

Desenvolvimento de um Programa Computacional para Avaliar o Controle Coordenado de Tensão aplicada ao Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos

A .C. Zamboni de Souza, B. Isaias Lima Lopes , Otávio Augusto Salgado Carpinteiro – UNIFEI,
Valério Oscar Albuquerque - CEMIG

Resumo – Este artigo apresenta a metodologia para se avaliar o colapso de tensão com uso da modelagem dinâmica. A idéia é monitorar como as ações de controle discreto atuam com o propósito de restaurar o perfil de tensão durante a contingência. É demonstrado que algumas ações de controle ajudam no restabelecimento do sistema elétrico de potência durante um certo tempo, mas que podem eventualmente levar o sistema à instabilidade. Os resultados são obtidos através de uso de casos reais do sistema CEMIG, onde todos os limites e controles serão considerados.

Este trabalho é resultado do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento elaborado entre UNIFEI/FUPAI e CEMIG.

Palavras-chave - ações de controle, controle coordenado de tensão, sistemas de potência.

I. INTRODUÇÃO

O projeto propõe uma nova ferramenta de análise de sistemas de potência, com ênfase especial em sistemas de transmissão. A idéia central consiste em propor uma metodologia de controle coordenado de tensão em sistemas de potência. Para este fim, algumas ferramentas recentes na literatura são empregadas, enquanto que outras inéditas são também propostas.

Parte-se do princípio de que o sistema de transmissão seja capaz de controlar seu nível de tensão de maneira adequada, mas que tal controle pode ser mais efetivo através de uma política hierárquica pré-definida. Este projeto, tem o objetivo de estabelecer e propor esta política. Este estabelecimento será consequência, aqui, da escolha de um modelo quase-dinâmico de sistema. Tal modelo, recentemente proposto na literatura, tende a considerar as vantagens de uma modelagem complexa do sistema, ao mesmo tempo em que um baixo custo computacional é obtido.

A hierarquia de controle é proposta neste trabalho através da seguinte seqüência:

- 1- Ações de controle locais, obtidas através de chaveamento de bancos de capacitores e reatores existentes.

- 2- Variação de tapes nos transformadores. Neste caso, enquanto o nível de tensão estiver fora da faixa desejada, variações de tape ocorrem. A parada desta ação de controle obedece a dois critérios; limite físico de tapes e uma sensibilidade proposta neste trabalho.
- 3- Controle secundário de tensão, que ocorre quando duas ou mais barras de geração controlam a mesma barra de carga.

Dos itens acima, os dois primeiros já foram implementados, e o terceiro está em desenvolvimento. Esta parte será entregue ao final do projeto. A seguir alguns aspectos teóricos associados ao projeto são descritos, e os resultados apresentados. Após os resultados, uma breve descrição das atividades futuras é fornecida.

II. MODELO QUASE-DINÂMICO

O modelo dinâmico permite analisar o processo transitório de colapso de tensão, caso uma contingência seja o elemento detonador do processo, além de ratificar as simulações estáticas. Garantido o ponto de operação após o fim do período transitório, uma alternativa de análise de estabilidade de tensão a longo termo foi proposta em [12, 13, 14]. Neste modelo, as equações diferenciais do sistema podem ser anuladas e um modelo algébrico pode ser empregado, uma vez que elementos discretos movem o sistema de um ponto de equilíbrio a outro.

Além da manutenção das vantagens da análise estática já citadas, o modelo quase-dinâmico pode dispensar a aquisição de uma quantidade considerável de dados e reduzir drasticamente esforço computacional.

Para ajudar a entender as considerações do modelo quase-dinâmico, o comportamento de sistema é decomposto em escalas de tempo de interesse. Isto permite separar as equações e as variáveis envolvidas como segue:

1. Dinâmica de longo prazo, consequência da evolução lenta da carga:

$$\mathbf{w} = \boldsymbol{\phi}(\mathbf{t}) \quad (1)$$

1. Dinâmicas discretas, associadas com LTC e OXL (limitadores de sobre-excitação).

$$\mathbf{z}(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}(\mathbf{k}), \mathbf{w}) \quad (2)$$

1. Dinâmicas transitórias, associadas ao comportamento das máquinas síncronas, reguladores de tensão, PSS, etc.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (3)$$

1. Instantâneas, relacionadas às equações da rede:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (4)$$

Note que a equação (4) representa as características de rede, i.e., as equações de fluxo de potência; a equação (3) é associada aos vetores das variáveis de estado transitórias; a equação (1) representa a evolução de carga no tempo e a equação (2) relaciona-se à dinâmica discreta do LTC.

Para a equação (3), o modelo de máquina usado aqui é o modelo IEEE (1.1). Esse modelo consiste em 4 equações diferenciais para cada gerador. O modelo “IEEE Type 1” representa o regulador de tensão. A dinâmica descrita acima pode ser usada para caracterizar o comportamento do sistema durante o período de pós-falta. Como esta abordagem não é o foco deste trabalho, não serão apresentados detalhes associados com a integração das equações diferenciais. O ponto de análise é o comportamento de longo prazo, assumindo que o sistema mantém-se em equilíbrio após a fase transitória. Esta suposição nos guia à seguinte consideração em relação à equação (3):

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (5)$$

Considerando que a dinâmica transitória é negligenciada, nenhuma integração numérica é necessária. Assim, um método iterativo é usado para calcular as variáveis de estado, como no cálculo do fluxo de carga convencional. Para cada ponto de operação definido pela mudança de tape do LTC, o processo iterativo é executado, e as variáveis de interesse são, então, conhecidas. Se o nível de tensão na barra controlada ainda é baixo, uma nova mudança de tape acontece e o processo é repetido.

III. MÉTODO DE TRABALHO

O objetivo deste trabalho é a preservação da estabilidade do sistema através da determinação clara do instante de bloqueio dos tapes do LTC, usando o modelo quase-dinâmico e a técnica de estabilidade estática nas análises de longo termo. Além de manter a estabilidade, a metodologia proposta identifica o tempo de bloqueio como o instante associado à máxima carga recuperada.

De forma a testar a idéia, inicialmente um sistema de 4 barras é usado. A idéia é então estendida ao sistema de 57 barras do IEEE. O estudo é executado conforme o seguinte esquema:

1. O sistema está em uma condição operacional estável;
2. Uma linha de transmissão é então retirada, por uma falha qualquer, através de simulação dinâmica;
3. O período transitório é simulado completamente e superado;
4. Um ponto de operação é obtido;
5. A resposta dinâmica de longo prazo é analisada por um processo iterativo.

Para acompanhar o comportamento do sistema como consequência de várias mudanças de tapes, nenhuma ação de controle adicional é implementada.

Por conveniência, o sistema usado em [13] também é empregado aqui, assim os resultados podem ser comparados.

As figuras 1 e 2 mostram, respectivamente, o nível de tensão e o comportamento do ângulo de carga do gerador. Nota-se que o sistema colapsa em aproximadamente em 100 segundos, caracterizando o processo como de longo prazo.

As figuras 1 e 2 confirmam os resultados descritos em [13]. Este sistema será analisado novamente na Seção 4, quando da aplicação do recurso e de bloqueio do LTC, objetivo final do presente estudo.

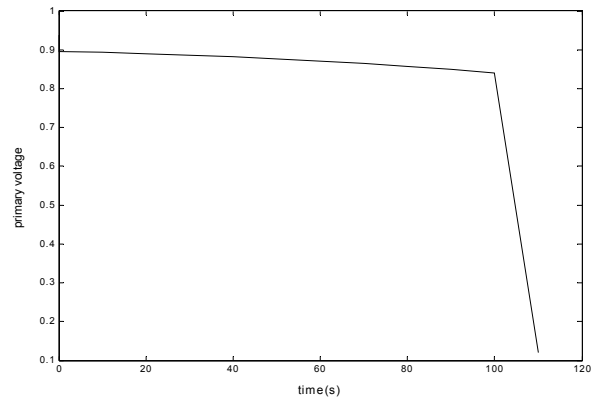


Figura 1- Tensão na Barra 4

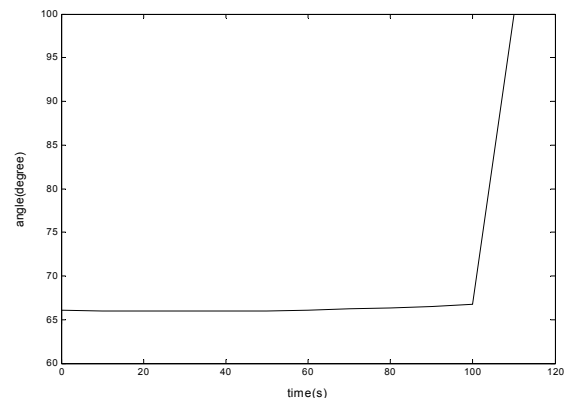


Figura 2 – Ângulo de fase do gerador

A. Ferramentas de Análise

Nesta seção, é proposta uma nova ferramenta na tentativa de se evitar o colapso de tensão. Para conferir a consistência da metodologia, duas outras ferramentas são usadas para comparação: as equações características do LTC e a quantidade de carga recuperada com as mudanças de tapes.

Este montante de carga recuperada é diretamente relacionado ao nível de tensão na barra controlada. A figura 3 apresenta um esboço completo do processo.

Assuma que uma contingência produza um baixo perfil de tensão no sistema após a falta. A dinâmica lenta do LTC tende a recuperar o nível de tensão na barra monitorada. As curvas mostram duas regiões (pré e pós-falta). O ponto Po^* é o ponto de equilíbrio pré-falta e P é imediatamente um ponto após a ocorrência do distúrbio. Nesta situação, um LTC caminha para Po^* seguindo a trajetória mostrada na figura 3, porém as limitações do sistema são uma barreira para se atingir aquele ponto. Desta forma, o LTC pode dete-

riorar ainda mais as condições operacionais. O objetivo deste artigo é identificar o momento para o bloqueio do LTC, a partir do qual a continuação de manobras neste dispositivo, provoca efeitos não desejados de controle, podendo levar o sistema ao colapso.

Na subseção 4.1, a metodologia para identificação do instante do bloqueio é descrita. As subseções 4.2 e 4.3 apresentam algumas alternativas já conhecidas na literatura com o fim de comprovar os resultados.

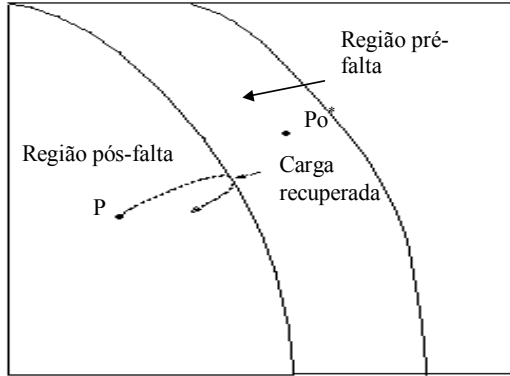


Figura 3 – Carga recuperada pelo LTC

1) 4.1 Vetor Tangente como identificador do instante de bloqueio

A partir do modelo de fluxo de carga, o sistema de equações pode ser representado como segue:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{0} \quad (6)$$

Onde λ é um parâmetro qualquer do sistema.

No método da continuação a margem de carga de sistema é o objeto da análise, sendo λ o fator de aumento de carga/geração (parâmetro de sistema). A próxima seção apresenta um resumo do método da continuação, de forma a apresentar ao leitor esta importante ferramenta de análise. Se uma contingência leva o sistema a instabilidade, o modelo usado aqui já não identifica o comportamento transitório. Por outro lado, uma condição pós-falta estável poderia ocorrer, embora com um perfil baixo de tensão. Em uma situação assim, seria desejável aumentar o nível de tensão, o que exigiria uma ação de controle. O parâmetro que desempenha esta ação neste artigo, levando o sistema a um próximo ponto operacional, é um LTC. Consequentemente, neste caso particular, λ não é a variação de carga, mas a mudança de tape. Diferenciando a equação (14) em relação ao parâmetro do sistema em um ponto de equilíbrio j , tem-se:

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_j \frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} \Big|_j + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda} \Big|_j = \mathbf{0} \quad (7)$$

Dessa forma, o vetor tangente é dado por:

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\lambda} \Big|_j = - \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_j \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda} \Big|_j \quad (8)$$

Onde: $\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Big|_j$ = matriz Jacobiana em j ;

$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \lambda} \Big|_j$ = Derivadas parciais em relação ao parâmetro tape.

Trata-se de um vetor nulo, com exceção das derivadas associadas às barras que conectam os LTC.

Note que o modelo descrito é derivado do modelo estático e deveria incorporar as equações dinâmicas para ser aplicado aqui. Porém, desde que o LTC é a única ação de controle considerada, em cada ponto de operação (como mostrado nas seções anteriores), as equações diferenciais desaparecem, e a seguinte redução é válida:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta \mathbf{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \\ \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

No ponto de equilíbrio, $\Delta \mathbf{g} = 0$. Entretanto, a equação (9) é apresentada dessa forma apenas para ilustrar a redução matricial. A matriz \mathbf{J}' é então definida como:

$$\mathbf{J}' = \left[\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} - \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{f}^{-1}}{\partial \mathbf{y}} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right] \Big|_{(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0)} \quad (10)$$

A equação (10) representa as derivadas parciais das equações de potência reativa com relação aos níveis de tensão, com todos os demais componentes representados. Assim, esta matriz contém implicitamente todos os elementos dinâmicos considerados.

Como o LTC tende a recuperar o nível de tensão, sua ação é refletida em um ponto de operação seguinte. Esta ação tende a produzir um melhor perfil de tensão, e um ponto operacional estável poderia ser alcançado. Porém, é possível que a partir de um ponto de operação, tal ação produza uma deterioração que pode, eventualmente, dirigir o sistema a um colapso de tensão [15]. A deterioração do perfil de tensão pela mudança de tape pode ser causada pelo aumento das perdas, pela correção das cargas modeladas, pela interação entre os dispositivos de controle, ou ainda por ajustes de tensão não adequados a uma condição operativa particular.

A equação (8) mostra como as variáveis de estado mudam como função do parâmetro do sistema e, desta forma, será usada como índice.

Assumindo o funcionamento do sistema em uma região normal de operação, há uma correspondência entre a mudança de tape a variação de tensão na barra controlada. Isto é confirmado diretamente por $dV_{int}/d\lambda$, onde o índice “int”, refere-se à barra de interesse ou controlada. Contanto que $dV_{int}/d\lambda$ apresente o mesmo sinal, o nível de tensão na barra “int” é corretamente controlado. A partir do instante em que este sinal muda, a ação provê efeitos contrários ao desejado. A monitoração deste índice é suficiente para a proposição do momento de bloqueio do LTC. A eficiência desta proposta é verificada pelos índices descritos a seguir.

2) 4.2 Equação característica do LTC

A ação temporal contínua do LTC pode ser representada como segue:

$$\frac{dtape}{dt} = \mathbf{K}(\mathbf{V}_0 - \mathbf{V}) \quad (11)$$

Onde:

\mathbf{K} = constante característica do LTC;

\mathbf{V}_0 = tensão de “set point”;

V = tensão controlada pelo LTC.

A análise linear no ponto de equilíbrio permite avaliar o comportamento de LTC. No máximo nível de tensão tem-se:

$$\frac{d\Delta\text{tap}}{dt} = \mathbf{A} \cdot \Delta\text{tap} \quad (12)$$

$$\frac{d\Delta\text{tap}}{dt} = -\mathbf{K} \frac{\partial V}{\partial \text{tape}} \Delta\text{tap} \quad (13)$$

Quando o nível de tensão é máximo, a equação (13) atinge seu valor máximo.

3) 4.3 Montante de Carga Recuperada

Considere um LTC ideal (sem perdas), como mostrado na figura 4.

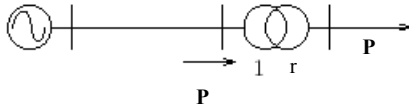


Figura 4 – LTC ideal

Assuma, por simplicidade, que a carga seja modelada por impedância constante:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (14)$$

O modelo de carga acima descreve uma ligação direta entre a carga consumida e o nível de tensão. Assim, a carga recuperada é máxima quando o nível de tensão também é máximo.

IV. MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

O método da continuação [1-4] é bastante conhecido na literatura para a determinação de bifurcações de sistemas dinâmicos. Neste trabalho, tal método será empregado para a determinação do ponto de máxima transferência de potência entre duas áreas de um sistema elétrico. Muito embora este tipo de estudo possa estar diretamente relacionado a estudos de colapso de tensão, trataremos esta ferramenta de forma restrita ao problema de máximo carregamento.

A metodologia é baseada no seguinte modelo de sistema:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (15)$$

no qual x representa as variáveis de estado e λ o parâmetro do sistema usado para levar o sistema de um ponto de equilíbrio a outro. Este tipo de modelo foi empregado para vários estudos de colapso de tensão, com λ sendo considerado o fator de crescimento de carregamento/geração do sistema ou o nível de potência transferida. Dois passos movem o sistema:

Passo previsor: É usado para indicar a direção a se mover. O vetor tangente pode ser usado para este propósito, e pode ser obtido como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (16)$$

Um aumento de carregamento é dado por:

$$\begin{aligned} P &= P_0 (1 + \Delta\lambda) \\ Q &= Q_0 (1 + \Delta\lambda) \end{aligned} \quad (17)$$

Em (17), P e Q são as potências ativa e reativa após a variação do parâmetro λ , e P_0 e Q_0 as potências ativa e reativas iniciais. Assim, podemos reescrever (16) como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \Delta\lambda \quad (18)$$

Ou ainda,

$$VT = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta\lambda} = J^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

No qual J é o Jacobiano do fluxo carregado, θ e V as variáveis de estado (ângulo de fase e magnitude da tensão, respectivamente) e P_0 e Q_0 são as potências ativas e reativas especificadas de cada barra. VT é o vetor tangente [5-8]. O tamanho do passo previsor é dado por:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{\|VT\|} \quad (20)$$

onde $\|\cdot\|$ representa a norma do vetor tangente. Da expressão (20) é fácil notar que o número de interações para obtenção do novo ponto de operação é reduzido, pois quanto mais longe do ponto de colapso o sistema se apresenta, maior é o tamanho deste passo e quanto mais próximo do ponto de colapso, menor é o passo. O ponto de operação atual é obtido através do passo corretor.

Passo corretor: É obtido através da inclusão de uma equação extra. A equação vem do fato de que os vetores previsor e corretor são perpendiculares. Se o passo previsor for usado como chute inicial para um programa de fluxo de carga, o passo corretor geralmente converge rapidamente.

A metodologia acima descreve o método da continuação em um sentido geral. A estrutura da matriz Jacobiana associada com esse método é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rshl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & kI \\ M & L & \\ FF1 & & kFI \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (21)$$

Onde H , N , M e L são as sub-matrizes do Jacobiano do fluxo de carga, e o vetor kI representa as predeterminadas direções de aumento de geração e carregamento. $FF1$ e kFI correspondem à parametrização da equação no fluxo de potência continuado. Durante a região “normal” de continuação, kFI é igual a 1 e $FF1$ é uma linha com todos os elementos iguais a zero. Quando o sistema se aproxima da bifurcação, usualmente as equações (da matriz Jacobiana) tornam-se más condicionadas, e uma parametrização diferente é usada, conforme a estrutura abaixo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ rshl \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & kI \\ M & L & \\ & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (22)$$

Na estrutura acima “1” é um vetor linha, associado à nova variável parâmetro. Ele é todo zero, exceto na posição correspondente ao parâmetro desejado (geralmente a variável de estado que apresentar maior variação relativa ao último ponto calculado. Com isso λ_1 passa a ser uma variável de estado, e uma antiga variável de estado, (e.g., um nível de tensão |V|) passa a ser o parâmetro do sistema.

Identificando um limite de fluxo não é possível superar esse problema. O processo continuado pode levar a identificação de um ou mais limites. Resolver esse problema requer considerações adicionais. A estrutura dos problemas e seus resultados são ilustrados mais adiante.

A Figura 5 ilustra este método, facilitando sua compreensão.

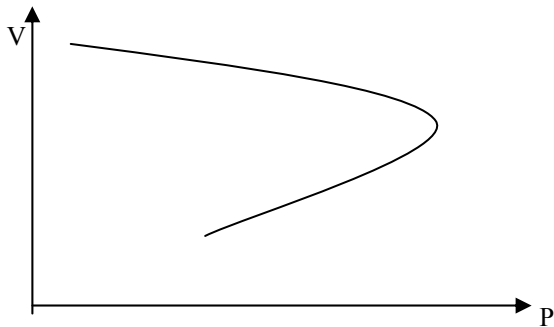


Figura 5 – Método da Continuação

V. TESTES E RESULTADOS

A idéia proposta na seção anterior é agora testada. Dois sistemas teste são considerados. Para ambos os sistemas, as mudanças de tape ocorrem a cada 10 segundos, e a primeira mudança ocorre após 20 segundos. Primeiramente, o sistema de 4 barras usado na referência [13] é empregado. Como discutido na seção 3, o modelo usado neste trabalho reproduz convenientemente os resultados discutidos naquela referência. Nesta seção, o sistema de 4 barras é utilizado, desta vez, para detecção do instante de bloqueio do LTC. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 6-8. É sabido, da seção 3, que o sistema colapsa em 100 segundos. As figuras 6 e 7 mostram que a carga recuperada e a equação característica do LTC são máximas em 90 segundos, enquanto a figura 8 mostra que o vetor tangente muda de sinal em 94 segundos. Isto é suficiente para qualificar esta metodologia como eficiente para determinação do instante de bloqueio, já que além deste tempo (94 segundos), a carga recuperada tende a decrescer em função da redução da tensão controlada pelas novas variações de tape.

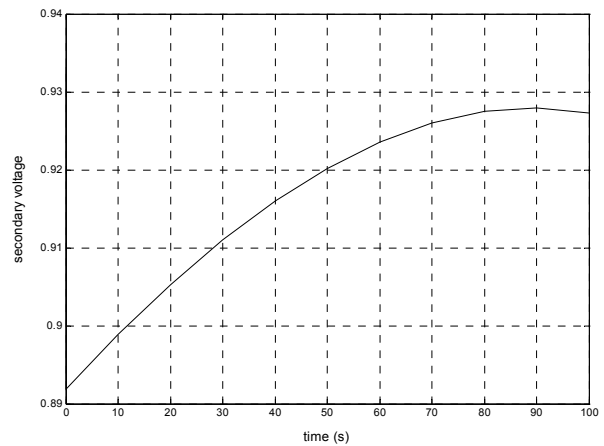


Figura 6 - Nível de tensão na Barra 4 (Sistema de 4 barras)

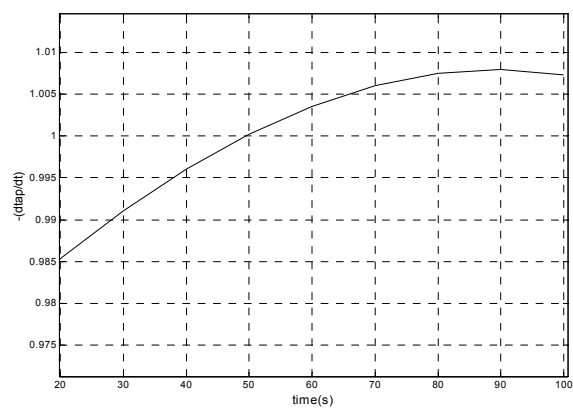


Figura 7 - Equação característica LTC (Sistema de 4 barras)

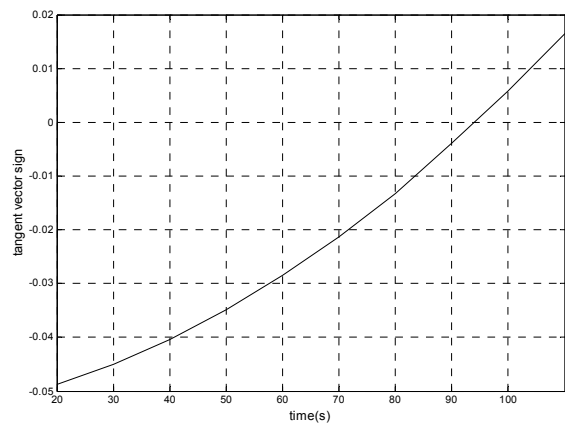


Figura 8 – Sinal vetor tangente (Sistema de 4 barras)

Após aplicar a metodologia ao sistema teste, um sistema teste da Cemig é empregado. O objetivo é determinar o instante de bloqueio dos LTC's., considerando a saída da LT 345 kV Três Marias – Várzea da Palma e um aumento de carga de 15% no sistema. Inicialmente, as barras críticas são identificadas pelo vetor tangente quando o aumento de carga é o parâmetro considerado. A Figure 8 apresenta os resultados obtidos para o caso base.

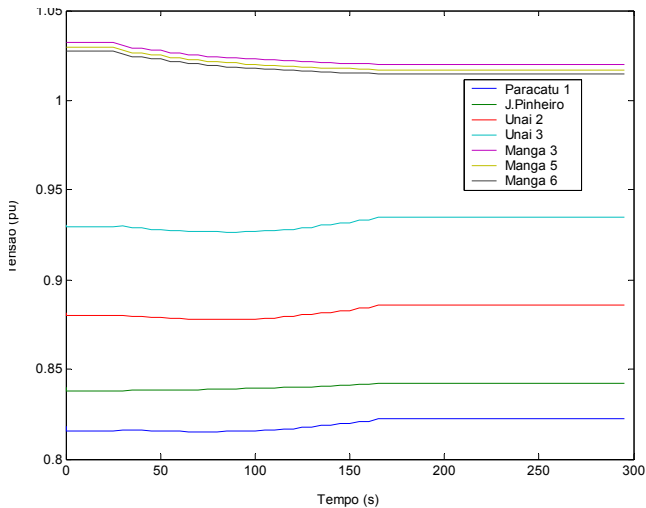


Figure 8. Nível de Tensão nas Barras Críticas

Da Figura 8 pode-se ver que Paracatu – Unai e Janaúba – Manga são as barras críticas do sistema. A Figura 9 apresenta o nível de tensão na SE de 345 e 138 kV em Várzea da Palma para a condição pós falta. O sistema é estável para esta nova condição, e as mudanças de tap no LTC tendem a elevar o nível de tensão no lado de 138 kV, enquanto que o lado de 345 kV apresenta uma deterioração em seu nível de tensão. Como pode ser visto, o sistema pode ser levado à instabilidade em função de sucessivas variações de tapes.

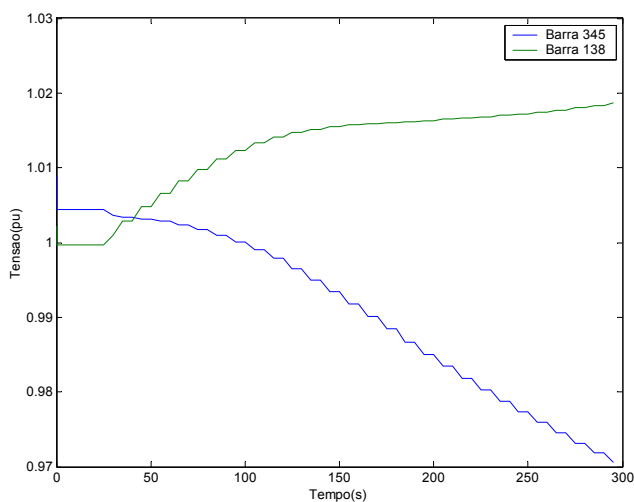


Figura 9- Nível de Tensão em Várzea da Mata

De forma a monitorar o instante de bloqueio, o vetor tangente calculado tendo o tap como parâmetro é monitorado, como mostrado na Figura 10. Como mostrado em seção anterior, uma mudança neste sinal identifica o instante de bloqueio, o que ocorre em 165 s.

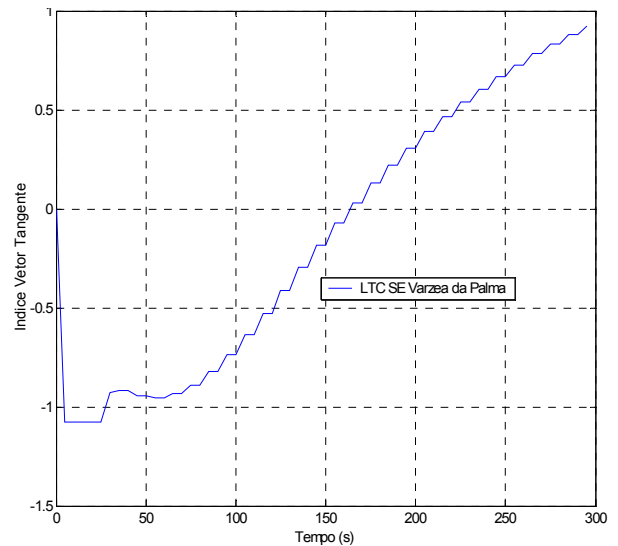


Figure 10 – Comportamento do Vetor Tangente

Os testes são executados novamente, mas desta vez o bloqueio é executado em 165s, obtendo o comportamento da Figura 11.

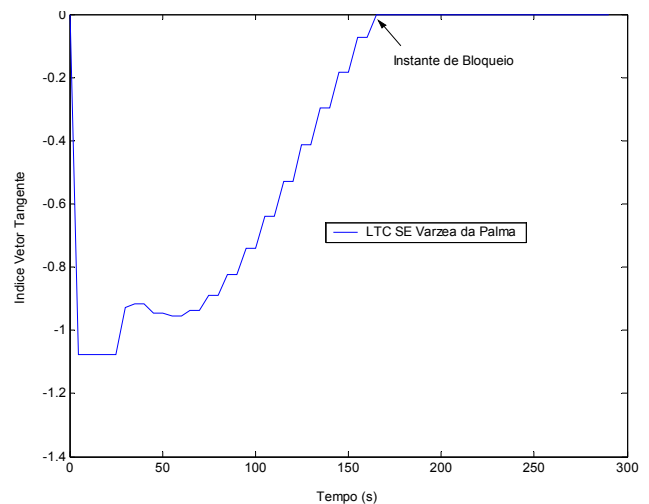


Figure 11. Comportamento com o Bloqueio de LTC

A Figura 12 mostra o nível de tensão Várzea da Mata considerando o bloqueio de tap. Note que desta vez o nível de tensão se estabiliza em 165 s, e o sistema não perde o equilíbrio.

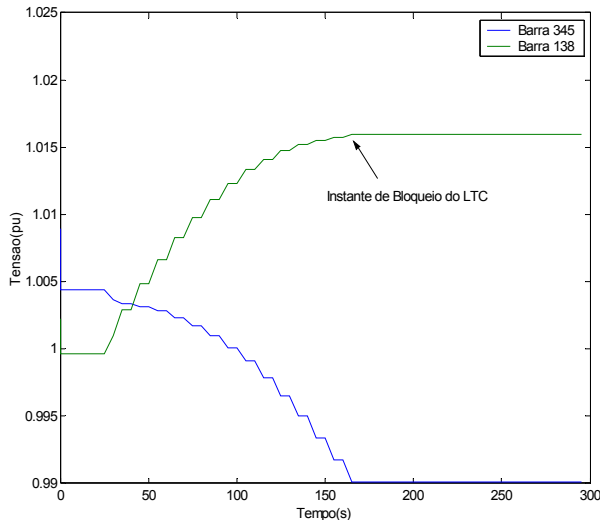


Figure 12 – Nível de Tensão em Várzea da Palma

Um outro caso é obtido quando é assumido que a linha de transmissão 1353-1094 é retirada, e ações discretas tentam melhorar o nível de tensão. A Figura 13 mostra o comportamento do nível de tensão nas Barras 1352 e 1354. Estas são as barras do LTC agindo para restaurar a tensão na barra crítica. Como não há o bloqueio (ainda) o sistema é levado à instabilidade. A Figura 14 mostra o nível de tensão em todas as barras, indicando a instabilidade em 65s. A Figura 15 mostra o nível de tensão na Barra 1354. Note que até 58s, a tensão é continuamente recuperada, até que uma variação súbita de tensão desestabiliza o sistema. Durante este processo, nenhuma variação de carga foi notada, enfatizando o papel que ações de controle discretas podem Ter no processo de instabilidade.

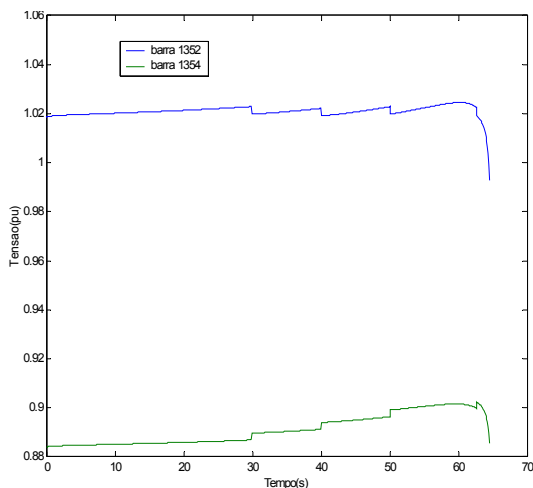


Figure 13 – Nível de Tensão em Função de Mudança de Tap

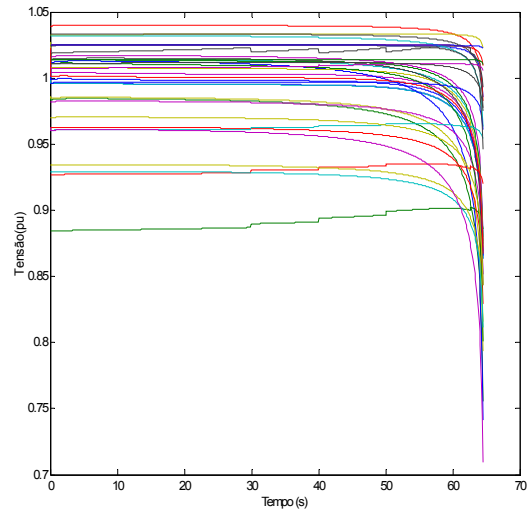


Figure 14 – Nível de Tensão em Todas as Barras

VI. CONCLUSÕES

Uma nova metodologia para detectar o instante de bloqueio de LTC foi proposta neste trabalho. As mudanças de tape têm por objetivo, neste caso, melhorar o nível de tensão degradado em função de uma contingência. Para este fim, um modelo quase dinâmico é considerado, sendo a análise de longo termo o foco do estudo. Isto presume, portanto, que o sistema é capaz de superar o período transitório. Após o período transitório, é assumido, nas simulações, que pequenas perturbações, como entrada de carga seguida de atuação de dispositivos lentos de controle, como os LTC, são os únicos elementos que mudam o ponto operativo do sistema. Foi visto que estas variações podem levar o sistema à instabilidade, já que pontos de operação indesejáveis podem ser obtidos. O ponto a partir do qual tal comportamento pode se manifestar é corretamente identificado através de um índice. Este índice é calculado através da matriz Jacobiana do sistema, considerando as mudanças de tape como o parâmetro do sistema. Os resultados obtidos mostram que o índice pode ser efetivo para este propósito, já que o ponto de bloqueio coincide com o ponto de máxima carga recuperada.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] V. Ajarapu, "Identification of steady state voltage stability in power systems," *Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry*, Mar. 1988, pp. 244-247.
- [2] N. Mithulananthan and C. Cañizares, "Indices to Detect Hopf Bifurcations in Power Systems", *The Proceedings of the Thirty-Second Annual North American Power Symposium, Volume II, Waterloo, Canada*, pp.15-18, 23-24 October 2000.
- [3] C. A. Cañizares and F. L. Alvarado, "Point of Collapse and continuation methods for large ac/dc systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 1, February 1993, pp. 1-8
- [4] A. C. Zambroni de Souza, C. A. Cañizares and V. H. Quintana, "New Techniques to Speed up Voltage Collapse Computations Using Tangent Vectors", *IEEE*

Transactions on Power Systems, vol. 12, No. 3, August 1997, pp. 1380-1387

- [5] A . C. Zambroni de Souza, "Discussion on Some Voltage Collapse Indices", Electric Power Systems Research ,Vol. 53, No.1 , pp. 53-58, January 2000.
- [6] R. Seydel, "From Equilibrium to Chaos-Practical Bifurcation and Stability Analysis," Elsevier Science, North-Holland, 1988.
- [7] A. C. Zambroni de Souza, "Identifying a Vanishing Eigenvalue in Voltage Collapse Analysis with Limits Consideration", accepted for publication by IEE.
- [8] G. C. Ejebe, G. D. Irisarri, S. Mokhtari, O. Obadiana, P. Ristanovic, J. Tong, "Methods for Contingency Screening and Ranking for Voltage Stability Analysis of Power Systems", IEEE Trans. Power Systems,vol. 11, no. 1, February 1996, pp. 350-356
- [9] Y. Mansour, E. Vaahedi, A . Y. Chang, B. R. Corns, B. W. Garrett, K. Demaree, T. Athay and K. Cheung, "B. C. Hydro's On-Line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis and Post-Processing, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, No. 1, February 1995, pp. 241-253
- [10] S. Greene, I. Dobson and F. Alvarado, "Sensitivity of the Loading Margin to Voltage Collapse With Respect to Arbitrary Parameters", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, No. 1, Feb. 1997, pp. 262-272
- [11] A . C. Zambroni de Souza, J. L. Jardim, C. A. Silva Neto, A. A. da Silva, G. L. Torres, L. C. Araújo Ferreira, "A New Contingency Analysis Approach for Voltage Collapse Assessment," Electric Power Systems Research, 1998.
- [12] Van Cutsem, T., Jacquemart, Y., Pruvot, P., "Extensions and Applications of a Mid-term Voltage Stability Method", Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III-Voltage Stability and Security, ECC Inc., Switzerland, August 1994.
- [13] Van Cutsem, T., Vournas, C. D., "Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-Term Time Scales", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, n.1, pp. 146-154, February 1992.
- [14] Causarano, W. J., Falcão, D. M., Taranto, G. N., "A Fast Time Domain Simulation Method for Voltage Stability Assessment", Proceedings of the VI SEPOPE, Salvador, Bahia, May 1998.
- [15] L. C. Araújo Ferreira, A. C. Zambroni de Souza, "Método Estático para Avaliação da Influência de Load Tap Changer na Estabilidade de Tensão", VII Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Curitiba, Maio 2000.