



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

GAT 25
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

MODELAGEM DE TRANSFORMADORES COM DISPOSITIVOS DE COMUTAÇÃO EM CARGA PARA UTILIZAÇÃO EM PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA

Ricardo Diniz Rangel *

Carlos Henrique Costa Guimarães

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

UFF - Universidade Federal Fluminense

RESUMO

O artigo discute as características básicas utilizadas no controle de transformadores com comutação sob carga, importantes para simulação dinâmica de sistemas de potência no domínio do tempo, onde oscilações eletromecânicas e o fenômeno de colapso de tensão são observados. É descrito um modelo de comutador de tap para controle de tensão (OLTC) e de fase (transformador defasador), desenvolvido para utilização no programa ANATEM (simulação dinâmica) com o recurso de controlador definido pelo usuário (CDU). Resultados de simulação apresentados comprovam a adequação do modelo e a capacidade do programa ANATEM em poder representar este tipo de equipamento.

PALAVRAS-CHAVE

Comutação em carga, OLTC, Transformador defasador, simulação dinâmica, dinâmica de longa duração

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação do sistema elétrico brasileiro vem se tornando cada vez mais complicada face à sua expansão, com interligações, requerendo inclusive ferramentas mais adequadas à simulação de novos equipamentos e representação de esquemas de proteção sistêmica. Estudos de dinâmica de longa duração, para análise de colapso de tensão ou oscilações eletromecânicas, têm se tornado cada vez mais importantes devido à interação entre os diversos sistemas de controle, cada vez mais complexos. O gradual aumento de demanda de energia pode levar o sistema elétrico a funcionar próximo dos seus limites operacionais. Portanto, é necessário dispor de ferramentas e modelos que permitam representar e estudar adequadamente a operação do sistema elétrico brasileiro.

Entre os equipamentos cuja representação é importante para os estudos de planejamento e operação está o transformador com comutação sob carga (OLTC - "on load tap changer"). Este é, hoje em dia, largamente usado para controle de tensão e potência nos sistemas interligados, quando se necessita manter os níveis de tensão e os intercâmbios de potência dentro de certas faixas preestabelecidas. A dinâmica destes equipamentos deve ser considerada nos estudos de médio e longo termo de um sistema elétrico de potência. O transformador defasador ("phase-shifter") para controle de potência ativa também possui taps comutados. Sua dinâmica de controle e sua representação são similares às dos OLTC.

Este artigo discute as características básicas do controle de comutação sob carga destes tipos de transformadores, as quais são importantes para simulação dinâmica no domínio do tempo, entre elas: medição com banda morta, compensação de queda de tensão em linha, proteções contra subtensão e sobrecorrente, relé com temporização para atuação e mecanismo de comutação de taps.

É descrito um modelo de OLTC ("on-load tap changer") para controle de tensão e de transformador "phase-shifter" para controle de fluxo de potência ativa, feito para utilização no programa ANATEM (simulação dinâmica) com o recurso de controlador definido pelo usuário (CDU). Esta capacidade do programa permite ao usuário construir o próprio modelo, sem que tenha que recorrer ao desenvolvedor do programa para implementação do modelo desejado, reduzindo o tempo de desenvolvimento e os custos envolvidos. Modelos predefinidos, que são mais eficientes computacionalmente, só devem ser desenvolvidos quando há um consenso sobre a modelagem ou um modelo padronizado já definido na literatura técnica, já que atualizações são trabalhosas e caras.

2.0 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E SUA REPRESENTAÇÃO

O esquema físico de um transformador com comutação em carga para controle de tensão é o mostrado na Figura 1. A estrutura básica é de um autotransformador. Em geral existem 2 tipos básicos de comutador: o primeiro com variação linear de tap em um único sentido a partir da posição neutra (Figura 1-(a)) e o segundo com chave de reversão de polaridade, com variação de tap nos dois sentidos a partir da posição neutra (Figura 1-(b)) [1,2]. Durante a troca de posição do tap o mecanismo realiza temporariamente um curto-circuito nas espiras entre as posições consecutivas, de forma a não interromper a corrente no transformador.

Para se fazer um defasador é necessário prover enrolamentos adicionais com ligações especiais que possibilitem o defasamento, com taps de forma que este possa ser controlado. Um exemplo é o esquema da Figura 2-(a), onde o transformador defasador é constituído na realidade por 2 conjuntos de circuitos magneticamente acoplados: o primeiro possui um enrolamento primário conectado em série com a fase do alimentador e um enrolamento secundário conectado em Δ , que alimenta o enrolamento primário de um transformador de excitação com ligação Y-Y. Este segundo transformador possui um dispositivo de tap no enrolamento primário e tem o enrolamento secundário conectado na posição média do enrolamento primário do transformador série. Escolhe-se a fase do transformador de excitação de forma que a tensão \hat{V}_{ep} esteja 90° adiantada de \hat{V}_{ss} . Desta forma obtém-se o diagrama fasorial da Figura 2-(b), onde as tensões \hat{V}_{sp} e \hat{V}_{es} estão em quadratura e a defasagem φ entre \hat{V}_i e \hat{V}_j pode ser controlada pelo tap, alterando o módulo de \hat{V}_{es} .

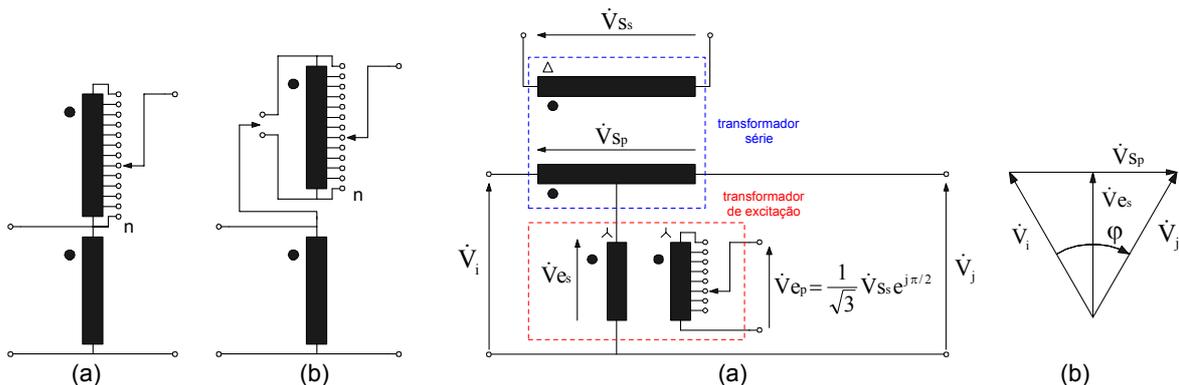


FIGURA 1 – Enrolamentos de um OLTC:

(a) com tap linear (b) com chave de reversão

FIGURA 2 – Transformador defasador

(a) Exemplo de ligação de enrolamentos (b) Diagrama fasorial

Como as variações de tap são lentas comparadas com os fenômenos de oscilação eletromecânica, pode-se usar um modelo estático para a representação de transformadores com comutação sob carga, conforme mostrado na Figura 3-(a) [3]. As dinâmicas eletromagnéticas do equipamento podem ser ignoradas (muito rápidas), considerando-se apenas a dinâmica de mudança de tap, representado pela variável complexa t . A variação do módulo de t (a) corresponde à atuação de um OLTC para controle de tensão, enquanto a variação da fase de t (φ) corresponde à atuação como defasador controlado. As variações tanto de a como φ se dão de forma discreta.

É possível construir um modelo equivalente em π para o transformador, conforme mostrado na Figura 3-(b). Caso haja defasamento ($\varphi \neq 0$), não é possível utilizar um circuito π puramente passivo quando se utiliza representação da rede por matriz de admitância nodal (Y_{bus}) simétrica (que é o caso mais comum), já que a submatriz Y_{bus} do defasador é assimétrica. Neste caso, esta assimetria pode ser representada por uma fonte de corrente conectada em uma das barras, cujo valor é dependente da tensão na barra oposta.

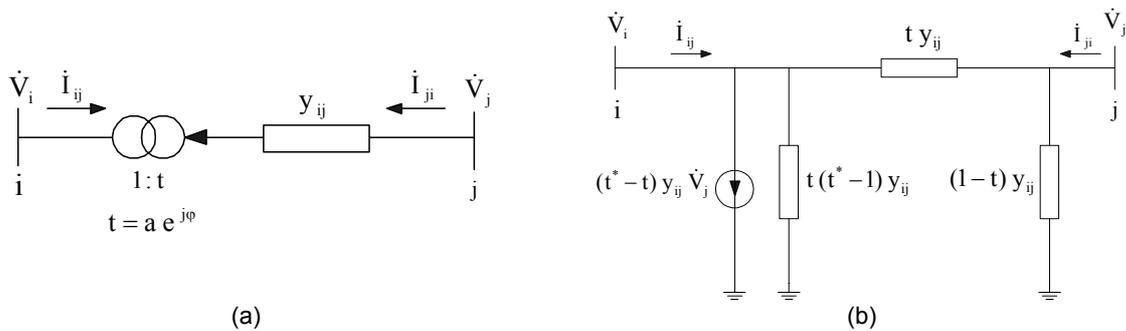


FIGURA 3 – Modelo para transformador com controle de tap de tensão e/ou fase
(a) Modelo esquemático (b) Modelo π equivalente

3.0 - DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONTROLE

Encontram-se na literatura algumas referências que discutem as principais características do controle discreto dos equipamentos com comutação sob carga, bem como sua modelagem [1,2,4,5,6]. Os elementos básicos deste tipo de controle estão mostrados na Figura 4 e estão descritos a seguir.

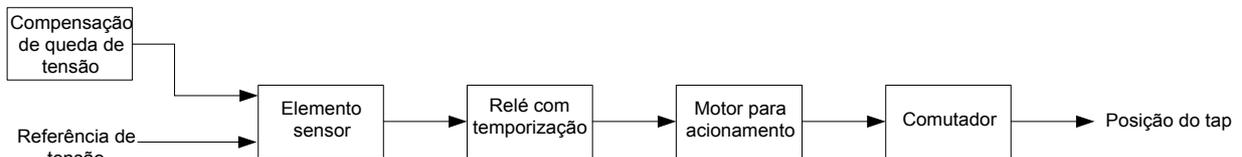


FIGURA 4 – Diagrama esquemático de controle de OLTC

3.1 Elemento sensor

Responsável pela medição de tensão e comparação da mesma com um sinal de referência de controle. O sinal de erro é sujeito a uma banda morta, para evitar atuações freqüentes de mudança de tap, reduzindo a vida útil dos contatos do comutador. É comum usar uma histerese na banda morta para tornar o controle menos sensível a oscilações próximas ao limite da banda. Quando o sinal de erro suplantar a banda morta o elemento sensor enviará um sinal para atuação do relé com temporização. Se o erro voltar a ficar dentro da banda morta o relé é "resetado".

O valor da banda morta deve ser ajustado de forma criteriosa, pois um valor muito grande impede um controle preciso da tensão, enquanto um valor muito pequeno (menor que a variação do erro provocada pela mudança de tap) pode levar a mudanças constantes de tap sem que o erro venha a ficar dentro da banda morta. Um valor típico para banda morta é da ordem de 1% [4].

O controle de tensão pode incluir uma compensação de queda de tensão, deslocando o ponto de controle para um local remoto. O equipamento pode também dispor de proteções contra subtensão e sobrecorrente.

3.2 Relé com temporização

A filosofia de temporização varia muito de acordo com o fabricante. Os seguintes esquemas são comumente usados:

- temporização fixa (valor típico de 30 s)
- dupla temporização fixa (a primeira mudança mais lenta que as subsequentes)
- temporização variável (com curva de tempo inverso): quanto maior o erro normalizado pela banda morta menor será o tempo de retardo.

Os relés mais modernos são digitais e possuem lógica de temporização programável. A atuação do relé envia comando para atuação do mecanismo de mudança de tap, porém sua temporização pode ser "resetada" caso o erro volte a ficar dentro da banda morta.

3.3 Motor para acionamento do mecanismo de mudança de tap

A mudança de tap ocorre de forma quase instantânea (cerca de 50 milissegundos) porém é necessário que um motor prepare o mecanismo de atuação armazenando energia mecânica em um dispositivo do tipo mola. Este

tempo de preparação é da ordem de alguns segundos (valor típico de 5s). Normalmente, uma vez acionado o motor para a mudança de tap esta ordem não pode mais ser cancelada (mesmo que o relé seja "resetado") [1]. Portanto este processo é do tipo "atraso de transporte". Quando ocorre a mudança de tap a temporização do relé é "resetada", preparando-se para futuras atuações.

3.4 Comutador

A mudança de tap ocorre de forma discreta e não contínua. Em geral tem-se um máximo de ± 16 posições de tap com variação total em torno de $\pm 10\%$ do tap a partir da posição neutra. No caso de transformador defasador, cada mudança de posição corresponderá a uma variação de defasamento, enquanto no OLTC comum cada posição corresponde a uma variação de tap de tensão.

4.0 - MODELAGEM IMPLEMENTADA NO PROGRAMA ANATEM

A modelagem do controle de tap foi feita no programa ANATEM usando a linguagem dos controladores definidos pelo usuário (CDU) [7]. Os blocos lógicos possuem saída 0 ou 1 correspondentes aos estados lógicos FALSO ou VERDADEIRO, respectivamente, enquanto sinais analógicos são convertidos em sinais lógicos, quando necessário, usando a convenção: valor $> 0 \rightarrow$ VERDADEIRO (1) e valor $\leq 0 \rightarrow$ FALSO (0). Vários blocos correspondentes a um atraso de um passo de integração Δt (com função de transferência $e^{-s\Delta t}$) foram necessários no controle nos diagramas das Figuras 6 a 8 para evitar laços algébricos no processo iterativo de solução do programa ANATEM, o que levaria à não convergência.

A Figura 5 mostra a implementação do sensor com banda morta. O sinal V_m corresponde à tensão a ser controlada pelo OLTC, que pode ser puramente o módulo da tensão terminal (V_t) ou incorporar uma compensação de queda de tensão através de uma impedância $r_c + j x_c$ com a corrente terminal (I_t), de forma a deslocar o ponto de medição, conforme as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= V_{tR} + j V_{tI} & \dot{I}_t &= I_{tR} + j I_{tI} \\ V_{mR} &= V_{tR} - (I_{tR} r_c - I_{tI} x_c) & V_{mI} &= V_{tI} - (I_{tI} r_c + I_{tR} x_c) & V_m &= \sqrt{V_{tR}^2 + V_{tI}^2} \end{aligned}$$

Comparando-se o sinal V_m com um valor de referência V_{ref} e normalizando-se por um valor V_{nom} especificado, obtém-se o sinal de erro percentual normalizado $\Delta V_n\%$. O sinal SIGN (+1 ou -1) indica o sentido de variação do tap para $\Delta V_n\%$ positivo. O sinal lógico ENAB (0 ou 1) habilita a atuação do relé, enquanto o sinal lógico BLOQ (0 ou 1) bloqueia a atuação do relé em função da proteção implementada. Por exemplo, para uma proteção de subtensão e de sobrecorrente ter-se-ia:

$$BLOQ = \left(|\dot{V}_t| \geq V_{min} \right) e \left(|\dot{I}_t| \leq I_{max} \right)$$

Aplica-se o sinal de erro a uma banda morta com histerese. O sinal P_{BM} indica que o erro está fora da banda morta (P_{BMS} inclui o sinal da variação desejada de tap), enquanto o sinal P_{SENS} indica que o sensor atuou, emitindo um pulso para o sistema de temporização do relé. Note na Figura 5 que, se em um passo de integração, houver uma troca de sinal em P_{BMS} o pulso em P_{SENS} não será gerado, uma vez que o valor do erro necessariamente terá passado por dentro da banda morta.

A Figura 6 apresenta a implementação do relé com temporização. O temporizador do relé é modelado por um integrador com "reset" que começa a atuar quando o sensor é sensibilizado (P_{SENS} passa de 0 para 1) e é "resetado" (entrada R com valor 1, isto é, VERDADEIRO) com o valor 0 se o sensor deixar de atuar ou ocorrer o pulso em P_{COM} (passa de 0 para 1) indicando mudança de posição do tap. A possibilidade de dupla temporização pode ser considerada através do "flip-flop" R-S, que inicialmente está em "reset", sendo escolhida a constante TR_{nom1} para temporização. Após a ocorrência do pulso indicando comutação (P_{COM}) a constante TR_{nom2} é selecionada para as mudanças subseqüentes, até P_{SENS} voltar a 0. No modelo, caso o limite máximo (Err_{max}) do erro absoluto normalizado pelo valor da banda morta (Err_{AN}) seja maior que 1, a temporização nominal (TR_{nom}) será reduzida de maneira inversamente proporcional ao erro, até o valor deste limite. Quando o valor do integrador do relé (Tmp_{rel}) suplantará a temporização efetiva (TR_{ef}) será gerado um pulso de atuação do relé (P_{REL}) para o mecanismo de mudança de tap. O modelo permite o uso simultâneo de dupla temporização e temporização inversa, embora na prática só seja comum o uso de uma delas de cada vez.

A implementação do retardo devido ao motor de acionamento do mecanismo de atuação é mostrada na Figura 7. O sinal $BLOQ_{COM}$ impede o "reset" do temporizador enquanto o pulso de comutação P_{COM} não ocorrer, o que significa que a mudança de tap não pode ser abortada após a ordem ser emitida ("atraso de transporte"). Um passo de integração (Δt) após o pulso em P_{COM} , tanto o temporizador relativo ao tempo de acionamento quanto aquele relativo ao relé são "resetados". Como leva um Δt para o integrador começar a atuar depois do pulso em

P_{REL} deve-se corrigir a constante TM_{com} para evitar acumulação de erro nas temporizações. Convém notar que o pulso em P_{COM} tem duração de apenas um Δt .

A Figura 8 mostra o cálculo da posição do tap e do seu valor. Quando ocorre o pulso do relé (P_{REL}), é gerado um pulso P_{SCOM} que amostra a variável P_{BMS} através de um bloco do tipo "sample & hold", guardando o sentido de variação do tap no instante de atuação do relé (P_{BMSH}). Isto é necessário para evitar que esta informação seja perdida caso o relé seja "resetado" antes do término da temporização do mecanismo de mudança. Quando ocorre o pulso em P_{COM} a posição do tap (N_{TAP}) é alterada de ± 1 (valor de P_{BMSH}), estando sujeita aos limites de variação em relação à posição neutra (N_{TAPmin} e N_{TAPmax}). O valor do tap é então calculado usando-se o incremento para cada posição (ΔTap), a posição atual (N_{TAP}) e o valor do tap para a posição neutra (Tap_{neut}). O valor final (variável Tap) também é retido através de um "sample & hold" controlado por P_{COM} .

As Figuras 5 a 8 mostram o modelo para controle de comutação de tap de tensão, porém o comutador de tap de fase pode ser modelado de forma similar, substituindo-se na Figura 5 os sinais V_m , V_{ref} e V_{nom} por P_m , P_{ref} e P_{nom} (respectivamente, potência ativa medida a ser controlada, valor de referência de potência e valor de potência para normalização do erro) e na Figura 8 os sinais ΔTap , Tap_{neut} , Tap por $\Delta\phi$, ϕ_{neut} e ϕ (respectivamente, variação de defasamento por posição de tap, valor do defasamento na posição neutra do tap e valor final do defasamento).

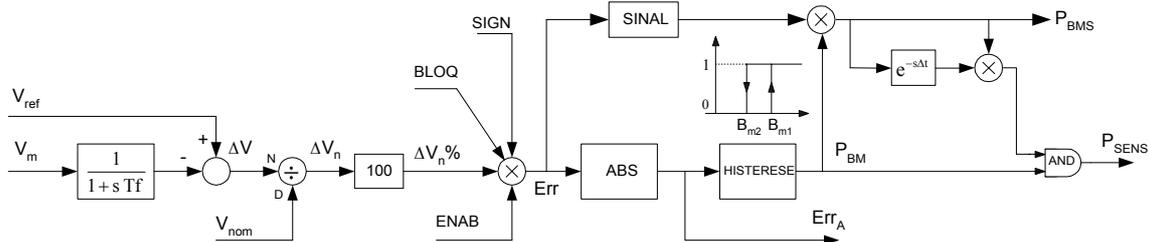


FIGURA 5 – Sensor com banda morta

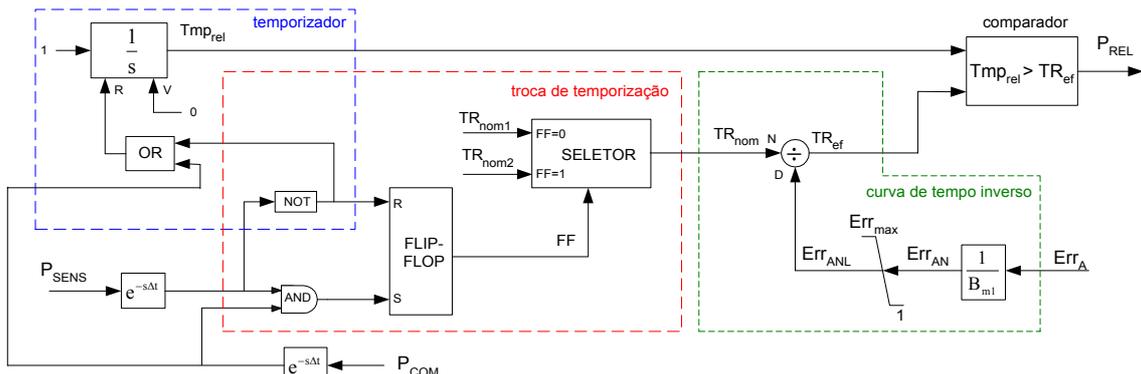


FIGURA 6 – Relé com temporização

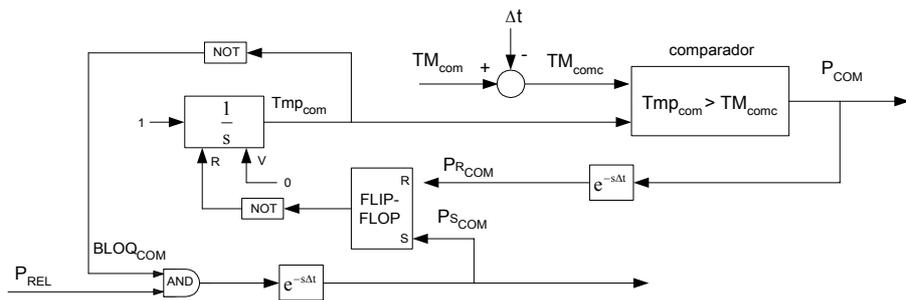


FIGURA 7 – Retardo devido ao motor de acionamento do mecanismo de comutação

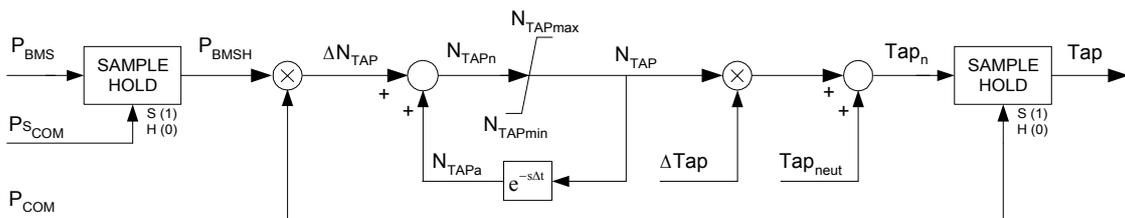


FIGURA 8 – Cálculo da posição e do valor do tap

5.0 - RESULTADOS

A fim de testar o modelo desenvolvido foi utilizado o sistema elétrico da Figura 9 como base para teste [8]. Este sistema consiste de 15 barras, com geradores nas barras 1, 2, 3 e 4 e cargas nas barras 11 (motor de indução) e 14 (carga estática tipo ZIP). As linhas de transmissão do anel de extra-alta tensão possuem compensação reativa e na barra 9 há um dispositivo SVC para suporte de potência reativa às cargas. Colocou-se um OLTC para controle da tensão na barra 14 e um transformador defasador ideal entre as barras 5 e 15 para manter o fluxo ativo em uma faixa de 1% em torno do valor inicial.

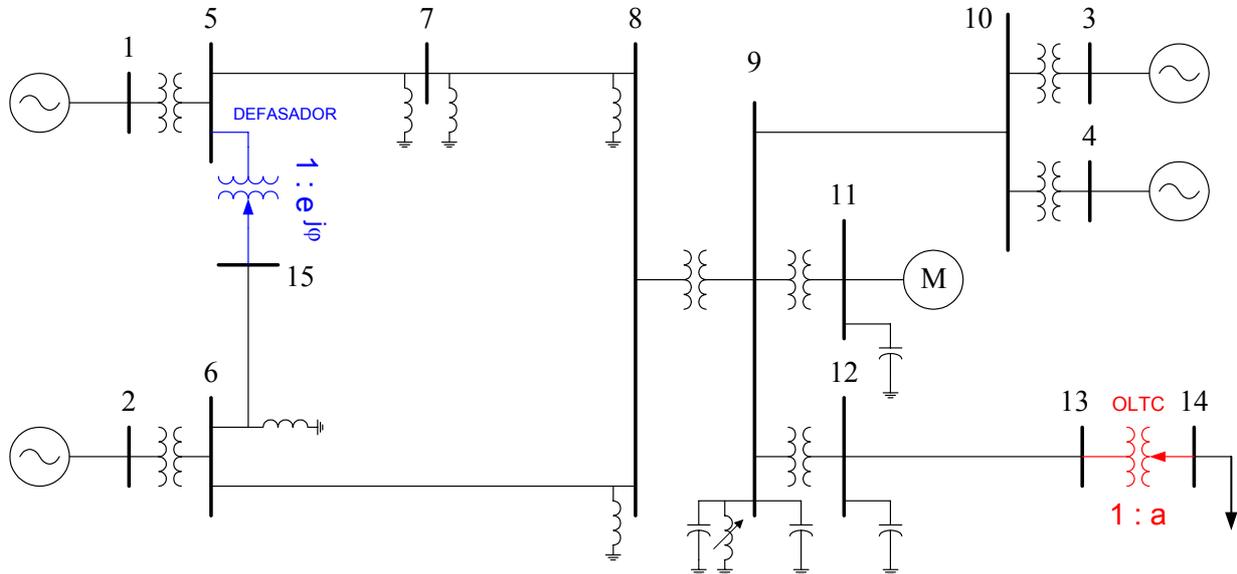


FIGURA 9 – Sistema teste

Os seguintes parâmetros foram utilizados em todas as simulações:

- Banda morta para OLTC e defasador: $B_{m1} = 1\%$ e $B_{m2} = 0.5\%$;
- Temporização nominal para relé : 50s para OLTC e 30s para defasador;
- Temporização do mecanismo de acionamento igual a 5s para OLTC e defasador;
- Número de posições de tap para OLTC e defasador: ± 16 ;
- Varição por posição de tap : 0.9375% para OLTC e 0.5° para defasador;
- Tap na posição neutra: 1 pu para OLTC e 0° para defasador;

As simulações executadas corresponderam a variação em degrau na carga da barra 14, com as seguintes condições:

CASO 1 - Defasador bloqueado, OLTC ativado e variação de +6% na carga

- OLTC com temporização fixa no relé (50s)
- OLTC com temporização variável do tipo tempo inverso (50s para $Err_A = B_{m1}$)

CASO 2 - Defasador bloqueado e variação de +7% na carga

- OLTC bloqueado
- OLTC com temporização fixa no relé (50s)

CASO 3 - OLTC bloqueado e variação de +6% na carga

- Defasador bloqueado
- Defasador com temporização fixa no relé (30s)

CASO 4 - Defasador com temporização fixa no relé (30s), OLTC com temporização fixa no relé (50s) e variação de +6% na carga

Os resultados do CASO 1 estão mostrados na Figura 10. Observa-se na Figura 10-(a) o degrau de variação na carga e as subsequentes alterações devidas à atuação do controle de Tap, uma vez que esta é dependente da tensão. O aumento inicial da carga provoca um afundamento da tensão na barra 14 que é gradualmente restaurada pelo OLTC (Figura 10-(b)). A tensão na barra 14 não volta exatamente ao valor inicial de 1 p.u. devido ao erro residual inerente ao uso de banda morta (erro menor que 1% no caso). A Figura 10-(c) mostra as variações discretas do tap do OLTC. As curvas relativas à simulação com temporização variável mostram uma atuação mais rápida do que as com temporização fixa, pois nas primeiras mudanças o erro de controle é maior, o que resulta em temporização menor (curva de tempo inverso).

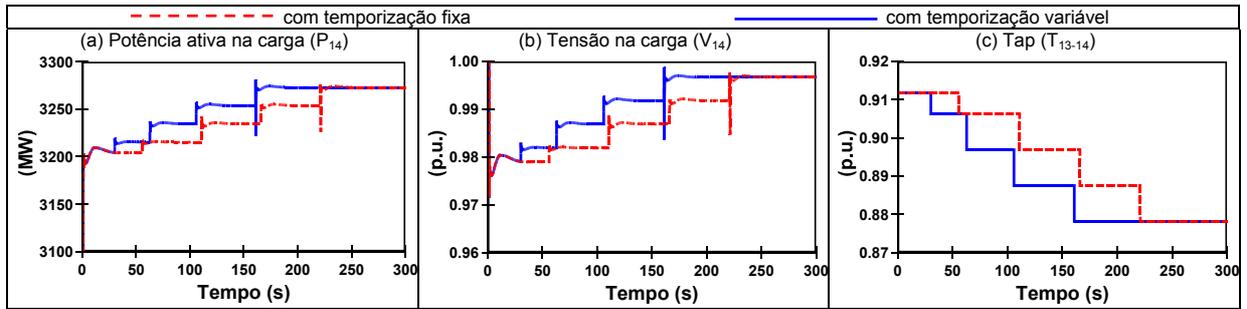


FIGURA 10 – Caso 1 : s/ defasador, c/ OLTC, $\Delta P_{14}=6\%$, comparação entre temporização fixa e variável

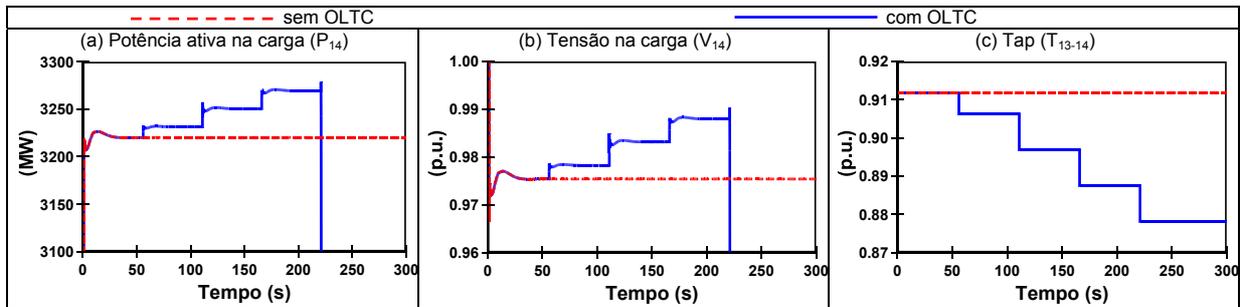


FIGURA 11 – Caso 2 : s/ defasador, $\Delta P_{14}=7\%$, comparação entre s/OLTC e c/ OLTC com temporização fixa

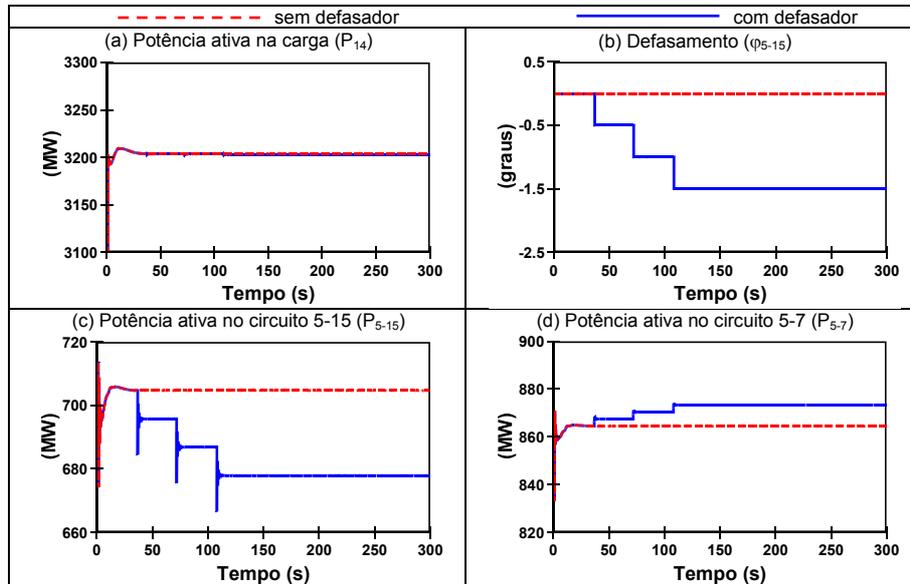


FIGURA 12 – Caso 3 : s/OLTC, $\Delta P_{14}=6\%$, comparação entre s/defasador e c/defasador com temporização fixa

Os gráficos da Figura 11 mostram os resultados do CASO 2 relativo à comparação das simulações com e sem atuação do OLTC. Verifica-se que com um aumento de 7% da carga da barra 14 a atuação do OLTC leva ao colapso de tensão devido ao efeito de restauração da carga promovido pelo controle da tensão. Portanto, torna-se recomendável congelar a atuação do controle de tap nestas situações.

A Figura 12 corresponde aos resultados do CASO 3, onde se vê a atuação do transformador defasador no controle do fluxo de potência ativa no circuito 5-15. Quando o defasador está bloqueado, o aumento da carga na barra 14 é suprido em parte com o aumento dos fluxos nos circuitos 5-15 e 5-7. Ao se ativar o defasador, o fluxo no circuito 5-15 é controlado no valor inicial e portanto toda a variação é transferida para o circuito 5-7, cuja potência ativa sofre então um aumento maior que na situação anterior.

Os resultados apresentados na Figura 13 mostram a atuação conjunta dos dois equipamentos, para verificar a interação entre eles. Observa-se uma mudança a mais de tap no defasador em relação ao caso CASO 3-(b) devido à atuação do OLTC na restauração da carga, provocando aumento adicional no fluxo do circuito 5-15. Não houve problemas na interação entre os controles dos dois equipamentos, mas deve-se estar atento à possibilidade desta interação causar mudanças muito frequentes de tap, que podem vir a danificar os elementos comutadores.

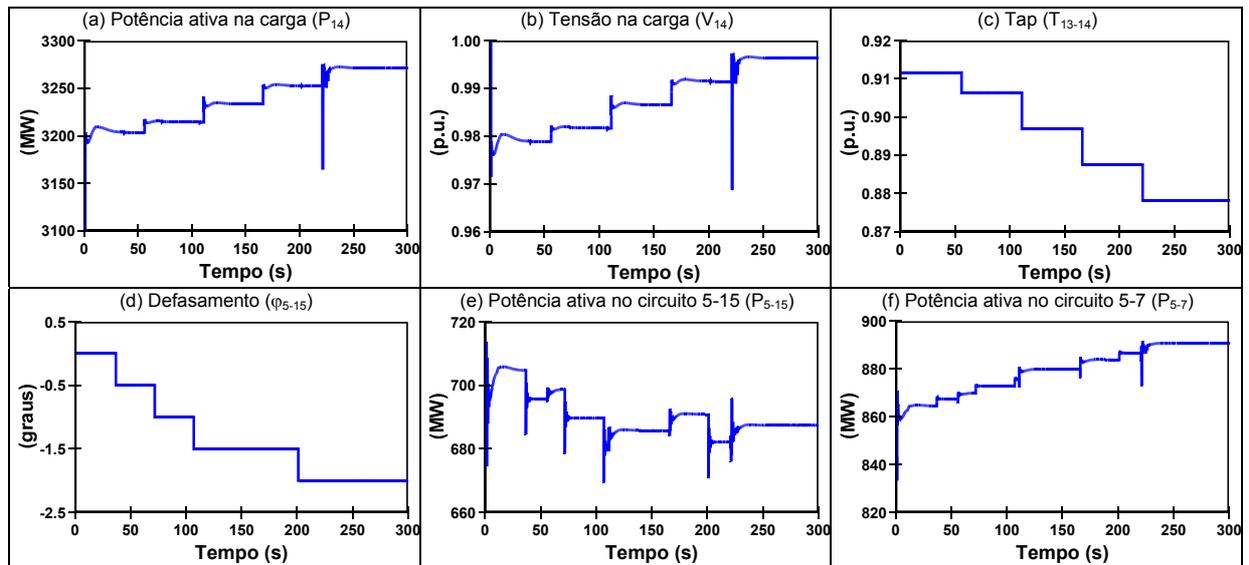


FIGURA 13 – Caso 4 : c/ defasador, c/ OLTC, ambos com temporização fixa, $\Delta P_{14}=6\%$,

6.0 - CONCLUSÃO

Este artigo descreveu as principais características na modelagem de equipamentos com comutação sob carga para estudos envolvendo simulação dinâmica de sistemas de potência. O modelo mostrado foi implementado no programa ANATEM usando o recurso de controladores definidos pelo usuário (CDU). Foram analisados alguns casos hipotéticos representando situações típicas de controle de tensão e potência de forma lenta, onde foram simulados equipamentos com comutação sob carga para controle de tensão e de fluxo de potência, de forma separada e conjunta. Não se observou nenhuma interação adversa de controle no caso de operação conjunta, mas deve-se estar atento a esta possibilidade quando vários equipamentos deste tipo se encontram eletricamente próximos. Os resultados das simulações comprovaram a adequação do modelo e a capacidade do programa ANATEM em poder representar estes tipos de equipamento.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MR Maschinenfabrik Reinhausen - Technical Data On-Load Tap Changer Type H, TD 187/93 en-0393/1000
- (2) KUNDUR, P. - Power System Stability and Control, EPRI Power System Engineering Series, 1 ed, New York, McGraw-Hill, 1994.
- (3) MONTICELLI, A. - Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Editora Edgard Blücher Ltda, 1983
- (4) TAYLOR, C. - Power System Voltage Stability, EPRI Power System Engineering Series, 1 ed, New York, McGraw-Hill, 1994.
- (5) CALOVIC, M.S. - Modeling and Analysis of Under Load Tap Changing Transformer Control Systems, IEEE Transactions on Power System Apparatus and Systems, vol. PAS-103, nº 7, July 1984, p. 1909-1915.
- (6) BREMERMANN, L.E. ET AL. - Implementação e Simulação de Modelos Dinâmicos Discretos para Representar Transformadores com Mudança de Tap sob Carga (ULTC), XVII SNPTEE, GAT-05, Uberlândia, 2003
- (7) RANGEL, R.D.; GOMES JR.,S.; FERRAZ, J.C.R. - Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM / Manual do Usuário - V10-11/06, Relatório CEPEL DP/DSE 53389/06, 2006
- (8) GUIMARÃES, C.H.C. - Simulação Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Considerando os Fenômenos de Longa Duração, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Dezembro de 2003