## Referências bibliográficas

Affonso, C.M., da Silva, L.C.P., Lima, F.G.M., Soares, S., 2003, "Optimal MW/Mvar Dispatch and Minimal Load Shedding Strategy for Improving Voltage Stability Margin", IEEE General Meeting Toronto - Power Engineering Society, Vol. 1, pp.1-6.

Arya, L.D., Choube, S.C., Kothari, D.P., 2001, "Reactive Power Optimization Using Static Voltage Stability Index", Journal Electric Power Components and Systems, Vol. 27, No. 27, pp. 615-628.

Arya, L.D., Sakravdiab, D.K., Kothari, D.P., 2005, "Corrective Rescheduling for Static Voltage Stability Control", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 27, No. 1, pp. 3-12.

Barbier, C., Barret, J.P., 1980, "An Analysis of Phenomena of Voltage Collapse on a Transmission System", Rev. Générale Electricité, Tome 89, No. 10, pp. 672-690.

Brown, H.E., Shipley, R.B., Coleman, D., Neid Jr., R.E., 1969, "A Study of Stability Equivalents", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 2, pp. 200-207.

Cañizares, C.A., Rosehart, W.D., Berizzi, A., Bovo, C., 2001, "Comparison of Voltage Security Constrained Optimal Power Flow Techniques", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1680 - 1685.

Cañizares, C.A., et all, 2002, "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools", IEEE/PES, Power System Stability Subcommittee, Special Publication.

CEPEL, 1999, "Programa de Análise de Redes: ANAREDE V07-08/99".

CEPEL, 2000, "Programa de Fluxo de Potência Ótimo: FLUPOT versão 5.1".

da Silva, L.C.P., da Costa, V.F., Xu, W., 2000, "Preliminary Result on Improving the Modal Analysis Technique for Voltage Stability Assessment", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1946 - 1950.

de Castro, M.R.V., 2007, "Modelagem do Controle de Tensão por Geradores e de Múltiplas Barras Swing na Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

de Souza, L.J., 2007, "Adequação das Ações de Controle de Tensão em Sistemas Elétricos Objetivando o Reforço das Condições de Segurança de Tensão", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Dobson, I., et al., 2002, "Basic Theoretical Concepts", Power System Stability Subcommittee, Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools, IEEE/PES Special Publication.

dos Santos, J.O.R., 1997, "Metodologia de Avaliação da Estabilidade de Tensão em Regime Permanente", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

dos Santos, J.O.R., França, R.F., Prada, R.B., Ferreira, L.C.A., Bianco, A., 2003, "Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão na Operação em Tempo Real", 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, São Pedro, São Paulo, Brasil.

El-Sadek, M.Z., Mahmoud, G.A., Dessouky, M.M., Rashed, W.I., 1998, "Tap Changing Transformer Role in Voltage Stability Enhancement", Electric Power Systems Research, Vol. 50, No. 2, pp. 115-118. Ferreira, L.C.A., 1997, "Uma Avaliação da Estabilidade de Tensão Abordando Perdas Elétricas em Sistemas Elétricos de Potência", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

Ferreira, L.C.A., 2008, "Análise a Longo-Termo da Estabilidade de Tensão Utilizando Métodos Estáticos e um Sistema Especialista *Fuzzy* para Representação de Ações de Controle", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

França, R.F., 2003, "Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão", Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Garcia, A.V., de Almeida, M.C., 1999, "Identificação de Ramos Críticos para Estabilidade de Tensão Baseada na Análise Modal do Sistema", XV SNPTEE: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Paraná, Brasil.

Granville, S., Melo, J.C.O, Melo, A.C.G., 1996, "Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 1096-1103.

Greenhalgh, A.B., 1998, "Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico através de um Modelo de Otimização", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Hong, Y.-Y., Yang, Y.-L., 1999, "Expert System for Enhancing Voltage Security Stability in Power Systems", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 146, No. 4. pp. 349 - 354.

Huang, G.M., Nair, N.-K.C., 2001, "An OPF based Algorithm to Evaluate Load Curtailment Incorporating Voltage Stability Margin Criterion", North American Power System Conference, Texas, USA. Karmarkar, N.K., Ramakrishnan, K.G., 1991, "Computational Results of an Interior Point Algorithm for Large Scale Linear Programming", Mathematical Programming: Series A and B, Vol. 52, No. 3, pp. 555-586.

Kessel, P., Glavitsch, H., 1986, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, No.3, pp. 346-354.

Kimbark, E.W., 1968, "Power System Stability, Synchronous Machines", Vol. III, Dover Publications.

Kundur, P., 1994, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York, U.S.A.

Lachs, W.R., 1978, "Voltage Collapse in EHV Power Systems", IEEE PES Winter Power Meeting, paper A 78 057-2.

Marcolini, A.M., Trigo, A.L., Ramos, J.L.M., Mauricio, J.M., 2007, "Preventive Control Actions to Enlarge the Load Margin Using VSCOPF & Sensitivity Techniques", IEEE Powertech Conference, Lausanne, Switzerland.

Menezes, T., da Silva, L.C.P., Affonso, C., da Costa, V.F., Soares, S., 2002, "MVAr Management on the Pre-dispatch Problem for Improving Voltage Stability Margin", PowerCon International Conference, Vol. 3, pp. 1690 - 1694.

Moura, R.D., Prada, R.B., 2005, "Contingency Screening and Ranking Method for Voltage Stability Assessment", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 6, pp. 891-898.

Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2007, "Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos", Procedimentos de Rede, Submódulo 23.3.

Palomino, E.G.C., 2002, "Reforço das Condições de Estabilidade de Tensão na Operação do Sistema Elétrico", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Parker, C.J., Morrison, I.F., Sutanto, D., 1996, "Application of an Optimization Method for Determining the Reactive Margin from Voltage Collapse in Reactive Power Planning", IEEE Transaction on Power System, Vol. 11, No. 3, pp. 1473-1481.

Prada, R.B., Cory, B.J., Navarro-Perez, R., 1990, "Assessment of Steady State Voltage Collapse Critical Conditions", 10th PSCC: Power Systems Computation Conference, Graz, Áustria.

Prada, R.B., Zambroni, A.C., Vieira Filho, X., Massaud, A.G., Oliveira, J.C.C., 1992, "Voltage Stability: Phenomena Characterization Based on Reactive Control Effects and System Critical Areas Identification", III SEPOPE: Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belo Horizonte, Brasil.

Prada, R.B., dos Santos, J.O.R., Greenhalgh, A.B., Seelig, B.H.T., Palomino, E.G.C., 2001, "Monitoração das Condições de Estabilidade de Tensão na Supervisão e Controle de Sistemas Elétricos em Tempo Real", Relatório Final do Acordo Específico 16/98 entre a FPLF e o CEPEL.

Prada, R.B., Palomino, E.G.C., dos Santos, J.O.R., Bianco, A., Pilotto, L.A.S., 2002, "Voltage Stability Assessment for Real Time Operation", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, No. 2, pp. 175-181.

Prada, R.B., Souza, L.J., Sousa, L.A.P., 2002, "The Need for a New Constraint on Voltage / Reactive Power Studies to Ensure Proper Voltage Control", Int. J. of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 24, No. 7, pp. 535-540.

Prada, R.B., Palomino, E.G.C., Pilotto, L.A.S., Bianco, A., 2005, "Weakest Bus, Most Loaded Transmission Path and Critical Branch Identification for Voltage Security Reinforcement", Electric Power System Research, Vol. 73, No. 2, pp. 217-226.

Prada, R.B., de Souza, L.J., 2006, "Voltage Control Actions Adequacy in Electrical Systems aiming Voltage Security Conditions Reinforcement", Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax, Canada.

Prada, R.B., Lafitte, J.L., Medeiros, L., Lima, M., 2007, "Estabilidade do Controle de Tensão em Geradores de Produtores Independentes", Relatório Final do Contrato 05/06 entre PUC-Rio, ICF e UTE Norte Fluminense.

Prada, R.B., Lafitte, J.L., Medeiros, L., Ferreira, L.F., Lima, M., 2007, "A Necessidade de Avaliação das Condições de Estabilidade de Tensão em Barras de tensão controlada por Geradores e Compensadores Síncronos", XII ERIAC: Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz de Iguaçu, Paraná, Brasil.

PUC-RIO, 2003, "Programa de Estabilidade de Tensão: EstabTen versão CTG R A03. 12.2003".

Rosehart, W.D., Cañizares, C.A., Quintana, V.H., 1999, "Optimal Power Flow Incorporating Voltage Collapse Constraints", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 820 - 825.

Rosehart, W.D., Cañizares, C.A., Quintana, V.H., 2000, "Costs of Voltage Security in Electricity Markets", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 4, pp. 2115 - 2120.

Rosehart, W.D., 2002, "Optimal Power Flows Incorporating Network Stability", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, pp. 1100 - 1104.

Rosehart, W.D., Cañizares, C.A., Quintana, V.H., 2003, "Multi Objective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 578 - 587.

Savulescu, S.C., Oatts, M.L., Pruitt, J.G., Williamson, F., Adapa, R., 1993, "Fast Steady-State Stability Assessment for Real-Time and Operations Planning", IEEE Transaction on Power System, Vol. 8, No. 4, pp. 1557-1569.

Savulescu, S.C., Eichler, R., Vickovic, D., 2007, "Real-Time System Stability Monitoring in the Transmission Network of Bósnia and Herzegobina", PowerGrid Europe Conference and Exhibition, Madrid, Spain.

Savulescu, S.C., Virmani, S., Vickovic, D., 2007, "Real-Time Calculation of Power System Loadability Limits", Powertech Conference, Lausanne, Switzerland. Seelig, B.H.T., Greenhalgh, A.B., Prada, R.B., Bianco, A., 2004, "Determinação da Adequação de Ações de Controle de Tensão sob o Ponto de Vista da Segurança de Tensão", IX SEPOPE: Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Rio de Janeiro, Brasil.

Song, H., Lee, B., Kwon, S.-H., Venkataramana, A., 2003, "Reactive Reserve-Based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for Enhancement of Voltage Stability Margins", IEEE Transaction on Power System, Vol. 18, No. 4, pp. 1538 - 1546.

Souza Lima, E.E., de Jesus Fernandez, L.F., 2000, "Assessing Eigenvalue Sensitivities", IEEE Transactions on Paower Systems, Vol. 15, No. 1, pp. 299-306.

Srivastava, K.N., Srivastava, S.C., 1997, "Effect of Generation Rescheduling on Voltage Stability Margin", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 11-17.

Sun, Y., Sun, C., Wang, Z., Lu, Q., 1995, "Voltage Security Enhancement Using ASVG Nonlinear Control", IEEE Conference Proceedings on Energy Management and Power Delivery, Vol. 1, pp. 337 - 341.

Sutanto, D., Lachs, W.R., 2000, "Improving Voltage Stability Line Limits", 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM, Hong Kong.

Taylor, C.W., 1994, "Power System Voltage Stability", McGraw Hill, U.S.A.

Tiranuchit, A., Thomas, R.J., 1988, "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 87-93.

Van Cutsem, T., 1991, "A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse", IEEE Transaction on Power System, Vol. 6, No. 1, pp. 145-156.

Venkataramana, A., 2006, "Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control", Power Electronics and Power Systems, Springer Publications, New York, U.S.A.

Visakha, K., Thukaram, D., Jenkins, L., 2004, "An Approach for Real Power Scheduling to Improve System Stability Margins under Normal and Network Contingencies", Electric Power Systems Research, Vol. 71, No. 2, pp. 109-117.

Weedy, B.M., Cox, B.R., 1968, "Voltage Stability of Radial Power Links", Proc. IEE, Vol. 115, No. 4, pp. 528-536.

Zecevié, A.I., Miljkovic, D.M., 2001, "Enhancement of Voltage Stability by an Optimal Selection of Load Following Units", Electric Power and Energy Systems, Vol. 23, No. 6, pp. 443-450.

## Apêndice A - O Limite Estático de Estabilidade Angular (LEA)

Em (2.5) é deduzido para um sistema de duas barras a equação da potência ativa transmitida à carga:  $P_L = -\frac{V_L^2}{Z_t} \cdot \cos \alpha_t + \frac{V_L \cdot V_G \cdot \cos(\theta_{LG} + \alpha_t)}{Z_t}$ . Tenta-se encontrar o valor da defasagem angular  $\theta_{LG}$  que maximiza a potência ativa da carga através da primeira derivada de  $P_L$ :

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_{LG}} = -\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \cdot \text{sen}(\theta_{LG} + \alpha_t) = 0 \Longrightarrow \theta_{LG} = -\alpha_t$$
(A.1)

Calcula-se a segunda derivada  $\frac{\partial^2 P_L}{\partial \theta_{LG}^2} /_{\theta_{LG}=-\alpha_t}$  para conferir que é efetivamente

um máximo:

$$\frac{\partial^2 P_L}{\partial \theta_{LG}^2} /_{\theta_{LG} = -\alpha_t} = -\frac{V_L \cdot V_G}{Z_t} \cdot \cos(-\alpha_t + \alpha_t) < 0$$
(A.2)

De (A.1) e (A.2), conclui-se que P<sub>L</sub> é máximo quando:

$$\theta_{LG} = -\alpha_t \tag{A.3}$$

O limite de estabilidade estática angular (LEA) definido por (A.3) é formado pelos valores de máxima potência ativa transmitida à carga com defasagem angular de tensão na barra em análise igual ao negativo do ângulo da impedância da linha de transmissão. É uma reta vertical na curva  $\theta$ V.

Em (2.23) é deduzido para o limite de estabilidade de tensão (LET) que:  

$$P_{L}^{C} = \frac{V_{G}^{2} \cos \phi}{4.Z_{c} \cdot \cos^{2} \left(\frac{\phi - \alpha_{t}}{2}\right)}, \text{ onde } Z_{c} = Z_{t} \text{ para cada fator de potência na carga.}$$

Tenta-se agora encontrar a maior transferência de potência ativa possível (P<sub>I</sub><sup>maximum maximorum</sup>) que pode ser alimentada pela rede de transmissão à carga,

(assume-se a existência de compensação reativa para tal). Calcula-se a primeira derivada de  $P_L^C$  em relação ao ângulo do fator de potência  $\phi$ :

$$\frac{\partial P_{L}^{C}}{\partial \phi} = \frac{-V_{G}^{2}.Z_{c}.\operatorname{sen}\phi \left[2Z_{c}^{2} + 2Z_{c}^{2}\cos(\phi - \alpha_{t})\right]}{\left[2Z_{c}^{2} + 2Z_{c}^{2}\cos(\phi - \alpha_{t})\right]^{2}} - \frac{V_{G}^{2}.Z_{c}\cos\phi \left[-2Z_{c}^{2}.\operatorname{sen}(\phi - \alpha_{t})\right]}{\left[2Z_{c}^{2} + 2Z_{c}^{2}\cos(\phi - \alpha_{t})\right]^{2}} = 0$$
(A.4)

$$0 = -2.Z_c^3.V_G^2.\operatorname{sen}\phi - 2.Z_c^3.V_G^2.[\operatorname{sen}\phi.\cos(\phi - \alpha_t) - \cos\phi.\operatorname{sen}(\phi - \alpha_t)]$$
(A.5)

$$\operatorname{sen} \alpha_{t} = -\operatorname{sen} \phi \Longrightarrow \phi = -\alpha_{t} \tag{A.6}$$

A segunda derivada de  $P_L^C$  em relação à  $\phi$  garante que é efetivamente um máximo, já que:

$$\frac{\partial^2 P_L^C}{\partial \phi^2} /_{\phi = -\alpha_t} < 0 \tag{A.7}$$

De (A.6) e (A.7), conclui-se que  $P_L^C$  é o máximo do máximo quando:

$$\phi = -\alpha_t \tag{A.8}$$

Substituindo (A.8) em  $\theta_L^C = \frac{\phi - \alpha_t}{2}$  deduzido em (2.33), tem-se:

$$\theta_{\rm L}^{\rm C} = \frac{-\alpha_{\rm t} - \alpha_{\rm t}}{2} = -\alpha_{\rm t} \tag{A.9}$$

Substituindo (A.8) em  $V_L^C = \frac{V_G}{2.\cos\left(\frac{\phi - \alpha_t}{2}\right)}$  deduzido em (2.26), tem-se:

$$V_{L}^{C} = \frac{V_{G}}{2.\cos(-\alpha_{t})}$$
(A.10)

A reta do LEA definido por (A.3) corta a curva  $\theta$ V do LET definido por (A.9) e (A.10) num único ponto e que corresponde a  $P_L^{maximum maximorum}$ .

## Apêndice B - Cálculo do Ângulo Crítico da Tensão na Barra de Geração

Substituindo-se (3.5), (3.6) em (3.8) fica:

$$tg(\phi) = \frac{\left[-V_L.sen(\theta_{GL} + \alpha_t) + V_G.(sen(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).sen(\alpha_g))\right]}{\left[-V_L.cos(\theta_{GL} + \alpha_t) + V_G.(cos(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).cos(\alpha_g))\right]}$$
(B.1)

Substituindo a tensão crítica  $V_G^C$  da barra de geração definida em (3.18) em (B.1), e colocando em evidencia as variáveis "a" e "b", tem-se:

$$tg(\phi) = \frac{[-2.sen(\theta_{GL} + \alpha_t).[cos(\theta_{GL}) + (Z_t / Z_g).cos(\theta_{GL} + \alpha_t - \alpha_g)] + a]}{[-2.cos(\theta_{GL} + \alpha_t).[cos(\theta_{GL}) + (Z_t / Z_g).cos(\theta_{GL} + \alpha_t - \alpha_g) + b]}$$
(B.2)

onde:

$$a = sen(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).sen(\alpha_g)$$
(B.3)

$$b = \cos(\alpha_t) + (Z_t / Z_g) \cdot \cos(\alpha_g)$$
(B.4)

Separando (B.2) em NUM e DEN para facilitar a redução da equação:

$$tg(\phi) = \frac{NUM}{DEN}$$
(B.5)

Procede-se à manipulação algébrica e trigonométrica do numerador de (B.5):

$$\begin{split} \text{NUM} &= -2.\text{sen}(\theta_{\text{GL}} + \alpha_{\text{T}}).\cos(\theta_{\text{GL}}) - 2.(Z_t \ / \ Z_g).[\text{sen}(\theta_{\text{GL}} + \alpha_t).\cos(\theta_{\text{GL}} + \alpha_t).\cos(\alpha_g) \\ &+ \text{sen}^2(\theta_{\text{GL}} + \alpha_t).\text{sen}(\alpha_g)] + \text{sen}(\alpha_t) + (Z_t \ / \ Z_g).\text{sen}(\alpha_g) \end{split}$$

(B.6)

$$NUM = -2.sen(\theta_{GL} + \alpha_t).cos(\theta_{GL}) - (Z_t / Z_g).[sen(2\theta_{GL} + 2\alpha_t).cos(\alpha_g) + (1 - cos(2\theta_{GL} + 2\alpha_t)).sen(\alpha_g)] + sen(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).sen(\alpha_g)$$
(B.7)

$$NUM = -2.sen(\theta_{GL} + \alpha_t).cos(\theta_{GL}) - (Z_t / Z_g).[sen(2\theta_{GL} + 2\alpha_t - \alpha_g) + sen(\alpha_g)]$$
$$+ sen(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).sen(\alpha_g)$$
(B.8)

$$NUM = [-2.sen(\theta_{GL} + \alpha_t).cos(\theta_{GL})] - (Z_t / Z_g).[sen(2\theta_{GL} + 2\alpha_t - \alpha_g) + sen(\alpha_g)] + sen(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).sen(\alpha_g)$$
(B.9)

$$\begin{split} \text{NUM} = [-\text{sen}(2.\theta_{\text{GL}} + \alpha_t) - \text{sen}(\alpha_t)] - (Z_t \ / \ Z_g).[\text{sen}(2\theta_{\text{GL}}).\cos(2\alpha_t - \alpha_g)] \\ + \cos(2.\theta_{\text{GL}}).\text{sen}(2.\alpha_t - \alpha_g)] + \text{sen}(\alpha_t) \end{split}$$

(B.10)

$$NUM = -sen(2.\theta_{GL} + \alpha_t) - (Z_t / Z_g).[sen(2.\theta_{GL} + 2.\alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.11)

$$NUM = -sen(2.\theta_{GL} + \alpha_t) - (Z_t/Z_g).[sen(2.\theta_{GL} + \alpha_t).cos(\alpha_t - \alpha_g) + cos(2.\theta_{GL} + \alpha_t).sen(\alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.12)

$$NUM = -sen(2.\theta_{GL} + \alpha_t) - (Z_t/Z_g).[sen(2.\theta_{GL} + \alpha_t).cos(\alpha_t - \alpha_g) + cos(2.\theta_{GL} + \alpha_t).sen(\alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.13)

$$\begin{split} \text{NUM} = -\text{sen}(2.\theta_{\text{GL}}).\text{cos}(\alpha_{\text{T}}) - \text{cos}(2.\theta_{\text{GL}}).\text{sen}(\alpha_{\text{t}}) - (Z_{\text{t}}/Z_{\text{g}}).[\text{cos}(\alpha_{\text{t}} - \alpha_{\text{g}}).(\text{sen}(2.\theta_{\text{GL}}).\text{cos}(\alpha_{\text{t}}) + \text{cos}(2.\theta_{\text{GL}}).\text{sen}(\alpha_{\text{t}})) + \text{sen}(\alpha_{\text{t}} - \alpha_{\text{g}}).(\text{cos}(2.\theta_{\text{GL}}).\text{cos}(\alpha_{\text{t}}) - \text{sen}(2.\theta_{\text{GL}}).\text{sen}(\alpha_{\text{t}}))] \end{split}$$

(B.14)

$$NUM = sen(2.\theta_{GL}).[-cos(\alpha_t) - (Z_t / Z_g).[cos(\alpha_t - \alpha_g).cos(\alpha_t) - sen(\alpha_t - \alpha_g).sen(\alpha_t)] + cos(2.\theta_{GL}).[-sen(\alpha_t) - (Z_t / Z_g).[cos(\alpha_t - \alpha_g).sen(\alpha_t) + sen(\alpha_t - \alpha_g).cos(\alpha_t)]$$

(B.15)

$$NUM = sen(2.\theta_{GL}).[-cos(\alpha_t) - (Z_t / Z_g).cos(2.\alpha_t - \alpha_g)] + cos(2.\theta_{GL}).[-sen(\alpha_t) - (Z_t / Z_g).sen(2.\alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.16)

Procede-se também à manipulação algébrica e trigonométrica do denominador de (B.5):

$$DEN = -2.\cos(\theta_{GL} + \alpha_t).\cos(\theta_{GL}) - 2.(Z_t / Z_g).[\cos^2(\theta_{GL} + \alpha_t).\cos(\alpha_g) + \cos(\theta_{GL} + \alpha_t).sen(\theta_{GL} + \alpha_t).sen(\alpha_g)] + \cos(\alpha_t) + (Z_t / Z_g).\cos(\alpha_g)$$
(B.17)

$$\begin{split} \mathsf{DEN} &= -2.\cos(\theta_{\mathsf{GL}} + \alpha_{\mathsf{t}}).\cos(\theta_{\mathsf{GL}}) - (Z_{\mathsf{t}} / Z_{\mathsf{g}}).[(1 + \cos(2.\theta_{\mathsf{GL}} + 2.\alpha_{\mathsf{t}})).\cos(\alpha_{\mathsf{g}}) \\ &+ \operatorname{sen}(2.\theta_{\mathsf{GL}} + 2.\alpha_{\mathsf{t}}).\operatorname{sen}(\alpha_{\mathsf{g}})] + \cos(\alpha_{\mathsf{t}}) + (Z_{\mathsf{t}} / Z_{\mathsf{g}}).\cos(\alpha_{\mathsf{g}}) \end{split} \tag{B.18}$$

$$\begin{split} \mathsf{DEN} &= -2.\cos(\theta_{\mathsf{GL}} + \alpha_{\mathsf{t}}).\cos(\theta_{\mathsf{GL}}) - (\mathsf{Z}_{\mathsf{t}} / \mathsf{Z}_{\mathsf{g}}).[\cos(2.\theta_{\mathsf{GL}} + 2.\alpha_{\mathsf{t}} - \alpha_{\mathsf{g}}) \\ &+ \cos(\alpha_{\mathsf{g}})] + \cos(\alpha_{\mathsf{t}}) + (\mathsf{Z}_{\mathsf{t}} / \mathsf{Z}_{\mathsf{g}}).\cos(\alpha_{\mathsf{g}}) \end{split}$$

$$DEN = [-2.\cos(\theta_{GL} + \alpha_t).\cos(\theta_{GL})] - (Z_t / Z_g).[\cos(2.\theta_{GL} + 2.\alpha_t - \alpha_g)] + \cos(\alpha_t)$$
(B.20)

$$\begin{split} \mathsf{DEN} = & [-\cos(2.\theta_{\mathsf{GL}} + \alpha_t) - \cos(\alpha_t)] - (Z_t / Z_g) . [\cos(2.\theta_{\mathsf{GL}}) . \cos(2.\alpha_t - \alpha_g) \\ & - \operatorname{sen}(2.\theta_{\mathsf{GL}}) . \operatorname{sen}(2.\alpha_t - \alpha_g)] + \cos(\alpha_T) \end{split} \tag{B.21}$$

$$\begin{split} \mathsf{DEN} &= -\cos(2.\theta_{\mathsf{GL}}).\cos(\alpha_t) + \operatorname{sen}(2.\theta_{\mathsf{GL}}).\operatorname{sen}(\alpha_t) - (\mathsf{Z}_t \,/\, \mathsf{Z}_g).[\cos(2.\theta_{\mathsf{GL}}).\cos(2.\alpha_t - \alpha_g) \\ &- \operatorname{sen}(2.\theta_{\mathsf{GL}}).\operatorname{sen}(2.\alpha_t - \alpha_g)] \end{split}$$

$$\begin{split} \text{DEN} &= \text{sen}(2.\theta_{\text{GL}}).[\text{sen}(\alpha_t) + (Z_t \ / \ Z_g).\text{sen}(2.\alpha_t - \alpha_g)] \\ &+ \cos(2.\theta_{\text{GL}}).[-\cos(\alpha_t) - (Z_t \ / \ Z_g).\cos(2.\alpha_t - \alpha_g)] \end{split} \tag{B.23}$$

Substituindo-se (B.16) e (B.23) em (B.5), e colocando em evidencia as variáveis "c", "d", "e" e "f", tem-se:

$$tg(\phi) = \frac{NUM}{DEN} = \frac{sen(\phi)}{cos(\phi)} = \frac{sen(2.\theta_{GL}).[c] + cos(2.\theta_{GL}).[d]}{sen(2.\theta_{GL}).[e] + cos(2.\theta_{GL}).[f]}$$
(B.24)

onde:

$$\mathbf{c} = [-\cos(\alpha_t) - (Z_t / Z_g) \cdot \cos(2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.25)

$$d = [-sen(\alpha_t) - (Z_t / Z_g).sen(2.\alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.26)

$$\mathbf{e} = [\operatorname{sen}(\alpha_t) + (Z_t / Z_g) \cdot \operatorname{sen}(2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.27)

$$\mathbf{f} = [-\cos(\alpha_t) - (Z_t / Z_g) \cdot \cos(2 \cdot \alpha_t - \alpha_g)]$$
(B.28)

Operando (B.24):

$$sen(2.\theta_{GL}).[a.cos(\phi) - c.sen(\phi)] - cos(2.\theta_{GL}).[d.sen(\phi) - b.cos(\phi)] = 0$$
 (B.29)

que é reduzido a:

$$tg(2.\theta_{GL}) = \frac{sen(2.\theta_{GL})}{cos(2.\theta_{GL})} = \frac{d.sen(\phi) - b.cos(\phi)}{a.cos(\phi) - c.sen(\phi)}$$
(B.30)

$$tg(2.\theta_{GL}) = \frac{\begin{cases} [-\cos(\alpha_t).sen(\phi) - (Z_t / Z_g).cos(2.\alpha_t - \alpha_g).sen(\phi)] + [sen(\alpha_t).cos(\phi)] \\ + (Z_t / Z_g).sen(2.\alpha_t - \alpha_g).cos(\phi)] \\ \end{cases}}{\begin{cases} [-\cos(\alpha_t).cos(\phi) - (Z_t / Z_g).cos(2.\alpha_t - \alpha_g).cos(\phi)] - [sen(\alpha_t).sen(\phi)] \\ - (Z_t / Z_g).sen(2.\alpha_t - \alpha_g).sen(\phi)] \end{cases}}$$

(B.31)

$$tg(2.\theta_{GL}) = \frac{\begin{cases} sen(-\phi)cos(\alpha_{t}) + cos(-\phi).sen(\alpha_{t}) + (Z_{t} / Z_{g}).[sen(-\phi).cos(2.\alpha_{t} - \alpha_{g})] \\ + cos(-\phi).sen(2.\alpha_{t} - \alpha_{g})] \end{cases}}{\begin{cases} -[cos(-\phi)cos(\alpha_{t}) - sen(-\phi).sen(\alpha_{t})] - (Z_{t} / Z_{g}).[cos(-\phi).cos(2.\alpha_{t} - \alpha_{g})] \\ - sen(-\phi).sen(2.\alpha_{t} - \alpha_{g})] \end{cases}}$$

(B.32)

Finalmente chega-se a:

$$tg(2.\theta_{GL}) = \frac{[sen(-\phi + \alpha_t) + (Z_t / Z_g).sen(-\phi + 2.\alpha_t - \alpha_g)]}{[-cos(-\phi + \alpha_t) - (Z_t / Z_g).cos(-\phi + 2.\alpha_t - \alpha_g)]}$$
(B.33)

Usando a trigonometria é possível dizer que (B.33) é:

$$tg(2.\theta_{GL}) = \frac{2.tg(\theta_{GL})}{1 - [tg(\theta_{GL})]^2}$$
(B.34)

Operando (B.34), encontra-se uma equação quadrática que é uma alternativa para encontrar as soluções para  $\theta_{GL}$ :

$$tg(2.\theta_{GL}).[tg(\theta_{GL})]^{2} + 2.[tg(\theta_{GL})] - tg(2.\theta_{GL}) = 0$$
(B.35)

Nomeiam-se as variáveis A, B, C e X como:

$$A=tg(2.\theta_{GL}) \tag{B.36}$$

$$C=-tg(2.\theta_{GL})$$
 (B.38)

$$X = tg(\theta_{GL})$$
(B.39)

Pode-se reescrever (B.35) através de (B.36), (B.37), (B.38) e (B.39):

$$A.X^2 + B.X + C = 0 (B.40)$$

De (B.40) obtém-se duas soluções para a variável "X":

$$X = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A}$$
(B.41)

De (B.41) é possível obter quatro soluções críticas para  $\theta_{GL}$ =arctg(X). Existe solução sempre que (B<sup>2</sup>-4.A.C)≥0.

$$\theta_{GL-1} = \arctan\left[\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A}\right]$$
(B.42)

$$\theta_{GL-2} = \operatorname{arctg}\left[\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A}\right] \pm 180^{\circ}$$
(B.43)

$$\theta_{\text{GL-3}} = \arctan\left[\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A}\right]$$
(B.44)

$$\theta_{GL-4} = \operatorname{arctg}\left[\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A}\right] \pm 180^{\circ}$$
(B.45)

Foi necessária a programação em Visual Fortran 6.1 para deduzir qual das quatro soluções de ângulo crítico em (B.42) a (B.45) maximiza a potência gerada para alimentar a carga. Foram definidas as variáveis A, B, C, X, TETG1, TETG2, TETG3 e TETG4, respectivamente, como em (B.36), (B.37), (B.38), (B.39), (B.42), (B.43), (B.44) e (B.45).

A variável TETG representa a defasagem angular crítica entre a barra de geração e a barra de carga e VG é a tensão crítica na barra de geração. Tem-se PGM, QGM e SGM que representam, respectivamente, a máxima potência ativa, reativa e aparente de geração. As outras constantes são: FIG =  $\phi_G$ , ALFAT =  $\alpha_t$ , ALFAG =  $\alpha_G$ , ZTMAG = Z<sub>t</sub>, ZGMAG = Z<sub>q</sub>, e VOLTL = V<sub>L</sub>.

```
MAXIMUM VOLTAGE ANGLE DISPLACEMENT AT THE GENERATOR BUS
С
         CRÍTICAL VOLTAGE MAGNITUDE AT THE GENERATOR BUS
С
         MAXIMUM GENERATION
С
         CG=SIN(-FIG+ALFAT)+(ZTMAG/ZGMAG)*SIN(-FIG+2*ALFAT-ALFAG)
         DG=-COS(-FIG+ALFAT)-(ZTMAG/ZGMAG)*COS(-FIG+2*ALFAT-ALFAG)
         A = CG/DG
         B = 2
         C = -CG/DG
         X1 = (-B + SQRT(B*B - 4*A*C)) / (2*A)
         X2 = (-B - SQRT(B*B - 4*A*C)) / (2*A)
         TETG1 = ATAN(X1)
      !RADIANOS
                         ATAN(X1)+3.1415926535897932384626433832795
         TETG2
!RADIANOS
         TETG3 = ATAN(X2)
      !RADIANOS
                         ATAN(X2)+3.1415926535897932384626433832795
         TETG4
!RADIANOS
         AG = 2.0 \times COS(TETG1)
         EG = 2.0*(ZTMAG/ZGMAG)*(COS(TETG1)*COS(ALFAT-ALFAG)-
              SIN(TETG1)*SIN(ALFAT-ALFAG))
         VG = VOLTL/(AG+EG)
         PGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*COS(TETG1+ALFAT)+(VG*VG*
                ((COS(ALFAT)/ZTMAG)+(COS(ALFAG)/ZGMAG)))
         QGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*SIN(TETG1+ALFAT)+(VG*VG*
                ((SIN(ALFAT)/ZTMAG)+(SIN(ALFAG)/ZGMAG)))
         SGM = SQRT(PGM*PGM+QGM*QGM)
         TETG=TETG1
      IF (VG.LT.0) THEN
```

```
AG = 2.0 \times COS(TETG2)
   EG = 2.0*(ZTMAG/ZGMAG)*(COS(TETG2)*COS(ALFAT-ALFAG)-
        SIN(TETG2)*SIN(ALFAT-ALFAG))
   VG = VOLTL/(AG+EG)
   PGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*COS(TETG2+ALFAT)+(VG*VG*
         ((COS(ALFAT)/ZTMAG)+(COS(ALFAG)/ZGMAG)))
   QGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*SIN(TETG2+ALFAT)+(VG*VG*
         ((SIN(ALFAT)/ZTMAG)+(SIN(ALFAG)/ZGMAG)))
   SGM = SQRT(PGM*PGM+QGM*QGM)
   TETG=TETG2
END IF
IF (PGM.LT.0) THEN
   AG = 2.0 \times COS (TETG3)
   EG = 2.0*(ZTMAG/ZGMAG)*(COS(TETG3)*COS(ALFAT-ALFAG)-
        SIN(TETG3)*SIN(ALFAT-ALFAG))
   VG = VOLTL/(AG+EG)
   PGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*COS(TETG3+ALFAT)+(VG*VG*
         ((COS(ALFAT)/ZTMAG)+(COS(ALFAG)/ZGMAG)))
   OGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*SIN(TETG3+ALFAT)+(VG*VG*
         ((SIN(ALFAT)/ZTMAG)+(SIN(ALFAG)/ZGMAG)))
   SGM = SQRT(PGM*PGM+QGM*QGM)
   TETG=TETG3
END IF
IF (VG.LT.0) THEN
   AG = 2.0 \times COS (TETG4)
   EG = 2.0*(ZTMAG/ZGMAG)*(COS(TETG4)*COS(ALFAT-ALFAG)-
        SIN(TETG4)*SIN(ALFAT-ALFAG))
   VG = VOLTL/(AG+EG)
   PGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*COS(TETG4+ALFAT)+(VG*VG*
         ((COS(ALFAT)/ZTMAG)+(COS(ALFAG)/ZGMAG)))
   QGM = -(VOLTL*VG/ZTMAG)*SIN(TETG4+ALFAT)+(VG*VG*
         ((SIN(ALFAT)/ZTMAG)+(SIN(ALFAG)/ZGMAG)))
```

END IF

TETG=TETG4

SGM = SQRT(PGM\*PGM+QGM\*QGM)

## Apêndice C - Sistema-Teste de 34 Barras Desenvolvido pelo CEPEL

O sistema desenvolvido no CEPEL, baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro, é mostrado na Figura C.1. Ele tem 34 barras, 42 linhas, 12 transformadores e 5 geradores. Os níveis de tensão na transmissão são 750, 500 e 345 kV, e todos os geradores trabalham com 20 kV. O corredor de 750 kV tem compensação série / paralelo, e a barra 26 representa o equivalente de um sistema de grande porte.

Nota-se na Figura C.1 ramos em paralelo. Estes devem ser agrupados em um único ramo porque, quando se trata de avaliar o esforço de transmissão, o que interessa é o fluxo de potência ativa e reativa que está entrando e saindo nas barras "de" e "para" (mesmo se os ramos tiverem impedâncias diferentes). Portanto, para efeito de análise, existe um único ramo equivalente entre as barras 2 e 3, 14 e 24, 24 e 25, 25 e 26, 28 e 29, 15 e 16, 13 e 28 e, finalmente, 19 e 20. A mesma idéia se aplica entre as barras 4 e 7, 7 e 10 e, finalmente, 10 e 13.



Figura C.1 - Sistema-Teste de 34 Barras