.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CHESF. Representação do comportamento dinâmico das cargas utilizando modelos de motores de indução nos programas MICRODIN/TRANSDIR e ANAREDE/ANATEM.
- (2) W.B. MASSIÈRE Y CORRÊA, M.Th. Schilling, M.B. Do Coutto Filho and J.C.S. Souza. Modelagem de Carga em Empresas de Distribuição para Estudos Dinâmicos. SEPOP, Fevereiro, 2003.
- (3) IEEE TASK FORCE. Load Representation for Dynamic Performance Analysis. IEEE Trans. on PWRS, Vol 8, no 2, pp. 472-482, May 1993.
- (4) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. ANAREDE – Programa de Análise de Redes V08.
- (5) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL. ANATEM – Análise de Transitórios Eletromecânicos V09.