## 6 Referências Bibliográficas

Henriques, R.M., Martins, N., Martins, A.C.B., Pinto, H.J.C., Ferraz, J.C.R., Carneiro Junior, S., 2002, "Impact of Induction Motor Loads into Voltage Stability Margins of Large Systems - Rio Area Analysis", VIII SEPOPE, Brasília, Brasil.

Ferreira, L.C.A., Henriques, R.M., Passos Filho, J.A., Martins, N., Falcão, D.M., 2004 "Influência da Representação de Motores de Indução e de Dispositivos de Controle Automáticos e Discretos em Estudos de Segurança de Tensão", IX SEPOPE, Rio de Janeiro, Brasil.

Kundur, P., 1994, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., USA.

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

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

Kosov, I.L., 1972 "Máquinas Elétricas e Transformadores", 13 ed., São Paulo, SP, Brasil, Editora Globo.

Henriques, R.M., 2002, "Influência de Cargas Tipo Motor de Indução nas Margens de Estabilidade de Tensão de Sistemas de Grande de Porte", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ.

Monticelli, A.J., 1983, "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", 1 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda.

Chapman S.J., 2000, "Máquinas Elétricas", 3 ed., McGraw-Hill, Inc., Colômbia.

Franklin, D.C., Moraleto A., 1994, "Improving Dynamic Aggregation of Induction Motor Models", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4.

Van Cutsem, T., 1998, "Voltage Stability of Electric Power Systems", The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science - Power Electronics and Power Systems, Kluwer Academic Publisher.

Passos Filho, J.A., Martins, N., Zambroni de Souza, A.C., Ferreira, L.C.A., 2003, "Benefício da Representação do Controle Automático e Discreto de Bancos de Capacitores/Reatores e de LTC Sistêmicos em Estudos de Segurança de Tensão", XVII SNPTEE, Uberlândia, Brasil.

Passos Filho, J.A., Martins, N., Ferraz, J.C.R., Falcão, D.M., Pinto, H.J.C., 2002, "Modelagem de Chaveamento Automático de Banco de Capacitores/Reatores para Estudos com Fluxo de Potência Continuado", VIII SEPOPE, Brasília, Brasil.

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", Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, No. 2.

França, R.F., dos Santos, J.O.R., 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.

Prada, R.B., Seelig, B.H.T., dos Santos, J.O.R., Bianco, A., Pilotto, L.A.S., 2002, "Modelagem de LTCs para a Avaliação do Carregamento da Rede de Transmissão e da Estabilidade do Controle de Tensão", VIII SEPOPE, Brasília, Brasil.

Thaler G.J., Wilcox M.L., 1969, "Máquinas Elétricas", 1 ed., Editoral Limusa-Wiley, México.

Prada, R.B., 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.

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

Em (2.28) é deduzido para um sistema de duas barras a equação da potência ativa transmitida à carga:  $P_{10} = -P_1 = \frac{V_1^2}{Z_t}.\cos\alpha_t - \frac{V_1.V_0.\cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}.$  Tenta-se encontrar o valor da defasagem angular  $\theta_{10}$  que maximiza a potência ativa da carga através da primeira derivada de  $P_1$ :

$$\frac{\partial P_1}{\partial \theta_{10}} = -\frac{V_1 \cdot V_0}{Z_t} \cdot \text{sen}(\theta_{10} + \alpha_t) = 0 \Rightarrow \theta_{10} = -\alpha_t$$
(A.1)

Calcula-se a segunda derivada  $\frac{\partial^2 P_1}{\partial \theta_{10}^2}/_{\theta_{10}=-\alpha_t}$  para conferir que é efetivamente um máximo:

$$\frac{\partial^{2} P_{1}}{\partial \theta_{10}^{2}} I_{\theta_{10} = -\alpha_{t}} = -\frac{V_{1}.V_{0}}{Z_{t}}.\cos(-\alpha_{t} + \alpha_{t}) < 0$$
(A.2)

De (A.1) e (A.2), conclui-se que  $P_1$  é máximo quando:

$$\theta_{10} = -\alpha_{t} \tag{A.3}$$

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  $\theta$  xV.

Em (2.13) é deduzido para o limite de estabilidade de tensão (LET) que:  $P_1^{max} = \frac{V_0^2.cos\,\phi}{4.Z_C.cos^2\!\left(\frac{\varphi-\alpha_t}{2}\right)}, \text{ onde } Z_c = Z_t \text{ para cada fator de potência na carga. Tenta-}$ 

se agora encontrar a maior transferência de potência ativa possível (P<sub>1</sub><sup>max,max</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  $P_1^{max}$  em relação ao ângulo do fator de potência  $\phi$ :

$$\begin{split} \frac{\partial P_{1}^{\text{max}}}{\partial \varphi} &= \frac{-V_{0}^{2}.Z_{c}.\text{sen}\varphi \Big[2Z_{C}^{2} + 2Z_{C}^{2}\cos(\varphi - \alpha_{t})\Big]}{\Big[2Z_{c}^{2} + 2Z_{c}^{2}\cos(\varphi - \alpha_{t})\Big]^{2}} \\ &- \frac{-V_{0}^{2}.Z_{c}\cos\varphi \Big[-2Z_{C}^{2}.\text{sen}(\varphi - \alpha_{t})\Big]}{\Big[2Z_{c}^{2} + 2Z_{c}^{2}\cos(\varphi - \alpha_{t})\Big]^{2}} = 0 \end{split} \tag{A.4}$$

$$0 = -2.Z_c^3.V_0^2.\text{sen}\phi - 2.Z_c^3.V_0^2.[\text{sen}\phi.\cos(\phi - \alpha_t) - \cos\phi.\text{sen}(\phi - \alpha_t)]$$
 (A.5)

$$\operatorname{sen}\alpha_{\mathsf{t}} = -\operatorname{sen}\phi \Rightarrow \phi = -\alpha_{\mathsf{t}}$$
 (A.6)

A segunda derivada de  $P_1^{max}$  em relação à  $\phi$  garante que é efetivamente um máximo, já que:

$$\frac{\partial^2 P_1^{\text{max}}}{\partial \phi^2} /_{\phi = -\alpha_t} < 0 \tag{A.7}$$

De (A.6) e (A.7), conclui-se que  $P_1^{max}\,$  é o máximo do máximo quando:

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

Substituindo (A.8) em  $\theta_{1Crítico} = \frac{\phi - \alpha_t}{2}$  deduzido em (2.23), tem-se:

$$\theta_{1\text{Crítico}} = \frac{-\alpha_t - \alpha_t}{2} = -\alpha_t \tag{A.9}$$

Substituindo (A.8) em  $V_{1Critico} = \frac{V_0}{2.cos(\frac{\phi - \alpha_t}{2})}$  deduzido em (2.16), tem-se:

$$V_{1\text{Critico}} = \frac{V_0}{2.\cos(-\alpha_*)} \tag{A.10}$$

A reta do LEA definido por (A.3) corta a curva  $\Theta$ xV do LET definido por (A.9) e (A.10) num único ponto e que corresponde a  $P_1^{\text{max,max}}$ .

# Apêndice B - Sobre a Simultaneidade de det[D']=0 nas Barras Terminal e Interna de Um Motor de Indução

Para provar que um sistema radial de três barras, simplificadamente representando um motor de indução (todo o modelo do motor de indução é representado como uma impedância) alimentado através de uma linha de transmissão, atinge  $\det[D']=0$  simultaneamente na barra 1 e na barra 2, analisou-se varias configurações através de 4 testes nomeados B.1, B.2, B.3 e B.4. Os testes foram feitos considerando uma carga conectada à barra 2 com fator de potência constante ( $\phi=60^{\circ}$ ).

#### **B.1** Primeiro Teste

A simulação da Figura B.1 foi feita com uma impedância da linha igual a do motor:  $Z_{Linha} = Z_{Motor} = 0.2 \angle 70^{\circ}$  pu. Na Tabela B.1 é apresentado o det[D'] avaliado em alguns pontos de operação, tanto na barra 1 como na 2, para analisar o máximo carregamento.

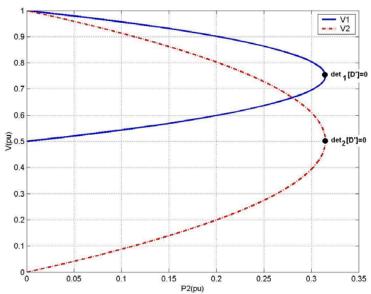


Figura B.1 - Curvas V<sub>1</sub>xP<sub>2</sub> e V<sub>2</sub>xP<sub>2</sub> do Primeiro Teste

Tabela B.1 - O det[D'] do Primeiro Teste

P <sub>2</sub> (pu)	V₁ (pu)	det₁[D']	V <sub>2</sub> (pu)	det <sub>2</sub> [D']
0,1001	0,9567	21,7399	0,9134	4,7200
0,2501	0,8638	14,3287	0,7281	2,0689
0,3000	0,8047	8,5072	0,6104	0,8319
0,3148	0,7505	0,005	0,5024	0,003

### **B.2** Segundo Teste

A simulação da Figura B.2 foi feita com uma impedância da linha  $Z_{Linha}=0.02\angle70^\circ$  pu e com uma impedância do motor  $Z_{Motor}=0.2\angle70^\circ$  pu. É mostrado na Tabela B.2 o det[D'] avaliado em alguns pontos de operação, tanto na barra 1 como na 2, para analisar a máxima transmissão de potência.

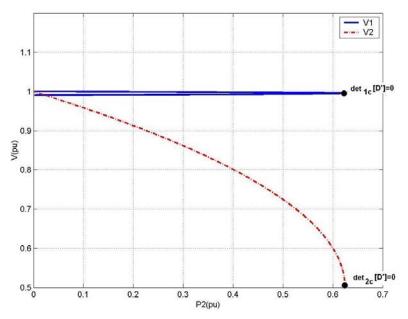


Figura B.2 - Curvas V<sub>1</sub>xP<sub>2</sub> e V<sub>2</sub>xP<sub>2</sub> do Segundo Teste

Tabela B.2 - O det[D'] do Segundo Teste

P <sub>2</sub> (pu)	V₁ (pu)	det₁[D']	V <sub>2</sub> (pu)	det <sub>2</sub> [D']
0,2010	0,999882	249488,844	0,9130	18,4763
0,4007	0,998769	248371,199	0,8011	11,7995
0,6002	0,996774	243268,796	0,6007	2,9149
0,6244	0,995797	0,050	0,5025	0,0064

#### **B.3** Terceiro Teste

Conectou-se um capacitor  $X_c$ = -j2,5 pu na barra 1 para fazer a simulação da Figura B.3. As impedâncias da linha e do motor são respectivamente  $Z_{Linha} = 0.2 \angle 70^\circ$  pu e  $Z_{Motor} = 0.2 \angle 70^\circ$  pu. O carregamento do sistema é avaliado através do det[D'] em alguns pontos de operação, tanto na barra 1 como na 2, tal qual mostra a Tabela B.3.

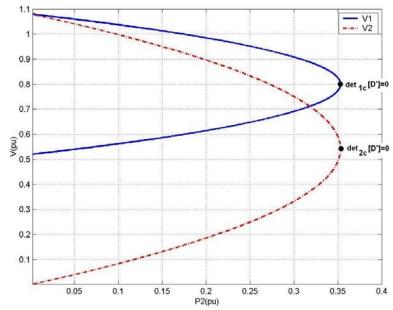


Figura B.3 - Curvas V<sub>1</sub>xP<sub>2</sub> e V<sub>2</sub>xP<sub>2</sub> do Terceiro Teste

Tabela B.3 - O det[D'] do Terceiro Teste

P <sub>2</sub> (pu)	V <sub>1</sub> (pu)	det₁[D']	V <sub>2</sub> (pu)	det <sub>2</sub> [D']
0,1010	1,0374	23,7633	0,9974	5,6909
0,2504	0,9516	17,1377	0,8329	3,0364
0,3302	0,8717	9,9751	0,6796	1,1716
0,3531	0,8005	0,0105	0,5431	0,0068

## **B.4** Quarto Teste

As curvas da Figura B.4 foram construídas para o circuito com um capacitor  $X_c$ = -j2,5 pu na barra 1. As impedâncias da linha e do motor são respectivamente:  $Z_{Linha} = 0.2 \angle 70^\circ$  pu e  $Z_{Motor} = 0.02 \angle 70^\circ$  pu. Analisa-se o carregamento do sistema na Tabela B.4 através do det[D'] avaliado em alguns pontos de operação, tanto na barra 1 como na 2.

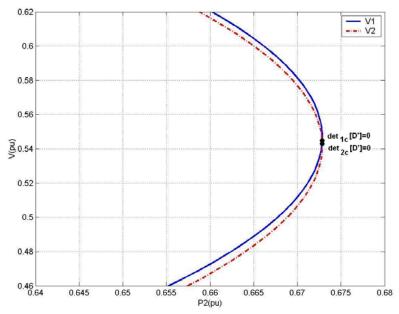


Figura B.4 - Curvas V<sub>1</sub>xP<sub>2</sub> e V<sub>2</sub>xP<sub>2</sub> do Quarto Teste

Tabela B.4 - O det[D'] do Quarto Teste

P <sub>2</sub> (pu)	V₁ (pu)	det₁ [D']	V <sub>2</sub> (pu)	det <sub>2</sub> [D']
0,1024	1,0385	23,9334	1,0381	23,4704
0,6601	0,6204	2,1696	0,6161	2,0867
0,6701	0,5810	0,9471	0,5764	0,9080
0,6728	0,5473	0,0171	0,5424	0,0163

Tanto  $\det_1[D']$  quanto  $\det_2[D']$  são positivos ou são negativos simultaneamente, isto é, na mesma linha de cada uma das tabelas apresentadas, mesmo tendo sido analisados com muitas casas decimais e com uma variação mínimas de carga. Nunca se observou o  $\det_1[D']$  e  $\det_2[D']$  com sinal trocado num mesmo ponto de operação. Portanto, pode-se concluir que  $\det[D']$  na barra 1 e na barra 2 chegam a zero no mesmo ponto de operação.

Entretanto, uma observação mais cuidadosa dos resultados dos testes permite concluir que a barra 2 está sempre mais carregada que a da barra 1. E tão mais carregada quanto maior for a impedância entre essas barras. Os valores numéricos de parâmetros de motores de indução típicos são de tal magnitude que, pode-se concluir, a distância elétrica entre a barra terminal e a barra interna é muito pequena, quando comparada com as da rede de transmissão.