

6

Referências Bibliográficas

- 1 PIRES DE SOUZA, E. J. S.; JARDIM, J. L.; MACEDO, N. J. P. Power System Transient Stability Assessment Using Dynamic Equivalents and Transient Energy Functions, **V Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning**, Vol. II, p. 413-417, 1996.
- 2 PIRES DE SOUZA, E. J. S.; MACEDO N. J. P.; MEIRELLES, M. F.; JARDIM, J. L. Aplicação de Equivalentes Dinâmicos Baseados em Coerência em Estudos com Simulador em Tempo Real de Sistemas Elétricos. **XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Informe Técnico FL /GAT /09, 1997.
- 3 PIRES DE SOUZA, E. J. S.; LEITE DA SILVA, A. M. An Efficient Methodology for Coherency-Based Dynamic Equivalents, **IEE Proceedings-C**, Vol. 139, Nº 5, p. 371-382, September 1992.
- 4 BROWN, W. T.; CLOUES W. J. Combination Load-Flow and Stability Equivalent for Power System Representation on A-C Network Analyzers, **AIEE Trans.**, v. 74, pp. 782-787, 1995.
- 5 BROWN, H. E.; SHIPLEY, R. B.; COLEMAN, D.; NIED JR., R. E. A Study of Stability Equivalents, **IEEE Trans. Power App. Syst.** v. PAS-88, pp. 200-207, March 1969.
- 6 Ward, J. B. Equivalent Circuits for Power-Flow Studies, **AIEE Trans.** v. 68, pp. 373-382, 1949.
- 7 UNDRILL, J. M.; TURNER, A.E. Construction of Power System Electromechanical Equivalents by Modal Analysis, **IEEE Trans. Power App. Syst.** v. PAS-90, pp. 2049-2059, September/October 1971.
- 8 NISHIDA, S.; TAKEDA, S. Derivation of Equivalents for Dynamic Security Assessment. **Electrical Power & Energy Systems.** v. 6, n. 1, pp. 15-23, January 1984.

- 9 PRICE, W. W.; GULACHENSKY, E. M.; KUNDUR, P.; LANGE, F. J. Testing of the Modal Dynamic Equivalent Technique. **IEEE Trans.**, v. PAS-97, pp. 1366 -1372, July/August 1978.
- 10 CHANG, A.; ADIBI, M. M. Power System Dynamic Equivalent, **IEEE Trans. Power App Syst.** v. PAS-89, pp. 1737-1744, November/December 1970.
- 11 DE MELLO, R. W.; PODMORE, R.; STANTON, K. N. Coherency-Based Dynamic Equivalent: Applications in Transient Stability Studies, **Proc. PICA Conf.**, pp. 23-31, 1975.
- 12 PODMORE, R. Identification of Coherent Generators for Dynamic Equivalent, **IEEE Trans. Power App. Syst**, v. PAS-97, pp. 1344 - 1354, July/August 1978.
- 13 GERMOND, A. J.; PODMORE, R. Dynamic Aggregation of Generating Unit Models. **IEEE Trans. Power App. Syst.** v. PAS-97, pp. 1060-1069, July/August 1978.
- 14 LEVENBERG, K. A Method for the Solution of Certain Nonlinear Problems in Least Squares. **Quarterly of Applied Mathematics.** v.II n.2, pp. 164 -168, 1944.
- 15 MARQUARDT, D. W. An Algorithm for Least Square Estimation on Nonlinear Parameters. **SIAM Journal on Numerical Analysis.** v.2 n.11, pp. 431 – 441, 1963.
- 16 PIRES DE SOUZA, E. J. S. Manual do Usuário do Programa de Cálculo de Equivalentes Dinâmicos por Coerência – EDINCO, Contrato FURNAS – PUC/Rio Nº 14.095., 2003.
- 17 Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - ANATEM, Manual do Usuário, V09-12/01, CEPEL, 2001.
- 18 ARAÚJO PEDRO, M. B. D. Agregação Dinâmica de Modelos de Sistemas de Excitação e Cálculo de Equivalentes Dinâmicos, **Dissertação de Mestrado**, PUC/Rio, 1999.
- 19 SOUZA, F. L. Agregação Dinâmica de Modelos de Estabilizadores Aplicados em reguladores de Tensão e Cálculo de Equivalentes Dinâmicos, **Dissertação de Mestrado**, PUC/Rio, 1999.

- 20 ALBUQUERQUE, M. A. Agregação Dinâmica de Modelos de Estabilizadores com Dupla Entrada para o Cálculo de Equivalentes Dinâmicos, **Dissertação de Mestrado**, PUC/Rio, 2002.
- 21 KUNDUR, P.; Power Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- 22 PIRES DE SOUZA, E. J. S. Identificação de Geradores Coerentes e Cálculo de Equivalentes Dinâmicos, **Tese de Doutorado**, COPPE/UFRJ, 1987.
- 23 TINNEY, W. F.; POWELL, W. L. The REI Approach to Power Network Equivalents. **Proc. PICA Conf.**, pp. 314-320, 1997.
- 24 Programa de Análise de Redes - ANAREDE, Manual do Usuário, V07-08/99, CEPEL, 1999.

Apêndice 1: Dados do Sistema New England

Os dados de barras encontram-se na tabela A.1, onde a área 1 representa o sistema interno e a área 2 o sistema externo. Os dados de linhas e transformadores encontram-se na tabela A.2. A base utilizada é de 100 MVA

Tabela A.1 – Dados de barras

| Barra N° | Tipo | Tensão (pu) | Ângulo (graus) | Geração (MW) | Carga | | Área |
|----------|------|-------------|----------------|--------------|--------|--------|------|
| | | | | | (MW) | (MVar) | |
| 1 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1 |
| 2 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1 |
| 3 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 322,0 | 2,4 | 2 |
| 4 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 500,0 | 184,0 | 2 |
| 5 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 6 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 7 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 233,8 | 84,0 | 2 |
| 8 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 522,0 | 176,6 | 2 |
| 9 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 10 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 11 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 12 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 9,5 | 88,0 | 2 |
| 13 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 14 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 15 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 320,0 | 153,0 | 2 |
| 16 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 329,4 | 32,3 | 2 |
| 17 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 18 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 158,0 | 30,0 | 2 |
| 19 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 20 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 680,0 | 103,0 | 2 |
| 21 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 274,0 | 115,0 | 2 |
| 22 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 23 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 247,5 | 84,6 | 2 |
| 24 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 308,6 | -92,2 | 2 |
| 25 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 224,0 | 47,2 | 1 |
| 26 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 139,0 | 17,0 | 1 |
| 27 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 281,0 | 75,5 | 2 |
| 28 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 206,0 | 27,6 | 1 |
| 29 | PQ | 1,000 | | 0,0 | 283,5 | 26,9 | 1 |
| 30 | PV | 1,048 | | 250,0 | 0,0 | 0,0 | 1 |
| 31 | PV | 1,010 | | 563,3 | 9,2 | 4,6 | 2 |
| 32 | PV | 1,020 | | 650,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 33 | PV | 0,997 | | 632,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 34 | PV | 1,012 | | 508,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 35 | PV | 1,049 | | 650,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 36 | PV | 1,050 | | 560,0 | 0,0 | 0,0 | 2 |
| 37 | PV | 1,028 | | 540,0 | 0,0 | 0,0 | 1 |
| 38 | Vθ | 1,027 | 6,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 1 |
| 39 | PV | 1,030 | | 1000,0 | 1104,0 | 250,0 | 1 |

Tabela A.2 – Dados de linhas e transformadores

| Da barra | Para barra | Resistência (%) | Reatância (%) | Susceptância (Mvar) | Tape (pu) |
|----------|------------|-----------------|---------------|---------------------|-----------|
| 1 | 2 | 0,350 | 4,110 | 69,870 | |
| 1 | 39 | 0,100 | 2,500 | 75,000 | |
| 2 | 3 | 0,130 | 1,510 | 25,720 | |
| 2 | 25 | 0,700 | 0,860 | 14,600 | |
| 2 | 30 | 0,010 | 1,810 | | 1,000 |
| 3 | 4 | 0,130 | 2,130 | 22,140 | |
| 3 | 18 | 0,110 | 1,330 | 21,380 | |
| 4 | 5 | 0,080 | 1,280 | 13,420 | |
| 4 | 14 | 0,080 | 1,290 | 13,820 | |
| 5 | 6 | 0,020 | 0,260 | 4,340 | |
| 5 | 8 | 0,080 | 1,120 | 14,760 | |
| 6 | 7 | 0,060 | 0,920 | 11,300 | |
| 6 | 11 | 0,070 | 0,820 | 13,890 | |
| 6 | 31 | 0,010 | 2,500 | | 1,000 |
| 7 | 8 | 0,040 | 0,460 | 7,800 | |
| 8 | 9 | 0,230 | 3,630 | 38,040 | |
| 9 | 39 | 0,100 | 2,500 | 120,000 | |
| 10 | 11 | 0,040 | 0,430 | 7,290 | |
| 10 | 13 | 0,040 | 0,430 | 7,290 | |
| 10 | 32 | 0,010 | 2,000 | | 1,000 |
| 12 | 11 | 0,160 | 4,350 | | 1,000 |
| 12 | 13 | 0,160 | 4,350 | | 1,000 |
| 13 | 14 | 0,090 | 1,010 | 17,230 | |
| 14 | 15 | 0,180 | 2,170 | 36,600 | |
| 15 | 16 | 0,090 | 0,940 | 17,100 | |
| 16 | 17 | 0,070 | 0,890 | 13,420 | |
| 16 | 19 | 0,160 | 1,950 | 30,400 | |
| 16 | 21 | 0,080 | 1,350 | 25,480 | |
| 16 | 24 | 0,030 | 0,590 | 6,800 | |
| 17 | 18 | 0,070 | 0,820 | 13,190 | |
| 17 | 27 | 0,130 | 1,730 | 32,160 | |
| 19 | 20 | 0,070 | 1,380 | | 1,000 |
| 19 | 33 | 0,070 | 1,420 | | 1,000 |
| 20 | 34 | 0,090 | 1,800 | | 1,000 |
| 21 | 22 | 0,080 | 1,400 | 25,650 | |
| 22 | 23 | 0,060 | 0,960 | 18,460 | |
| 22 | 35 | 0,010 | 1,430 | | 1,000 |
| 23 | 24 | 0,220 | 3,500 | 36,100 | |
| 23 | 36 | 0,050 | 2,720 | | 1,000 |
| 25 | 26 | 0,320 | 3,230 | 51,300 | |
| 25 | 37 | 0,060 | 2,320 | | 1,000 |
| 26 | 27 | 0,140 | 1,470 | 23,960 | |
| 26 | 28 | 0,430 | 4,740 | 78,020 | |
| 26 | 29 | 0,570 | 6,250 | 102,900 | |
| 28 | 29 | 0,140 | 1,510 | 24,900 | |
| 29 | 38 | 0,080 | 1,560 | | 1,000 |

Tabela A.3 – Dados das máquinas (MD02 - Anatem).

| Gerador N° | H (s) | D (pu/pu) | X _e (%) | X _d (%) | X _q (%) | X' _d (%) | X'' _d (%) | T' _{do} (s) | T'' _{do} (s) | T''' _{do} (s) |
|------------|-------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 42,0 | 4,00 | 1,25 | 10,00 | 6,90 | 3,10 | 2,83 | 10,20 | 0,050 | 0,10 |
| 2 | 30,3 | 9,75 | 3,50 | 29,50 | 28,20 | 6,97 | 4,00 | 6,56 | 0,048 | 0,12 |
| 3 | 35,8 | 10,00 | 3,04 | 24,95 | 23,70 | 5,31 | 3,70 | 5,70 | 0,048 | 0,11 |
| 4 | 28,6 | 10,00 | 2,95 | 26,20 | 25,80 | 4,36 | 3,00 | 5,69 | 0,050 | 0,10 |
| 5 | 26,0 | 3,00 | 5,40 | 67,00 | 62,00 | 13,20 | 8,90 | 5,40 | 0,045 | 0,09 |
| 6 | 34,8 | 10,00 | 2,24 | 25,40 | 24,10 | 5,00 | 3,83 | 7,30 | 0,050 | 0,07 |
| 7 | 26,4 | 8,00 | 3,22 | 29,50 | 29,20 | 4,90 | 3,80 | 5,66 | 0,040 | 0,06 |
| 8 | 24,3 | 9,00 | 2,80 | 29,00 | 28,00 | 5,70 | 3,80 | 6,70 | 0,048 | 0,12 |
| 9 | 34,5 | 14,00 | 2,98 | 21,06 | 20,50 | 5,70 | 3,80 | 4,79 | 0,030 | 0,09 |
| 10 | 500,0 | 10,00 | 0,30 | 2,00 | 1,90 | 0,60 | 0,40 | 7,00 | 0,050 | 0,14 |

Tabela A.4 – Dados dos reguladores de tensão (MD01 - Anatem).

| Gerador N° | K _a (pu/pu) | K _e | K _f (s) | T _m (s) | T _a (s) | T _e (s) | T _f (s) | L _{min} (pu) | L _{max} (pu) |
|------------|------------------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 5,00 | 1,00 | 0,040 | 0,00 | 0,06 | 0,250 | 1,000 | -6,00 | 9,00 |
| 2 | 6,20 | 1,00 | 0,057 | 0,00 | 0,05 | 0,405 | 0,500 | -7,00 | 9,00 |
| 3 | 5,00 | 1,00 | 0,080 | 0,00 | 0,06 | 0,500 | 1,000 | -7,00 | 9,00 |
| 4 | 5,00 | 1,00 | 0,080 | 0,00 | 0,06 | 0,500 | 1,000 | -6,00 | 9,00 |
| 5 | 40,00 | 1,00 | 0,030 | 0,00 | 0,02 | 0,785 | 1,000 | -6,50 | 9,00 |
| 6 | 5,00 | 1,00 | 0,075 | 0,00 | 0,02 | 0,471 | 1,246 | -6,00 | 9,00 |
| 7 | 40,00 | 1,00 | 0,030 | 0,00 | 0,02 | 0,730 | 1,000 | -6,50 | 8,50 |
| 8 | 5,00 | 1,00 | 0,085 | 0,00 | 0,02 | 0,528 | 1,260 | -6,50 | 8,50 |
| 9 | 40,00 | 1,00 | 0,030 | 0,00 | 0,02 | 1,400 | 1,000 | -6,50 | 8,50 |

Tabela A.5 – Dados dos estabilizadores de sistemas de potência (MD01 – Anatem).

| Gerador N° | K (pu/pu) | T (s) | T ₁ (s) | T ₂ (s) | T ₃ (s) | T ₄ (s) | L _{min} (pu) | L _{max} (pu) |
|------------|-----------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | 2,00 | 1,60 | 0,90 | 0,03 | 1,00 | 0,02 | -1,00 | 1,00 |
| 2 | 3,00 | 1,50 | 0,70 | 0,02 | 0,80 | 0,01 | -1,00 | 1,00 |
| 3 | 3,00 | 1,50 | 0,70 | 0,02 | 0,80 | 0,01 | -1,00 | 1,00 |
| 4 | 3,00 | 1,50 | 0,70 | 0,02 | 0,80 | 0,01 | -1,00 | 1,00 |
| 5 | 2,00 | 1,60 | 0,90 | 0,03 | 1,00 | 0,02 | -1,00 | 1,00 |
| 6 | 2,00 | 1,60 | 0,90 | 0,03 | 1,00 | 0,02 | -1,00 | 1,00 |
| 7 | 3,00 | 1,50 | 0,70 | 0,02 | 0,80 | 0,01 | -1,00 | 1,00 |
| 8 | 3,00 | 1,50 | 0,70 | 0,02 | 0,80 | 0,01 | -1,00 | 1,00 |
| 9 | 2,00 | 1,60 | 0,90 | 0,03 | 1,00 | 0,02 | -1,00 | 1,00 |

Tabela A.6 – Dados de turbinas e reguladores de velocidade (MD02 – Anatem).

| Gerador N° | R (pu) | T (s) | T ₁ (s) | T ₂ (s) | L _{min} (pu) | L _{max} (pu) | D _{turb} (pu) |
|------------|--------|-------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0.05 | 0.10 | 2.10 | 7.00 | 0.00 | 3.25 | 0.50 |
| 5 | 0.04 | 0.18 | 2.90 | 7.80 | 0.00 | 6.60 | 0.40 |
| 8 | 0.05 | 0.10 | 2.20 | 7.00 | 0.00 | 7.02 | 0.50 |
| 9 | 0.06 | 0.20 | 2.00 | 6.00 | 0.00 | 8.50 | 0.40 |

Tabela A.7 – Dados de turbinas e reguladores de velocidade (MD03 – Anatem).

| Gerador N° | B _P (pu) | B _T (pu) | T _V (s) | T ₁ (s) | T ₂ (s) | T _w (s) | L _{min} (pu) | L _{max} (pu) | T _{max} (pu) | D _{turb} (pu) |
|------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0.05 | 0.30 | 4.00 | 5.00 | 0.20 | 1.60 | -0.11 | 0.095 | 3.25 | 0.50 |
| 5 | 0.04 | 0.20 | 3.00 | 3.00 | 0.15 | 1.30 | -0.11 | 0.072 | 6.60 | 0.46 |
| 8 | 0.04 | 0.60 | 4.60 | 7.00 | 0.20 | 1.60 | -0.13 | 0.096 | 7.02 | 0.50 |
| 9 | 0.06 | 0.40 | 5.00 | 8.00 | 0.40 | 1.80 | -0.12 | 0.095 | 8.50 | 0.50 |

Tabela A.8 – Dados de turbinas e reguladores de velocidade (MD05 – Anatem).

| Gerador N° | C ₁ (pu) | C ₂ | C ₃ | C ₈ (s) | T ₃ (s) | T ₄ (s) | T ₅ (s) | T _C (s) | T _{max} (pu) | D _{turb} (pu) |
|------------|---------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 20.60 | 0.724 | 0.564 | 0.22 | 0.20 | 0.20 | 10.00 | 0.50 | 3.25 | 0.50 |
| 5 | 20.00 | 0.690 | 0.570 | 0.20 | 0.22 | 0.22 | 10.20 | 0.50 | 6.60 | 0.52 |
| 8 | 20.00 | 0.720 | 0.564 | 0.19 | 0.20 | 0.21 | 9.90 | 0.50 | 7.02 | 0.49 |
| 9 | 20.18 | 0.700 | 0.539 | 0.20 | 0.22 | 0.22 | 10.10 | 0.30 | 8.50 | 0.52 |

Observação: Os dados considerados para os modelos de turbina e regulador de velocidade dos geradores coerentes do sistema externo estão apresentados no capítulo 3.

Apêndice 2: Método de Levenberg-Marquardt

Seja $F(x)$ uma função dada pelo somatório dos quadrados de m funções não-lineares de um parâmetro vetorial x , apresentado na equação (1). O termo $1/2$ é incluído para evitar a aparição de um fator 2 nas derivadas. A função $f_i(x)$ é definida como $y_i - g(x, \omega_i)$, onde y_i representa os pontos de referência e $g(x, \omega_i)$ é a função modelo desejada, sendo ω uma variável independente.

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(x) \quad (1)$$

A aproximação quadrática para esta função objetivo pode ser obtida considerando os três primeiros termos da expansão em série de Taylor, avaliados na estimativa atual x_k da solução apresentada na equação (2). O índice k indica a quantidade calculada em x_k .

$$F(x_k + p) \cong F_k + g_k^T p + \frac{1}{2} p^T G_k p \quad (2)$$

onde:

p : passo para o mínimo.

g : gradiente de F (∇F), e

G : é a matriz Hessiana de F ($\nabla^2 F$).

O valor mínimo do lado direito da equação (2) será atingido se p_k é um mínimo da seguinte função quadrática:

$$\Phi(p) = g_k^T p + \frac{1}{2} p^T G_k p \quad (3)$$

Calculando um ponto estacionário p_k da equação (3), i.e. $\nabla \Phi(p_k) = 0$, podemos verificar que este ponto satisfaz o sistema linear abaixo:

$$G_k p_k = -g_k \quad (4)$$

Seja $J(x)$ a matriz Jacobiana de dimensão $m \times n$ da função vetorial $f(x)$ e $G_i(x)$ a matriz Hessiana de dimensão $n \times n$ de $f_i(x)$. Da equação (1) resulta:

$$g(x) = J^T(x)f(x) \quad (5)$$

$$G(x) = J^T(x)J(x) + Q(x) \quad (6)$$

onde:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$$

$$Q(x) = \sum_{i=1}^m f_i(x)G_i(x)$$

Substituindo as equações (5) e (6) na equação (4), resulta:

$$(J_k^T J_k + Q_k) p_k = -J_k^T f_k \quad (7)$$

A direção de busca do método de Levenberg-Marquardt é definida como a solução das equações:

$$(J_k^T J_k + \lambda_k I) p_k = -J_k^T f_k \quad (8)$$

onde λ_k é um escalar não-negativo e I é a matriz identidade. As estimativas da solução são obtidas pela equação (9).

$$x_{k+1} = x_k + p_k \quad (9)$$

Apesar de ser preciso calcular e inverter uma aproximação da matriz Hessiana de dimensão $n \times n$ a cada iteração, o esforço computacional deste método é baixo para n pequeno.