

Referências bibliográficas

- [1] R.B. Prada, Estabilidade de Tensão, Relatório 1, Versão 2, Convênio ECV-310/86 entre as Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobras e a Fundação Padre Leonel Franca, 1986.
- [2] C.W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, 1994.
- [3] GCOI / Eletrobras - Grupo Coordenador para Operação Interligada, 1997, Análise das perturbações dos dias 24 e 25/04/97 no sistema interligado S/SE/CO, Relatório SCO/SCEL-01/97.
- [4] D.R. MacLeod. “New Equivalent Circuits for Autotransformer and Transformer Circuits”, General Electric Review, Vol 32, p. 120-126, Feb, 1929.
- [5] A. Boyajian. “New Theory of Transformer and Autotransformer Circuits”, General Electric Review, Vol 32, p. 110-119, Feb, 1929.
- [6] A. Boyajian. “Inversion Currents and Voltages in Auto-Transformers”, AIEE Transactions, Vol 49, p. 810-818, April, 1930.
- [7] A. Boyajian. “Inversion Currents and Voltages in Auto-Transformers”, Discussion by I.H. Summers, AIEE Transactions, Vol 49, p. 819, April, 1930.
- [8] V.D.E. Leitsätze für den Schutz Electricischer Anlagen gegen Überspannungen, p. 242, 0145/1933.
- [9] L.V. Bewley. “Equivalent Circuits of Transformer and Reactors to Switching Surges”. AIEE. Transactions Vol. 58, p.797-802, 1939.
- [10] H.A. Peterson, W.J. Rudge, A.C. Monteith and L.R. Ludwig. “Protector Tubes for Power Systems”. AIEE. Trans. Vol. 59, p.282-288, 1940.

[11] E. Clarke, *Circuit Analysis of A-C Power Systems*, Vol 2, New York, John Wiley & Sons, 1950.

[12] L.C.A. Ferreira e A.C.Z. Souza. “Método Estático para Avaliação da Influência de Load Tap Changer na Estabilidade de Tensão”. VII SEPOPE, 2000, Curitiba. VII SEPOPE, 2000.

[13] C.A. Ferreira, R.B. Prada e V.M. da Costa. “Avaliação do Modelo Atual de Transformadores com *Tap* Variável em Estudos de Estabilidade de Tensão”. VIII CLAGTEE – Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission, Ubatuba-SP, Outubro, 2009.

[14] C.M. Close, *Circuitos Lineares*, 2 edição, LTC S.A., 1975

[15] V. Ajjarapu e C. Christy. “The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 416:423, February, 1992.

[16] L.C.G. Leite. “Análise Estática da Estabilidade de Tensão Via Injeção de Corrente”. Dissertação de mestrado UFJF, Inc., 2002.

[17] C.A. Cañizares, F.L. Alvarado, C.L. De Marco, I. Dobson and W.F. Long. “Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 673-683, May 1992.

[18] C.A. Ferreira, V.M. da Costa; B.B. Souza, A.L.S. Reis. “Uma Nova Abordagem para Avaliação do Ponto de Máximo Carregamento de Sistemas Elétricos de Potência”. XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática*, 2004.

[19] P. Gomes, M.G. dos Santos e R.B. Prada. “Introdução dos Estudos sobre Estabilidade de Tensão no Planejamento da Operação Elétrica”. XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, setembro, 1997.

- [20] R.B. Prada, E.G.C. Palomino, L.A.S. Pilotto e A. Bianco. “Identificação do Ramo de Transmissão Crítico para Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão.” Sociedade Brasileira de Automática, 2006.
- [21] A.E. Fitzgerald and C. Kingsley Jr, Electric Machine, 2nd edition, Tokio, McGraw- Hill F, 1961.
- [22] Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Ed. 4, East Pittsburg: Westinghouse, 1964.
- [23] Members of the Staff of the Department of Electrical Engineering Massachussets Institute of Technology, Magnetic Circuits and Transformers, Ed. 15, Cambridge: MIT Press, Massachussets, 1965.
- [24] M. Kostenko and L. Piotrovsky, Electrical Machines, Vol 1, Peace Publishers, Moscow, 1967.
- [25] I.L. Kosow. Máquinas Elétricas e Transformadores, Vol 1, Globo, Porto Alegre-RS, 1982.
- [26] G. Turan, Electric Power Transmission Engineering-Analysis and Design, John Wiley & Sons, Canada, 1986.
- [27] V. Del Toro, Basic Electric Machines, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [28] F.A.N. de Campos. Notas de Aula de Máquinas de Corrente Alternada, Eletrotécnica/CTU/UFJF, Juiz de Fora, 1994.
- [29] J.J. Grainger and W.D. Stevenson, Jr, Power System Analysis, New York, McGraw-Hill, 1994.
- [30] A.J. Monticelli e A. Garcia, Introdução a Sistemas de Energia Elétrica, Editora da Unicamp, Campinas, S.P., 2003.

- [31] M. Nahvi e J.A. Edminister, Theory and Problems of Electric Circuits, Ed. 4, McGraw Hill, Schaum's Outline Series, 2003.
- [32] F.A.N. de Campos. Transformador (Apostila), Eletrotécnica/CTU/UFJF, Juiz de Fora, 2010.
- [33] P. Kundur, Power System Stability and Control. 1 Ed., New York, McGraw-Hill Inc. 1994.
- [34] General Electric Company, Transformer Connections, Power Transformer Department, Pittsfield, MA, 1970.
- [35] A.J. Monticelli, State Estimation in Electric Power System, Kluwer Academic Publisher, Norwell, MA, 1999.
- [36] F.R.A. Baracho e F.F. Café. "Análise de Instabilidade de Tensão em Sistema Elétricos". XI SNPTEE, Rio de Janeiro, 1991.
- [37] M.Z. El-Sadek, G.A. Mahmoud, M.M. Dessouky and W.I. Rashed, "Tap Changing Transformer Role in Voltage Stability Enhancement". Electric Power System Research, 1999.
- [38] IEEE/PES, Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools, Cap 2: Basic Theoretical Concepts, August 2002 (Final Document).
- [39] A.J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, 1 ed., Edgard Blucher Ltda, São Paulo, S.P., 1983.
- [40] J.A. Passos Filho. "Modelagem e Incorporação de Dispositivos de Controle no Problema de Fluxo de Potência". Dissertação de Mestrado UFJF, 2000.
- [41] C.A. Ferreira. "Novas Aplicações da Formulação de Injeção de Corrente em Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado UFJF, 2003.

[42] R.B. Prada e J.O.R. dos Santos. “Load Modelling in Static Voltage Stability Índices Calculation”. European Transactions on Electrical Power, Vol. 9, No. 5, páginas 305-308, setembro / outubro 1999.

[43] L.C.G. Leite. “Análise Estática da Estabilidade de Tensão Via Injeção de Corrente”. Dissertação de Mestrado UFJF, 2002.

[44] PSTCA – Power System Test Case Archive, Disponível no Sítio: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>. Acessado no dia 08/01/2011.

[45] C.A. Ferreira e V.M. da Costa. “Controle de Tensão no Fluxo de Potência Continuado – Modelagem e Efeitos na Estabilidade de Tensão”. Controle & Automação, Vol.15, nº. 4, 2004.

[46] W.F. Alves. “Proposição de Sistemas Teste para Análise Computacional de Sistemas de Potência”. Dissertação de Mestrado UFF, 2007.

[47] STB – Sistemas-Teste Brasileiros para Uso Didático e Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência, Disponível no sítio: <http://www.sistemas-teste.com.br/>. Acessado no dia 08/01/2011.

[48] R.B. Prada, E.G.C. Palomino, J.O.R. dos Santos, A. Bianco e L.A.S. Pilotto, “Voltage Stability Assessment for Real Time Operation”, Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, Issue 2, pp.175-180, March 2002.

[49] IC - Instituto de Computação / UFF. Dissertação de S.B. Chaves e Programa ORGANON Disponíveis no sítio: <http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/> Acessado no dia 08/01/2011.

[50] S.B. Chaves. “Análise Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência via Aplicativo Computacional Integrado: ORGANON”. Dissertação de Mestrado UFF, 2008.

[51] Universidade de Waterloo. Programa PSAT Disponíveis no sítio: <http://www.power.uwaterloo.ca/~f milano/downloads.htm>. Acessado no dia 08/01/2011.

Apêndice I

Circuitos Π Equivalente de Transformador com *Tap* Variável

I.1

Circuito Π Equivalente ao Modelo Usual de Transformador com *Tap* Variável

Seja o circuito Π , com impedâncias \dot{A} , \dot{B} e \dot{C} genéricas, apresentado na Figura I.1.

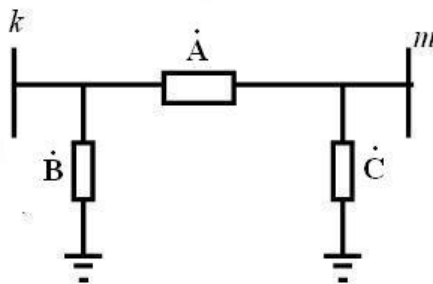


Figura I.1: Circuito Π Genérico

Deste circuito tem-se:

$$\dot{I}_{km} = \left(\frac{1}{\dot{A}} + \frac{1}{\dot{B}} \right) \dot{V}_k - \left(\frac{1}{\dot{A}} \right) \dot{V}_m \quad (\text{I.1})$$

$$\dot{I}_{mk} = - \left(\frac{1}{\dot{A}} \right) \dot{V}_k + \left(\frac{1}{\dot{A}} + \frac{1}{\dot{C}} \right) \dot{V}_m \quad (\text{I.2})$$

Por outro lado, do circuito apresentado na Figura 3.4, referente ao modelo usual de transformador com *tap* variável, tem-se:

$$\dot{I}_{km} = \left(\frac{a^2}{\dot{Z}} \right) \dot{V}_k - \left(\frac{a}{\dot{Z}} \right) \dot{V}_m \quad (\text{I.3})$$

$$\dot{I}_{mk} = -\left(\frac{a}{\dot{Z}}\right)V_k + \left(\frac{1}{\dot{Z}}\right)\dot{V}_m \quad (\text{I.4})$$

Comparando-se (I.1) com (I.3) e (I.2) com (I.4), chega-se aos valores das impedâncias \dot{A} , \dot{B} e \dot{C} , referentes ao modelo usual de transformador com *tap* variável, apresentados na Figura 3.9:

$$\dot{A} = \frac{\dot{Z}}{a} \quad (\text{I.5})$$

$$\dot{B} = \frac{\dot{Z}}{a(a-1)} \quad (\text{I.6})$$

$$\dot{C} = \frac{\dot{Z}}{1-a} \quad (\text{I.7})$$

De (I.5), (I.6) e (I.7), conforme apresentado em [7] e [11], verifica-se que:

$$\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} = 0 \quad (\text{I.8})$$

O circuito da Figura I.1 é então chamado de circuito delta-ressonante, de acordo com [11]. Isso significa que não haverá circulação de corrente elétrica no transformador quando tensão é aplicada no primário e o secundário permanece em vazio. Do circuito da Figura 3.4, observa-se facilmente que, se tensão é aplicada à barra k e não há carga na barra m , as correntes no primário e no secundário são nulas:

$$\dot{I}_k = \dot{I}_m = 0$$

Como o circuito da Figura I.1 é equivalente ao circuito da Figura 3.4, o mesmo resultado deve ser obtido. De fato, aplicando tensão na barra k , e deixando o secundário em vazio:

$$\dot{I}_m = 0$$

Tem-se, então, um circuito cuja impedância equivalente é dada por:

$$\dot{Z}_{eq} = \frac{\dot{B}(\dot{A} + \dot{C})}{\dot{B} + \dot{A} + \dot{C}}$$

De (I.8), conforme esperado:

$$\dot{Z}_{eq} = \infty \Rightarrow \dot{I}_k = 0$$

I.2

Circuito Π Equivalente ao Modelo Proposto de Transformador com *Tap* Variável

Analisando agora o circuito apresentado na Figura 4.3, referente ao modelo proposto de transformador com *tap* variável, tem-se:

$$\dot{I}_{km} = \left[\frac{2a^2}{\dot{Z}(a^2 + 1)} \right] \dot{V}_k - \left[\frac{2a}{\dot{Z}(a^2 + 1)} \right] \dot{V}_m \quad (\text{I.9})$$

$$\dot{I}_{mk} = - \left[\frac{2a}{\dot{Z}(a^2 + 1)} \right] \dot{V}_k - \left[\frac{2}{\dot{Z}(a^2 + 1)} \right] \dot{V}_m \quad (\text{I.10})$$

Comparando-se (I.1) com (I.9) e (I.2) com (I.10), chega-se aos valores das impedâncias \dot{A} , \dot{B} e \dot{C} , referentes ao modelo proposto de transformador com *tap* variável, apresentados na Figura 4.8:

$$\dot{A} = \frac{\dot{Z}(a^2 + 1)}{2a} \quad (\text{I.11})$$

$$\dot{B} = \frac{\dot{Z}(a^2 + 1)}{2a(a - 1)} \quad (\text{I.12})$$

$$\dot{C} = \frac{\dot{Z}(a^2 + 1)}{2(1 - a)} \quad (\text{I.13})$$

Os valores dessas impedâncias também poderiam ter sido obtidos substituindo-se \dot{Z} por $\frac{\dot{Z}(a^2 + 1)}{2}$, que é o valor total da impedância referida ao lado m , segundo o modelo proposto apresentado na Figura 4.4, nas expressões para \dot{A} , \dot{B} e \dot{C} , referentes ao modelo usual, mencionadas na Seção I.1.

De (I.11), (I.12) e (I.13) verifica-se que a soma das impedâncias continua sendo nula, conforme (I.8). Logo, o circuito Π equivalente ao modelo proposto também é delta-ressonante, como o circuito Π equivalente ao modelo usual, conforme apresentado na seção anterior e em [11].

Apêndice II

Exemplos da Literatura sobre Variação de *Tap* de Transformador com *Tap* Variável

II.1

Exemplos de Artigos

Nas Figuras II.1 e II.2, retiradas de [36] e [37], verifica-se que, ao variar o *tap* de um transformador em um sistema de 2 barras, o ponto de máximo carregamento permanece o mesmo. Essas curvas são semelhantes à apresentada na Figura 3.12. Verifica-se ainda que, se o modelo da carga for impedância constante, a ação de controle de tensão na região anormal terá efeito oposto ao esperado, assim como foi mostrado na Figura 4.13. Essas informações são diferentes das obtidas utilizando-se o modelo proposto, apresentado no Capítulo 4. Segundo o modelo proposto, o ponto de máximo carregamento varia quando o *tap* é modificado e uma ação de controle de tensão tem efeito oposto ao esperado na região anormal, quando o modelo de carga é potência constante, de acordo com o que foi apresentado na Seção 2.1.3.

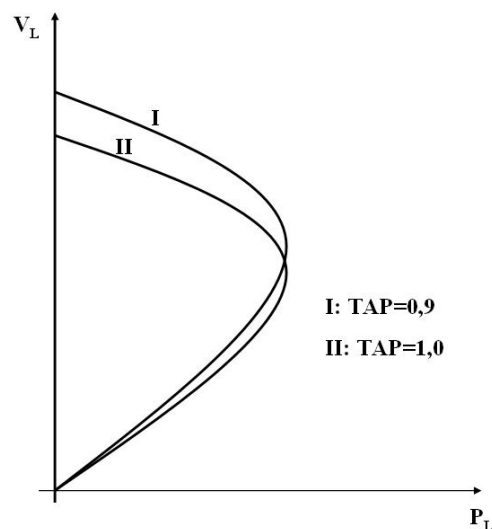


Figura II.1: Efeito da Variação de *Tap* de Transformador com *Tap* Variável [36]

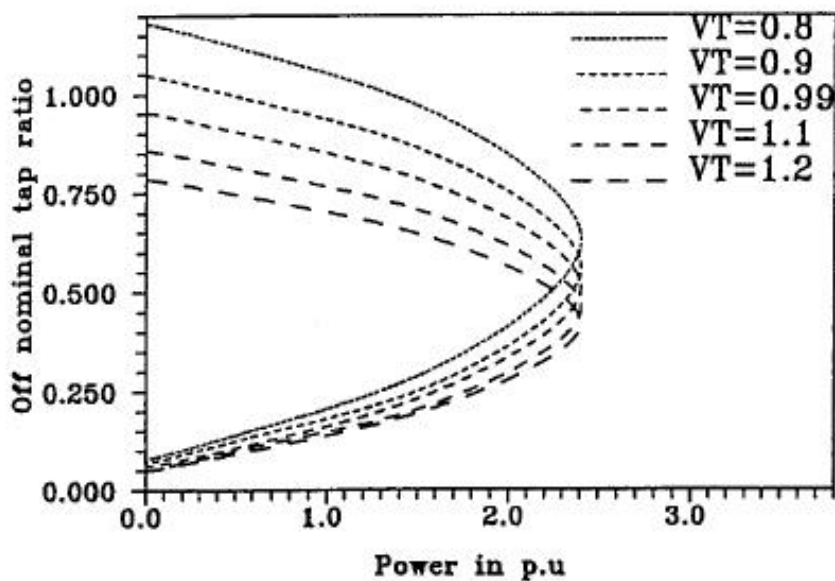


Figura II.2: Efeito da Variação de *Tap* de Transformador com *Tap* Variável [37]

II.2

Exemplo de Relatório IEEE

É apresentado um exemplo extraído de relatório do IEEE sobre estabilidade de tensão [38], indicando que o ponto de máximo carregamento não varia quando o *tap* é alterado e que uma ação de controle de tensão na região anormal tem efeito oposto ao esperado, quando o modelo da carga é impedância constante. Essas informações coincidem com o que foi apresentado na Seção II.1. Porém, outra abordagem foi utilizada no relatório, que será detalhada a seguir. Destaca-se novamente que, de acordo com modelo proposto, apresentado no Capítulo 4, o ponto de máximo carregamento varia quando o *tap* é alterado e que uma ação de controle de tensão tem efeito oposto ao esperado na região anormal, quando o modelo de carga é potência constante.

Considere um sistema no qual um gerador alimenta uma carga através de uma linha de transmissão e de um transformador com *tap* variável, conforme apresentado na Figura II.3. Para simplificar, as impedâncias da linha de transmissão e da carga foram associadas e o fator de potência é unitário. A carga desse circuito varia exponencialmente com a tensão:

$$P = P^0 \left(\frac{V_2}{V_2^0} \right)^{\alpha T} \quad (\text{II.1})$$

ou, com carga incorporando o transformador ideal:

$$P = P^0 \left(\frac{rV}{V_2^0} \right)^{\alpha T} \quad (\text{II.2})$$

Nota-se que a equação genérica engloba o modelo impedância constante, bastando fazer $\alpha T = 2$.

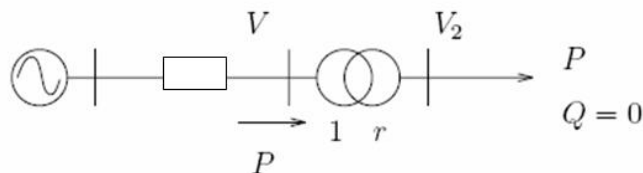


Figura II.3: Circuito do Exemplo

O objetivo do transformador no circuito da Figura II.3 é fazer com que a tensão secundária V_2 seja igual a V_2^0 , de forma que a potência na carga permaneça constante, e igual a P^0 .

Sob as condições descritas, o sistema apresentado na Figura II.3 foi perturbado através da diminuição do valor do *tap* do transformador. O comportamento do circuito pode ser analisado a partir da Figura II.4. Pode ser observado, inicialmente, que o ponto de máximo carregamento C , não varia quando o *tap* é modificado. No que diz respeito ao controle de tensão, duas condições podem ocorrer:

- Se o ponto de operação inicial é S (região normal), ao diminuir o *tap* do transformador, é reduzido o valor da tensão secundária do transformador. Assim, o *tap* do transformador tem seu valor automaticamente elevado, de forma a retornar a carga para sua condição inicial. Observa-se, então, que a ação de controle de tensão tem efeito desejado.
- Por outro lado, se o ponto de operação inicial é U (região anormal), ao diminuir o valor do *tap* do transformador, eleva-se a tensão secundária. Assim, o *tap* do transformador é reduzido de forma a retornar a carga para seu valor original. Entretanto, essa redução do *tap* faz com que a tensão secundária aumente mais ainda. Observa-se, então, que, para pontos de operação na região anormal, a ação de controle de tensão produz efeito oposto ao desejado para modelo de carga exponencial, ou impedância constante com $\alpha T = 2$.

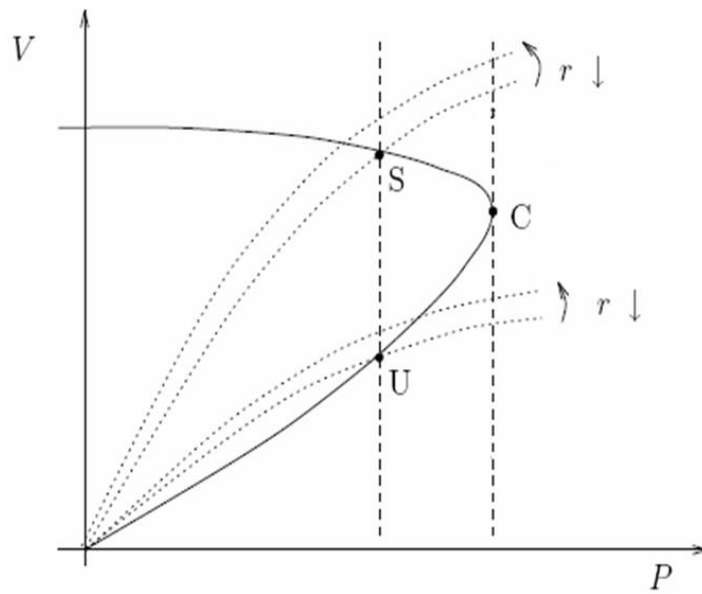


Figura II.4 : Efeitos da Variação do *Tap* [38]

A análise apresentada na Figura II.4 considera que o transformador ideal faz parte da carga, de acordo com (II.2). Considerando (II.1), como nos Capítulos 3 e 4, pode-se chegar às mesmas conclusões de acordo com a Figura II.5. Observa-se que, com a redução do *tap* do transformador, tem-se na região normal o novo ponto de operação S' , com tensão secundária reduzida em relação a S ; e na região anormal, o novo ponto de operação U' , com tensão superior em relação a U .

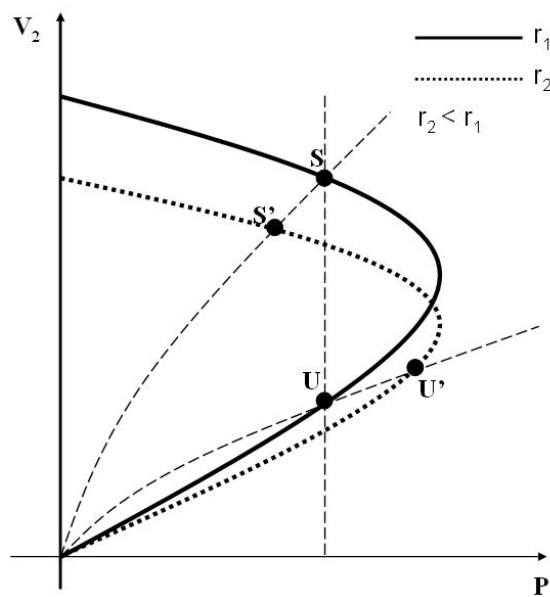


Figura II.5: Efeitos da Variação do *Tap* a Partir de (II.1)

Resumindo, a partir de [36], [37] e [38], verifica-se que, para um sistema de 2 barras, tendo um transformador com *tap* variável entre a geração e a carga, o ponto de máximo carregamento é o mesmo independente do valor do *tap* do transformador e que uma ação de controle de tensão na região anormal tem efeito oposto ao esperado se o modelo da carga é impedância constante. Essas informações são diferentes das obtidas a partir do modelo proposto, apresentado no Capítulo 4, segundo o qual o ponto de máximo carregamento varia quando o *tap* é modificado e ações de controle de tensão tem efeito oposto ao esperado quando o modelo da carga é potência constante.

Apêndice III

Impedâncias do Modelo Proposto de Transformador com Tap Variável

III.1

Obtenção das Impedâncias através do Teste de Curto-Circuito no Transformador

Conforme apresentado em [21] a [25], [27] a [29] e [32], o circuito da Figura 4.1 pode ser obtido através do teste de curto-circuito no transformador. Entretanto, os valores $\dot{Z}_k(\Omega)$ e $\dot{Z}_m(\Omega)$, referentes às impedâncias de cada enrolamento, não são obtidos diretamente.

Através do curto-circuito, efetuado com *tap* nominal, é obtida a impedância total referida a um dos lados do transformador, normalmente ao lado de alta tensão. Esta é a impedância utilizada pelo modelo usual de transformador com *tap* variável, conforme apresentado na Seção 3.1.3.2, sendo utilizada no cálculo das impedâncias de cada enrolamento, como será apresentado a seguir. Na verdade, o valor desta impedância é dependente da posição do *tap* [30]. Entretanto, como é pequena a variação do *tap* em torno de 1 p.u., é justificado seu valor correspondente ao *tap* nominal.

Considerando que o lado de alta-tensão do circuito da Figura 4.1 é o lado *m*, a impedância total determinada através do teste de curto-circuito é dada por:

$$\dot{Z}_{total_m} = \dot{Z}'_k(\Omega) + \dot{Z}_m(\Omega)$$

onde:

$$\dot{Z}'_k(\Omega) = \dot{Z}_k(\Omega) \left(\frac{N_m}{N_k} \right)^2$$

De acordo com [21], [22], [27], [28] e [32]:

$$\dot{Z}'_k(\Omega) = \dot{Z}'_m(\Omega) = \frac{\dot{Z}'_{total_m}}{2} \quad (III.1)$$

Justificando (III.1), segundo [27] essa equação baseia-se na suposição de que o transformador foi bem construído.

Em [23] informa-se que (III.1) é uma aproximação. Exemplos numéricos apresentados em [25] e [29], de fato, mostram que os valores das impedâncias são aproximadamente iguais. De uma outra forma, em [24] apresenta-se o triângulo referente ao curto-circuito, conforme Figuras III.1 e III.2. Como o valor da corrente é constante, verifica-se que também foi considerado que o valor das impedâncias é aproximadamente igual, observando-se as duas partes de cada cateto (com comprimentos próximos).

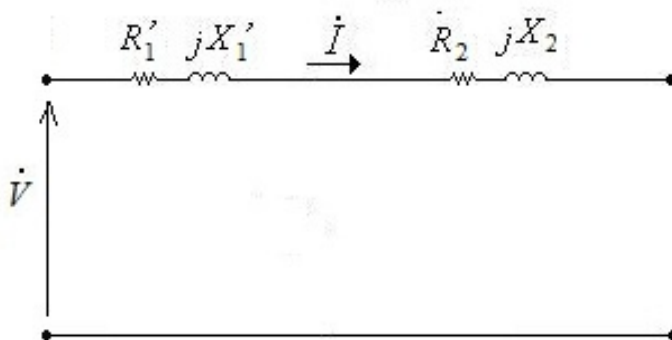


Figura III.1: Curto-Circuito para Determinação do Valor Total da Impedância Apresentado em [24]

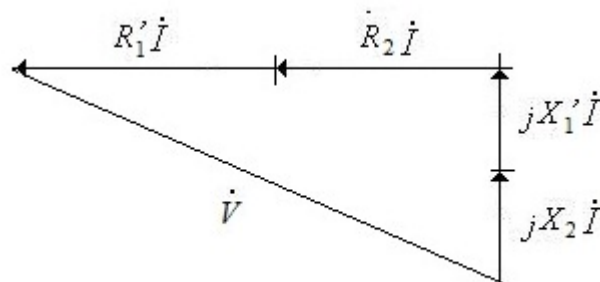


Figura III.2: Triângulo Referente ao Curto-Circuito Apresentado em [24]

Nesta tese, assim como em [21], [22], [27], [28] e [32], tem-se os valores em (III.2) e (III.3) para as impedâncias do modelo físico apresentado na Figura 4.1. É importante destacar que essas impedâncias não podem ser obtidas

diretamente, mesmo que fossem realizados dois testes de curto-circuito, um em cada lado do transformador, devido à dependência linear entre as equações geradas, como mostrado na Seção III.2.

$$\dot{Z}_k(\Omega) = \frac{\dot{Z}_{total_m}}{2} \left(\frac{N_k}{N_m} \right)^2 \quad (\text{III.2})$$

$$\dot{Z}_m(\Omega) = \frac{\dot{Z}_{total_m}}{2} \quad (\text{III.3})$$

Por outro lado, as impedâncias-base são dadas por:

$$Z_{base_k} = \frac{(V_{base_k})^2}{S_{base}} \quad (\text{III.4})$$

$$Z_{base_m} = \frac{(V_{base_m})^2}{S_{base}} \quad (\text{III.5})$$

Como:

$$\frac{V_{base_k}}{V_{base_m}} = \frac{N_k}{N_m}$$

(III.4) pode ser reescrita:

$$Z_{base_k} = \frac{(V_{base_m})^2}{S_{base}} \left(\frac{N_k}{N_m} \right)^2 \quad (\text{III.6})$$

Logo:

$$\dot{Z}_k(p.u.) = \dot{Z}_m(p.u.) = \frac{\dot{Z}_{total_m}}{2} \frac{S_{base}}{(V_{base_m})^2} \quad (\text{III.7})$$

De (III.2) e (III.3), verifica-se que as impedâncias $\dot{Z}_k(\Omega)$ e $\dot{Z}_m(\Omega)$ guardam relação quadrática de transformação. Porém, de (III.6) e (III.5), tem-se que as impedâncias-base dos lados k e m também apresentam relação quadrática. Assim, as impedâncias em p.u. nos lados k e m são iguais, conforme (III.7) e circuito apresentado na Figura 4.2, referente ao modelo físico em p.u. com impedâncias idênticas. A equação (III.7) pode, ainda, ser escrita como:

$$\dot{Z}_k(p.u.) = \dot{Z}_m(p.u.) = \frac{\dot{Z}}{2} \quad (\text{III.8})$$

conforme valores das impedâncias do modelo proposto para transformador com *tap* variável apresentados na Figura 4.3.

Observa-se que neste apêndice foram calculados os valores das impedâncias do modelo proposto partindo-se do modelo usual de transformador com *tap* variável (obtido a partir do teste de curto-circuito), enquanto que no Capítulo 4 parte-se do modelo físico do transformador.

III.2

Tentativa de Obtenção das Impedâncias através de Dois Testes de Curto-Circuito no Transformador

Conforme apresentado na Seção III.1, com o lado k em curto-circuito, obtém-se a impedância total referida ao lado m :

$$\dot{Z}_{total_m} = \dot{Z}_k(\Omega) \left(\frac{N_m}{N_k} \right)^2 + \dot{Z}_m(\Omega) \quad (\text{III.9})$$

Por outro lado, com o lado m em curto-circuito, obtém-se a impedância total referida ao lado k :

$$\dot{Z}_{total_k} = \dot{Z}_k(\Omega) + \dot{Z}_m(\Omega) \left(\frac{N_k}{N_m} \right)^2 \quad (\text{III.10})$$

Matricialmente, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{N_m}{N_k} \right)^2 & 1 \\ 1 & \left(\frac{N_k}{N_m} \right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_k \\ \dot{Z}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{total_m} \\ \dot{Z}_{total_k} \end{bmatrix}$$

onde observa-se que o determinante da matriz é nulo, pois as equações geradas pelos dois testes de curto-circuito são linearmente dependentes, ou seja, multiplicando-se (III.9) por $\left(\frac{N_k}{N_m} \right)^2$, obtém-se (III.10). Assim, não é possível determinar \dot{Z}_k e \dot{Z}_m por esse método.

Apêndice IV

Impedâncias do Modelo Proposto de Autotransformador com *Tap* Variável

IV.1

Conceitos Básicos sobre Autotransformador

Uma das características principais dos transformadores convencionais é o isolamento elétrico que existe entre os enrolamentos primário e secundário [27]. O autotransformador difere do transformador convencional pois os seus enrolamentos são, ao mesmo tempo, eletricamente conectados e acoplados por um fluxo mútuo [29].

Teoricamente, um autotransformador é definido como um transformador que só tem um enrolamento. Na verdade, um transformador de enrolamentos múltiplos pode ser considerado um autotransformador, se todos os enrolamentos são ligados em série, em adição ou oposição, para formar um único enrolamento [25].

De acordo com [23], internamente o autotransformador é exatamente igual a um transformador convencional. Logo, seu circuito equivalente pode ser derivado do modelo do transformador convencional de dois enrolamentos, como será apresentado.

IV.1.1

Autotransformador Ideal

De [31], tem-se a Figura IV.1 e as equações referentes a um autotransformador ideal:

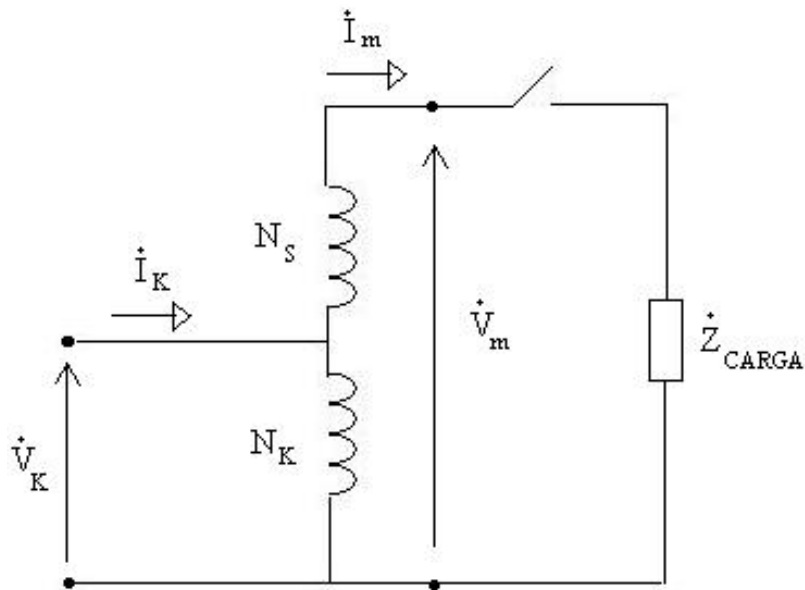


Figura IV.1: Autotransformador Ideal

$$\frac{\dot{V}_m}{\dot{V}_k} = \frac{N_s + N_k}{N_k}$$

onde N_k é o enrolamento comum ao primário e ao secundário, enquanto N_s , denominado de enrolamento série, é referente somente ao secundário.

Considerando-se que:

$$N_m = N_k + N_s$$

tem-se:

$$\frac{\dot{V}_m}{\dot{V}_k} = \frac{N_m}{N_k} \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{\dot{I}_m}{\dot{I}_k} = \frac{N_k}{N_m} \quad (\text{IV.2})$$

$$\frac{\dot{Z}'_{CARGA}}{\dot{Z}_{CARGA}} = \left(\frac{N_k}{N_m} \right)^2 \quad (\text{IV.3})$$

Considerando-se o autotransformador como sendo um quadripolo, com duas entradas e duas saídas, o comportamento observado é o mesmo comparado ao transformador convencional, conforme (IV.1), (IV.2) e (IV.3) [26].

Visto dos terminais, o mesmo efeito de transformação nas tensões, correntes e impedâncias, pode ser obtido por meio dos circuitos apresentados nas Figuras IV.2 (A) ou (B), referentes a um autotransformador e a um transformador convencional respectivamente [21].

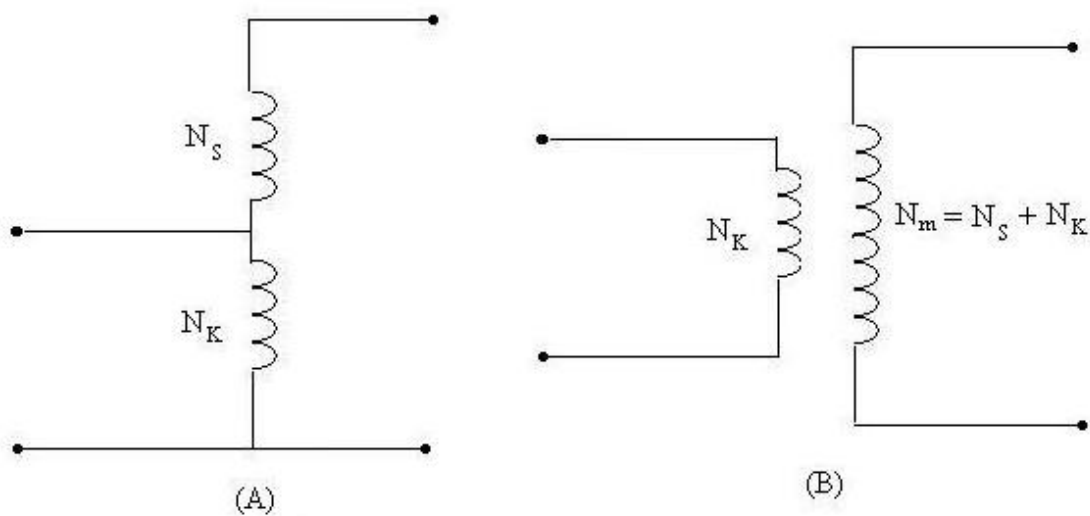


Figura IV.2: (A) – Autotransformador (B) – Transformador Equivalente

IV.1.2

Autotransformador Real

Na Figura IV.3 apresenta-se o circuito equivalente de um autotransformador, conforme apresentado em [23], [28] e [32]. Importante destacar que, conforme apresentado em [23], o valor da impedância *shunt* também pode ser desprezada, como ocorre para transformadores convencionais.

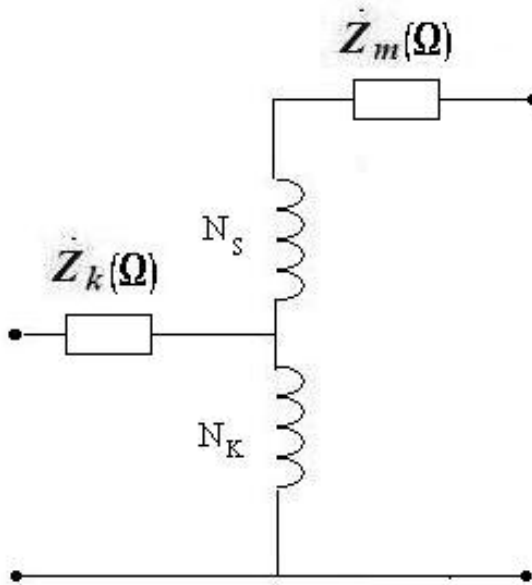


Figura IV.3: Circuito Equivalente de um Autotransformador

IV.2

Determinação das Impedâncias do Circuito Equivalente

Assim como nos transformadores convencionais, os valores $\dot{Z}_k(\Omega)$ e $\dot{Z}_m(\Omega)$ não são obtidos diretamente. Através do teste de curto-circuito é obtida a impedância total referida a um dos lados do transformador, normalmente ao lado de alta tensão. Considerando que o lado de alta-tensão é o m , tem-se:

$$\dot{Z}_{total_m} = \dot{Z}'_k(\Omega) + \dot{Z}_m(\Omega)$$

onde:

$$\dot{Z}'_k(\Omega) = \dot{Z}_k(\Omega) \left(\frac{N_m}{N_k} \right)^2$$

De acordo com [23], a impedância equivalente do secundário do autotransformador elevador é igual à impedância equivalente da situação sem ligação elétrica entre as bobinas, na qual o transformador é convencional, conforme Figuras IV.4 e IV.5. Essa impedância pode ser determinada nos

terminais do enrolamento série com o enrolamento comum curto-circuitado, como no teste do transformador convencional [23].

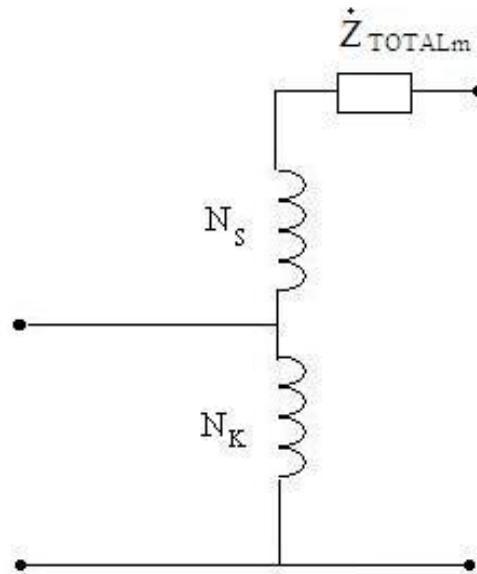


Figura IV.4: Circuito Equivalente de um Autotransformador Obtido através do Teste de Curto-Circuito

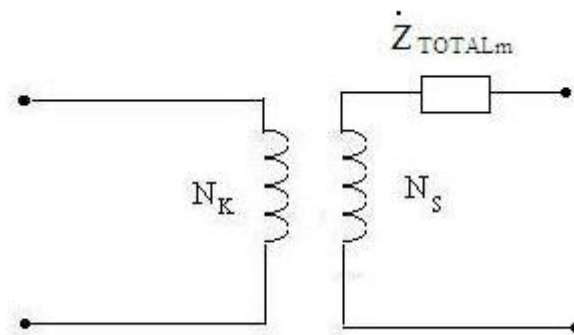


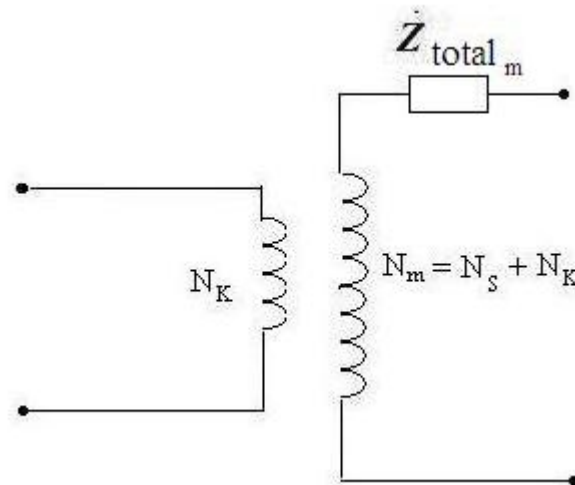
Figura IV.5: Circuito Equivalente de um Transformador Convencional (Sem Ligação entre as Bobinas) obtido através do Teste de Curto-Circuito

Verifica-se, então, que o circuito equivalente do autotransformador pode ser derivado do circuito equivalente do transformador de dois enrolamentos. Assim, conforme apresentado no Apêndice III e em [21], [22], [27], [28] e [32] :

$$\dot{Z}'_k(\Omega) = \dot{Z}_m(\Omega) = \frac{\dot{Z}_{total_m}}{2} \quad (IV.4)$$

Conseqüentemente, as impedâncias $\dot{Z}'_k(\Omega)$ e $\dot{Z}_m(\Omega)$ bem como Z_{base_k} e Z_{base_m} guardarão relação quadrática de transformação. Logo, as impedâncias em p.u. nos lados k e m são iguais, conforme detalhado no Apêndice III. Dessa forma, o circuito da Figura 4.2 e, conseqüentemente, o modelo proposto nesta tese, também é válido para autotransformadores. A importância da validade do modelo proposto para autotransformadores, se deve ao fato de que no sistema elétrico brasileiro, por exemplo, a maioria dos transformadores com relação inferior a 1:2,5 são autotransformadores. Acima dessa relação, são utilizados transformadores convencionais devido a problemas de isolamento elétrica.

Uma outra maneira de se chegar à conclusão da validade do modelo proposto para autotransformadores, é a obtenção de um transformador convencional equivalente ao autotransformador. Na Figura IV.6 apresenta-se o transformador convencional equivalente ao autotransformador da Figura IV.4, de acordo com [21]. Obtém-se, então, (IV.4), de acordo com o que foi apresentado no Apêndice III e em [21], [22], [27], [28] e [32].



Figuras IV.6: Transformador Convencional Equivalente ao Autotransformador

Apêndice V

Tensões Críticas para Sistema de 2 Barras

V.1

Modelo Usual

Considerando-se, no circuito apresentado na Figura 3.4, que gerador está conectado à barra k e carga à barra m , de acordo com a Seção 3.2, a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento terá módulo igual a Z . Tem-se, então, a seguinte corrente secundária:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{V}_k a_{km}}{Z(1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi})}$$

onde ϕ e α são os ângulos referentes ao fator de potência da carga e à impedância do transformador, respectivamente. No último caso, o valor do ângulo é próximo a 90° . Tem-se, ainda, que $a_{km} > 1$, com o objetivo de se aumentar a tensão secundária.

Assim, a tensão na carga, no ponto de carregamento máximo é dada por:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_k a_{km} - Z|\underline{\alpha} \frac{\dot{V}_k a_{km}}{Z(1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi})} = \frac{\dot{V}_k a_{km} |\underline{\phi}}{1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi}} \quad (\text{V.I})$$

Considerando agora que gerador está conectado à barra m e carga à barra k , de forma a se inverter o sentido do fluxo de potência, de acordo com a Seção 3.2, a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento terá módulo igual a Z / a_{mk}^2 . Nesse caso, a corrente no secundário será dada por:

$$\dot{I}_k = \frac{\frac{\dot{V}_m}{a_{mk}}}{\frac{Z}{(a_{mk})^2} (1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi})}$$

Nessa situação o valor do *tap* é diferente, sendo utilizado $a_{mk} < 1$, de forma a se elevar a tensão secundária, como na situação com fluxo de potência invertido. A tensão na carga, no ponto de carregamento máximo é dada por:

$$\dot{V}_k = \frac{\dot{V}_m}{a_{mk}} - \frac{Z}{(a_{mk})^2} |\underline{\alpha}| \frac{\frac{\dot{V}_m}{a_{mk}}}{\frac{Z}{(a_{mk})^2} (1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi})} = \frac{\frac{\dot{V}_m}{a_{mk}} |\underline{\phi}|}{1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi}} \quad (\text{V.2})$$

Comparando-se com (V.1), verifica-se que se $a_{mk} = \frac{1}{a_{km}}$ e os valores em p.u. das tensões de geração forem iguais, os valores das tensões na carga serão os mesmos, independente do sentido do fluxo de potência.

V.2

Modelo Proposto

Considerando-se, no circuito apresentado na Figura 4.4, que gerador está conectado à barra k e carga à barra m , de acordo com a Seção 4.4, a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento terá módulo igual a $Z(a_{km}^2 + 1)/2$. Tem-se, então, a seguinte corrente secundária:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{V}_k a_{km}}{\frac{Z(a_{km}^2 + 1)}{2} (1|\underline{\alpha} + 1|\underline{\phi})}$$

onde ϕ e α são os ângulos referentes ao fator de potência da carga e à impedância do transformador, respectivamente. No último caso, o valor do ângulo é próximo a

90°. Tem-se, ainda, que $a_{km} > 1$, com o objetivo de se aumentar a tensão secundária.

Assim, a tensão na carga, no ponto de carregamento máximo é dada por:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_k a_{km} - \frac{Z(a_{km}^2 + 1)}{2} \underline{|\alpha|} \frac{\dot{V}_k a_{km}}{\frac{Z(a_{km}^2 + 1)}{2} (1 \underline{|\alpha|} + 1 \underline{|\phi|})} = \frac{\dot{V}_k a_{km} \underline{|\phi|}}{1 \underline{|\alpha|} + 1 \underline{|\phi|}} \quad (\text{V.3})$$

Comparando-se com (V.1), verifica-se que a tensão no ponto de máximo carregamento será a mesma para os modelos usual e proposto, com fluxo de potência da barra k para a barra m .

Considerando agora que gerador esta conectado à barra m e carga à barra k , de forma a se inverter o sentido do fluxo de potência, de acordo com a Seção 4.4, a impedância equivalente da carga no ponto de máximo carregamento terá módulo igual a $Z(a_{mk}^2 + 1)/2a_{mk}^2$. Nesse caso, a corrente no secundário será dada por:

$$\dot{I}_k = \frac{\frac{\dot{V}_m}{a_{mk}}}{\frac{Z(a_{mk}^2 + 1)}{2a_{mk}^2} (1 \underline{|\alpha|} + 1 \underline{|\phi|})}$$

Nessa situação o valor do *tap* é diferente, sendo utilizado $a_{mk} < 1$, de forma a se elevar a tensão secundária, como na situação com fluxo de potência invertido. A tensão na carga, no ponto de carregamento máximo é dada por:

$$\dot{V}_k = \frac{\dot{V}_m}{a_{mk}} - \frac{Z(a_{mk}^2 + 1)}{2a_{mk}^2} \underline{|\alpha|} \frac{\frac{\dot{V}_m}{a_{mk}}}{\frac{Z(a_{mk}^2 + 1)}{2a_{mk}^2} (1 \underline{|\alpha|} + 1 \underline{|\phi|})} = \frac{\frac{\dot{V}_m}{a_{mk}} \underline{|\phi|}}{1 \underline{|\alpha|} + 1 \underline{|\phi|}} \quad (\text{V.4})$$

Comparando-se com (V.2), verifica-se que a tensão no ponto de máximo carregamento será a mesma para os modelos usual e proposto, com fluxo de potência da barra m para a barra k .

Comparando-se com (V.3), verifica-se que se $a_{mk} = \frac{1}{a_{km}}$ e os valores em p.u. das tensões de geração forem iguais, os valores das tensões serão os mesmos, independente do sentido do fluxo, para o modelo proposto.

Conclui-se que, para sistemas de duas barras, como apresentados nas Figuras 3.4 e 4.4, as tensões críticas serão as mesmas para os modelos usual e proposto, para determinado sentido do fluxo de potência, conforme apresentado nas Figuras 4.12, 4.13, 6.4 e 6.5. E, ainda, se $a_{mk} = \frac{1}{a_{km}}$ e os valores em p.u. das tensões de geração forem iguais, as tensões serão as mesmas independente do sentido do fluxo de potência.

Apêndice VI

Comparação entre os Modelos Usual e Proposto de Transformador com *Tap* Variável nos Programas ORGANON e PSAT

VI.1

Comparação entre os Modelos através do Programa ORGANON

Na comparação entre os modelos usual e proposto de transformador com *tap* variável, através do ORGANON [49], foi utilizado o sistema de 9 barras, apresentado na Figura VI.1 e detalhado em [50]. Podem ser observadas na figura as três barras adicionais criadas para simulação do modelo proposto, seguindo procedimento descrito na Seção 6.2.4.3.1. Os *taps* dos três transformadores são diferentes do nominal, com valor de 0,9 p.u., não sendo efetuado controle de tensão.

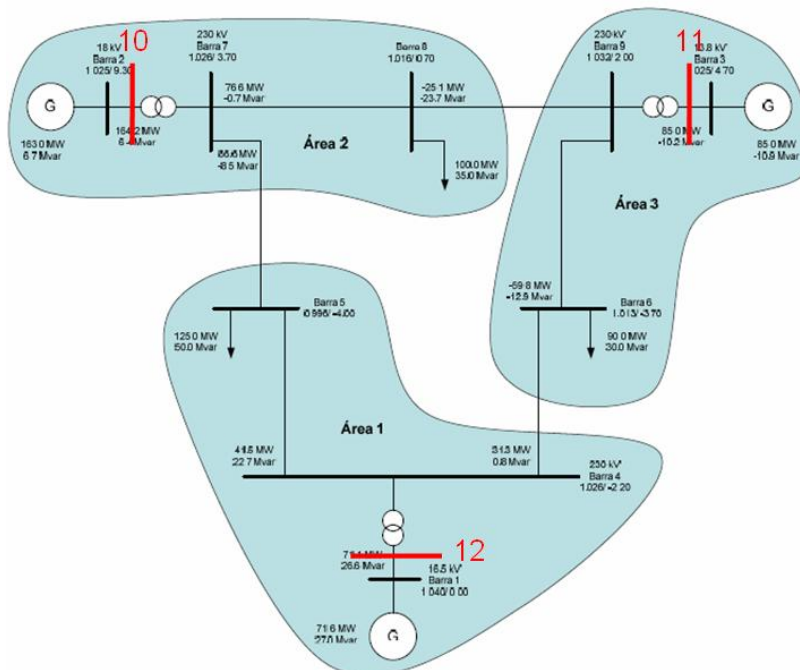


Figura VI.1: Sistema de 9 Barras Apresentado em [50] com Barras Fictícias

Nas Tabelas VI.1, VI.2 e VI.3 apresenta-se os resultados de simulações utilizando-se o modelo usual de transformador com *tap* variável.

Tabela VI.1: Tensões nas Barras do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Usual

Bus	Bus Name	Area	Zone	VBase(kV)	Volt(pu)	Ang(deg)	VMin(pu)	VMax(pu)
1	Barra 1	1	1	1.0	1.040	0.000	0.900	1.150
2	Barra 2	2	1	1.0	1.025	7.480	0.900	1.150
3	Barra 3	3	1	1.0	1.025	3.800	0.900	1.150
4	Barra 4	1	1	1.0	1.150	-1.755	0.900	1.150
5	Barra 5	1	1	1.0	1.126	-3.148	0.900	1.150
6	Barra 6	3	1	1.0	1.141	-2.937	0.900	1.150
7	Barra 7	2	1	1.0	1.148	3.012	0.900	1.150
8	Barra 8	2	1	1.0	1.141	0.624	0.900	1.150
9	Barra 9	3	1	1.0	1.153 +	1.627	0.900	1.150

Tabela VI.2: Carregamento dos Ramos da Rede do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Usual

Bus From	BFrom Name	Bus To Circ#	BTo Name	Area	Zone	MVA	% Limit/V	Limit(MVA)
4	Barra 4	5 = 1	Barra 5	1	0	48.40	16.13	300.00
4	Barra 4	6 = 1	Barra 6	3	0	29.55	9.85	300.00
6	Barra 6	9 = 1	Barra 9	3	0	57.79	28.90	200.00
8	Barra 8	9 = 1	Barra 9	3	0	30.12	10.04	300.00
7	Barra 7	8 = 1	Barra 8	2	0	67.15	22.38	300.00
7	Barra 7	5 = 1	Barra 5	1	0	77.06	38.53	200.00
2	Barra 2	7 = 1	Barra 7	2	0	159.34	82.99	192.00
3	Barra 3	9 = 1	Barra 9	3	0	86.75	67.78	128.00
1	Barra 1	4 = 1	Barra 4	1	0	69.02	27.94	247.00

Tabela VI.3: Resultados da Áreas do Sistema / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Usual

Num	Name	Gen MW	Gen MVAR	Load MW	Load MVAR	Shunt MVAR	Export MW	Export MVAR	Loss MW	Loss MVAR
1	Area1	70.65	12.69	125.00	50.00	0.00	-54.52	-18.24	0.17	-19.08
2	Area2	163.00	-10.31	100.00	35.00	0.00	62.62	-41.81	0.38	-3.50
3	Area3	85.00	-26.12	90.00	30.00	0.00	-6.09	-17.36	1.09	-38.76

Na Tabela VI.4, apresentada a seguir, tem-se relatório das tensões obtidas de algoritmo de fluxo de potência [43], que vem sendo utilizado nesta tese e que, na versão original, utiliza o modelo usual de transformador com *tap* variável. Observa-se que os resultados das tensões são praticamente iguais aos apresentados na Tabela VI.1, apresentando pequenas diferenças no arredondamento. Verifica-se, dessa forma, que o programa ORGANON, como esperado, utiliza o modelo usual de transformador com *tap* variável, assim como demais programas de fluxo de carga existentes no mundo.

VI.4: Tensões do Relatório de Fluxo de Potência [43] para Sistema de 9 Barras

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo
001	VTETA	1.04000	0.00000
002	PV	1.02500	7.48007
003	PV	1.02500	3.79986
004	PQ	1.14976	-1.75542
005	PQ	1.12639	-3.14870
006	PQ	1.14131	-2.93763
007	PQ	1.14803	3.01122
008	PQ	1.14086	0.62369
009	PQ	1.15317	1.62632

A seguir, apresenta-se as Tabelas VI.5, VI.6 e VI.7 com os resultados de simulações utilizando-se o modelo proposto (com inclusão das barras virtuais) de transformador com *tap* variável.

Tabela VI.5: Tensões nas Barras do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Proposto

Bus	Bus Name	Area	Zone	VBase(kV)	Volt(pu)	Ang(deg)	VMin(pu)	VMax(pu)
1	Barra 1	1	1	1.0	1.040	0.000	0.900	1.150
2	Barra 2	2	1	1.0	1.025	7.783	0.900	1.150
3	Barra 3	3	1	1.0	1.025	3.830	0.900	1.150
4	Barra 4	1	1	1.0	1.150	-1.962	0.900	1.150
5	Barra 5	1	1	1.0	1.126	-3.357	0.900	1.150
6	Barra 6	3	1	1.0	1.142	-3.147	0.900	1.150
7	Barra 7	2	1	1.0	1.149	2.792	0.900	1.150
8	Barra 8	2	1	1.0	1.142	0.405	0.900	1.150
9	Barra 9	3	1	1.0	1.154 +	1.404	0.900	1.150
10	Barra10	999	1	1.0	1.029	5.015	0.900	1.150
11	Barra10	999	1	1.0	1.032	2.481	0.900	1.150
12	Barra10	999	1	1.0	1.037	-1.081	0.900	1.150

Tabela VI.6: Carregamento dos Ramos da Rede do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Proposto

Bus From	BFrom Name	Bus To Circ#	BTo Name	Area	Zone	MVA	% Limit/V	Limit(MVA)
4	Barra 4	5 # 1	Barra 5	1	0	48.18	16.06	300.00
4	Barra 4	6 # 1	Barra 6	3	0	29.31	9.77	300.00
6	Barra 6	9 # 1	Barra 9	3	0	57.57	28.79	200.00
8	Barra 8	9 # 1	Barra 9	3	0	30.30	10.10	300.00
7	Barra 7	8 # 1	Barra 8	2	0	67.07	22.36	300.00
7	Barra 7	5 # 1	Barra 5	1	0	76.94	38.47	200.00
10	Barra10	7 # 1	Barra 7	2	0	159.26	82.95	192.00
11	Barra10	9 # 1	Barra 9	3	0	86.43	67.52	128.00
12	Barra10	4 # 1	Barra 4	1	0	68.90	27.90	247.00
2	Barra 2	10 # 1	Barra10	999	0	159.26	53.26	299.00
3	Barra 3	11 # 1	Barra10	999	0	86.43	21.66	399.00
1	Barra 1	12 # 1	Barra10	999	0	68.90	34.63	199.00

Tabela VI.7: Resultados da Áreas do Sistema de 9 Barras / Relatório Fornecido pelo Programa ORGANON / Modelo Proposto

Num	Name	Gen MW	Gen MVAR	Load MW	Load MVAR	Shunt MVAR	Export MW	Export MVAR	Loss MW	Loss MVAR
1	Area1	70.65	11.98	125.00	50.00	0.00	-54.53	-16.73	0.18	-21.29
2	Area2	163.00	-8.81	100.00	35.00	0.00	62.63	-27.46	0.37	-16.36
3	Area3	85.00	-24.96	90.00	30.00	0.00	-6.09	-12.52	1.09	-42.44

Comparando-se os modelos usual e proposto, nota-se diferenças obtidas entre os métodos de se modelar o transformador com *tap* variável, principalmente nos ângulos das tensões e nas potências reativas exportadas pelas áreas.

VI.2

Comparação entre os Modelos através do Programa PSAT

Na comparação entre os modelos usual e proposto de transformadores com *taps* variáveis, através do PSAT - Power System Analysis Toolbox [51], foi utilizado o sistema de 14 barras, apresentado na Figura VI.2. Esse sistema é detalhado em [51], sendo desprezado o defasamento de 5^0 do transformador localizado entre as barras 4 e 9. Podem ser observadas na figura as três barras adicionais criadas para simulação do modelo proposto, seguindo procedimento descrito na Seção 6.2.4.3.1. Os *taps* dos três transformadores para os quais foram criadas barras virtuais possuem valores diferentes do nominal, segundo apresentado em [51]. O transformador situado entre as barras 7 e 8 tem *tap* nominal.

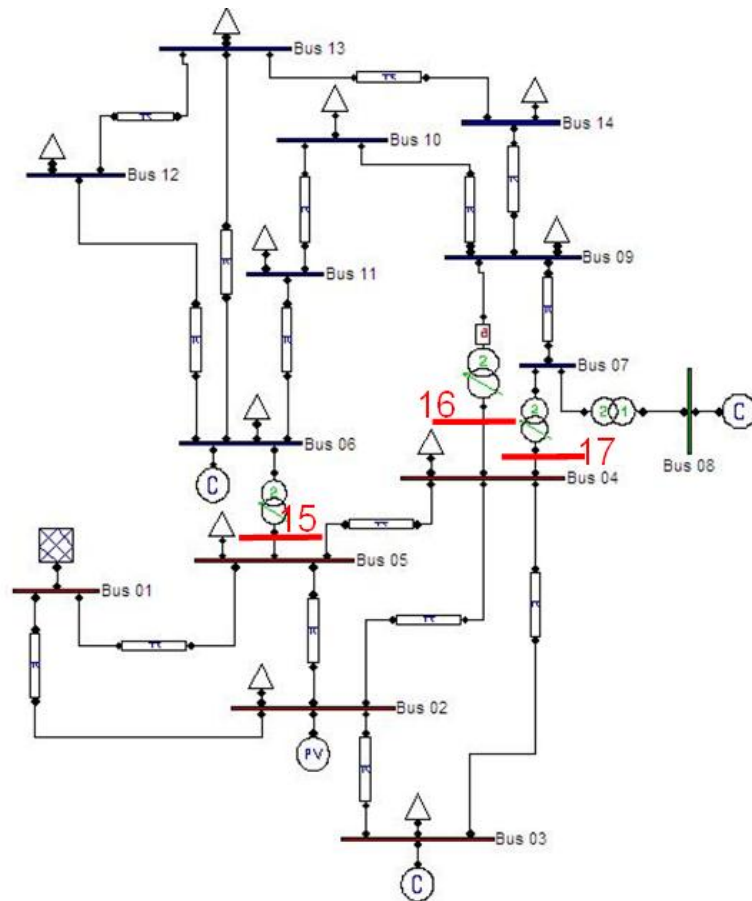


Figura VI.2: Sistema de 14 Barras Apresentado em [51] com Barras Fictícias

Nas Tabelas VI.8 e VI.9, apresentadas a seguir, tem-se o relatório de simulação fornecido pelo programa PSAT, utilizando-se o modelo usual (sem as barras adicionais) de transformador com *tap* variável.

Tabela VI.8: Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT /
Dados de Barra / Sistema de 14 Barras / Modelo Usual

POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010
e-mail: Federico.Milano@uc1m.es
website: <http://www.uc1m.es/area/gsee/web/Federico>

File: C:\Arquivos de programas\MATLAB\R2007b\toolbox\psat\tests\d_014_md1
Date: 12-Nov-2010 23:38:29

NETWORK STATISTICS

Buses: 14
Lines: 16
Transformers: 4
Generators: 5
Loads: 11

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 4
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [deg]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	3.5206	-0.28211	0	0
Bus 02	1.045	-7.7743	0.4	0.94825	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-19.0299	0	0.5971	1.3188	0.266
Bus 04	0.99786	-15.1515	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	1.0029	-13.0048	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-21.1771	0	0.44486	0.1568	0.105
Bus 07	1.036	-19.4452	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-19.4452	0	0.33447	0	0
Bus 09	1.0127	-21.7194	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	1.012	-22.0286	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0356	-21.7648	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.0461	-22.3819	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0366	-22.4321	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.99684	-23.5247	0	0	0.2086	0.07

Tabela VI.9: Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT /
Dados de Linha / Sistema de 14 Barras / Modelo Usual

LINE FLOWS						
From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 02	Bus 05	1	0.57844	0.06984	0.01786	0.01886
Bus 06	Bus 12	2	0.11409	0.04596	0.00162	0.00338
Bus 12	Bus 13	3	0.02706	0.02018	0.00023	0.00021
Bus 06	Bus 13	4	0.25993	0.14466	0.00511	0.01007
Bus 06	Bus 11	5	0.11865	0.12882	0.00254	0.00533
Bus 11	Bus 10	6	0.06711	0.09829	0.00108	0.00254
Bus 09	Bus 10	7	0.06009	-0.01424	0.00012	0.00031
Bus 09	Bus 14	8	0.11996	0.00496	0.00179	0.0038
Bus 14	Bus 13	9	-0.09043	-0.06884	0.00222	0.00452
Bus 07	Bus 09	10	0.37843	0.22621	0	0.01993
Bus 01	Bus 02	11	2.4174	-0.38065	0.10292	0.25574
Bus 03	Bus 02	12	-1.0022	0.13952	0.04747	0.15375
Bus 03	Bus 04	13	-0.31661	0.19158	0.00946	-0.01073
Bus 01	Bus 05	14	1.1032	0.09854	0.05929	0.19236
Bus 05	Bus 04	15	0.84861	-0.13776	0.00979	0.01806
Bus 02	Bus 04	16	0.78258	0.05	0.03285	0.06064
Bus 04	Bus 09	17	0.21485	0.04196	0.00023	0.02513
Bus 05	Bus 06	18	0.64947	0.07253	0	0.09294
Bus 04	Bus 07	19	0.37843	-0.06212	0	0.02954
Bus 08	Bus 07	20	0	0.33447	0	0.01659
LINE FLOWS						
From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 05	Bus 02	1	-0.56059	-0.05098	0.01786	0.01886
Bus 12	Bus 06	2	-0.11246	-0.04258	0.00162	0.00338
Bus 13	Bus 12	3	-0.02683	-0.01997	0.00023	0.00021
Bus 13	Bus 06	4	-0.25482	-0.13459	0.00511	0.01007
Bus 11	Bus 06	5	-0.11611	-0.12349	0.00254	0.00533
Bus 10	Bus 11	6	-0.06603	-0.09575	0.00108	0.00254
Bus 10	Bus 09	7	-0.05997	0.01455	0.00012	0.00031
Bus 14	Bus 09	8	-0.11817	-0.00116	0.00179	0.0038
Bus 13	Bus 14	9	0.09265	0.07337	0.00222	0.00452
Bus 09	Bus 07	10	-0.37843	-0.20629	0	0.01993
Bus 02	Bus 01	11	-2.3145	0.63639	0.10292	0.25574
Bus 02	Bus 03	12	1.0497	0.01423	0.04747	0.15375
Bus 04	Bus 03	13	0.32607	-0.20231	0.00946	-0.01073
Bus 05	Bus 01	14	-1.0439	0.09382	0.05929	0.19236
Bus 04	Bus 05	15	-0.83882	0.15582	0.00979	0.01806
Bus 04	Bus 02	16	-0.74972	0.01065	0.03285	0.06064
Bus 09	Bus 04	17	-0.21463	-0.01683	0.00023	0.02513
Bus 06	Bus 05	18	-0.64947	0.02042	0	0.09294
Bus 07	Bus 04	19	-0.37843	0.09167	0	0.02954
Bus 07	Bus 08	20	0	-0.31788	0	0.01659

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 3.9206
REACTIVE POWER [p.u.] 2.0426

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 3.626
REACTIVE POWER [p.u.] 1.1396

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 0.29459
REACTIVE POWER [p.u.] 0.90297

Na Tabela VI.10, apresentada a seguir, tem-se relatório das tensões obtidas de algoritmo de fluxo de potência [43], que vem sendo utilizado nesta tese e que, na versão original, utiliza o modelo usual de transformador com *tap* variável. Observa-se que os resultados das tensões são muito próximos aos apresentados no relatório fornecido pela PSAT. Verifica-se, dessa forma, que o programa PSAT, como esperado, utiliza o modelo usual de transformador com *tap* variável, assim como demais programas usados atualmente no mundo.

Tabela VI.10: Tensões do Relatório de Fluxo de Potência [43] para Sistema de 14 Barras

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo
001	VTETA	1.06000	0.00000
002	PV	1.04500	-7.77382
003	PV	1.01000	-19.0293
004	PQ	0.99782	-15.1498
005	PQ	1.00292	-13.0034
006	PV	1.07000	-21.1746
007	PQ	1.03601	-19.4450
008	PV	1.09000	-19.4450
009	PQ	1.01288	-21.7194
010	PQ	1.01217	-22.0281
011	PQ	1.03564	-21.7634
012	PQ	1.04615	-22.3794
013	PQ	1.03659	-22.4299
014	PQ	0.99694	-23.5235

Nas Tabelas VI.11 e VI.12, apresentadas a seguir, tem-se relatório de simulação fornecido pelo programa PSAT, utilizando-se o modelo proposto (com as barras adicionais).

Tabela VI.11: Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT
/ Dados de Barra / Sistema de 14 Barras / Modelo Proposto

```

POWER FLOW REPORT
P S A T 2.1.6
Author: Federico Milano, (c) 2002-2010
e-mail: Federico.Milano@uclm.es
website: http://www.uclm.es/area/gsee/web/Federico
File: C:\Arquivos de programas\MATLAB\R2007b\toolbox\psat\tests\d_014_md1_proposto
Date: 12-Nov-2010 23:41:04

NETWORK STATISTICS
Buses:                17
Lines:                19
Transformers:         4
Generators:           5
Loads:                11

SOLUTION STATISTICS
Number of Iterations: 4
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA]        100

POWER FLOW RESULTS

```

Bus	V [p.u.]	phase [deg]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 1	1.06	0	3.5207	-0.2823	0	0
Bus 2	1.045	-7.777	0.4	0.94927	0.3038	0.1778
Bus 3	1.01	-19.04	0	0.59784	1.3188	0.266
Bus 4	0.99774	-15.1652	0	0	0.6692	0.056
Bus 5	1.003	-12.9965	0	0	0.1064	0.0224
Bus 6	1.07	-21.6441	0	0.45215	0.1568	0.105
Bus 7	1.0361	-19.6641	0	0	0	0
Bus 8	1.09	-19.6641	0	0.33384	0	0
Bus 9	1.013	-21.9929	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	1.0123	-22.3371	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.0357	-22.1527	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.0461	-22.8359	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.0366	-22.8729	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.99702	-23.8715	0	0	0.2086	0.07
Bus 15	0.99706	-17.6126	0	0	0	0
Bus 16	0.98764	-18.6587	0	0	0	0
Bus 17	1.0049	-17.482	0	0	0	0

Tabela VI.12: Relatório com Solução do Fluxo de Potência Fornecido pelo PSAT
/ Dados de Linha / Sistema de 14 Barras / Modelo Proposto

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 2	Bus 5	1	0.57736	0.07004	0.01779	0.01866
Bus 6	Bus 12	2	0.11329	0.04636	0.00161	0.00335
Bus 12	Bus 13	3	0.02628	0.02061	0.00023	0.0002
Bus 6	Bus 13	4	0.25656	0.14567	0.00503	0.0099
Bus 6	Bus 11	5	0.11203	0.13103	0.00247	0.00516
Bus 11	Bus 10	6	0.06056	0.10066	0.00106	0.00247
Bus 9	Bus 10	7	0.06664	-0.0166	0.00015	0.00039
Bus 9	Bus 14	8	0.12407	0.00345	0.00191	0.00406
Bus 14	Bus 13	9	-0.08644	-0.07061	0.00214	0.00436
Bus 7	Bus 9	10	0.38765	0.22523	0	0.0206
Bus 1	Bus 2	11	2.4182	-0.3808	0.10299	0.25595
Bus 3	Bus 2	12	-1.0028	0.13979	0.04753	0.154
Bus 3	Bus 4	13	-0.31601	0.19204	0.00945	-0.01076
Bus 1	Bus 5	14	1.1025	0.09851	0.05922	0.19206
Bus 5	Bus 4	15	0.85779	-0.1372	0.00999	0.01871
Bus 2	Bus 4	16	0.78376	0.05047	0.03296	0.06096
Bus 16	Bus 9	17	0.21617	0.02732	0.00011	0.01271
Bus 15	Bus 6	18	0.63867	0.02086	0	0.04496
Bus 17	Bus 7	19	0.38765	-0.07662	0	0.01546
Bus 8	Bus 7	20	0	0.33384	0	0.01652
Bus 4	Bus 16	21	0.2163	0.04086	0.00012	0.01354
Bus 5	Bus 15	22	0.63867	0.07262	0	0.05176
Bus 4	Bus 17	23	0.38765	-0.06046	0	0.01617

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 5	Bus 2	1	-0.55956	-0.05137	0.01779	0.01866
Bus 12	Bus 6	2	-0.11168	-0.04301	0.00161	0.00335
Bus 13	Bus 12	3	-0.02605	-0.02041	0.00023	0.0002
Bus 13	Bus 6	4	-0.25153	-0.13577	0.00503	0.0099
Bus 11	Bus 6	5	-0.10956	-0.12586	0.00247	0.00516
Bus 10	Bus 11	6	-0.05951	-0.09819	0.00106	0.00247
Bus 10	Bus 9	7	-0.06649	0.01699	0.00015	0.00039
Bus 14	Bus 9	8	-0.12216	0.00061	0.00191	0.00406
Bus 13	Bus 14	9	0.08858	0.07497	0.00214	0.00436
Bus 9	Bus 7	10	-0.38765	-0.20463	0	0.0206
Bus 2	Bus 1	11	-2.3152	0.63676	0.10299	0.25595
Bus 2	Bus 3	12	1.0503	0.01421	0.04753	0.154
Bus 4	Bus 3	13	0.32546	-0.2028	0.00945	-0.01076
Bus 5	Bus 1	14	-1.0433	0.09356	0.05922	0.19206
Bus 4	Bus 5	15	-0.8478	0.15591	0.00999	0.01871
Bus 4	Bus 2	16	-0.7508	0.01048	0.03296	0.06096
Bus 9	Bus 16	17	-0.21606	-0.01461	0.00011	0.01271
Bus 6	Bus 15	18	-0.63867	0.0241	0	0.04496
Bus 7	Bus 17	19	-0.38765	0.09209	0	0.01546
Bus 7	Bus 8	20	0	-0.31732	0	0.01652
Bus 16	Bus 4	21	-0.21617	-0.02732	0.00012	0.01354
Bus 15	Bus 5	22	-0.63867	-0.02086	0	0.05176
Bus 17	Bus 4	23	-0.38765	0.07662	0	0.01617

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 3.9207
REACTIVE POWER [p.u.] 2.0508

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 3.626
REACTIVE POWER [p.u.] 1.1396

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 0.29474
REACTIVE POWER [p.u.] 0.91121

Comparando-se os resultados obtidos com os modelos usual e proposto, nota-se diferenças, principalmente nos ângulos das tensões, nos fluxos de potência e nas potências reativas.