



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA CA E CC - GAT

ALGORITMO DE CONTROLE DE PASSO UTILIZANDO MATRIZ DE DESEMPENHO E TÉCNICAS DE I. A. EM PROCESSOS DE SIMULAÇÃO TRANSITÓRIA E DE LONGO-PRAZO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

B. Isaías Lima Lopes (*) **A.C. Zambroni Souza Valério** **O. Albuquerque Rafael** **C. Leme Otávio A. S. Carpinteiro**
UNIFEI **UNIFEI** **CEMIG** **UNIFEI** **UNIFEI**

RESUMO

Este trabalho utiliza uma metodologia de simulação de equações algébrico-diferenciais com passos de integração variáveis no curto e longo-prazo em sistemas elétricos de potência. O foco do trabalho está no método de integração numérica predictor-corrector e nas abordagens dinâmica e quase-dinâmica presente na literatura. O algoritmo desenvolvido baseia-se na proposta de integração implícita e faz uso do método iterativo de integração de Newton com o parâmetro passo obtido durante o processo iterativo. Uma vez que o tamanho do passo é fundamental em simulações de curto e longo-prazo, a idéia é identificar aumentos sucessivos e inicializar, então, o processo quase-dinâmico, que considera equações tipicamente algébricas, considerando os resultados satisfatórios a longo prazo. Controlar o tamanho do passo de integração e alterar as técnicas de simulação ao longo do processo permite rapidez do processo de simulação, eficiência computacional e precisão.

PALAVRAS-CHAVE

Simulação, Algoritmo de Controle de Passo, Método Quase-Dinâmico, Matriz de Desempenho, Inteligência Artificial

1.0 - INTRODUÇÃO

No processo de simulação dinâmica de sistemas de potência, o tamanho do passo de integração está diretamente relacionado às constantes de tempo muito pequenas associadas aos geradores e aos seus controles (1-3). Com algoritmos de integração de passo fixo, tende-se a especificar um tamanho de passo pequeno que forneça uma precisão adequada para o processo de simulação numérica. Até mesmo quando o tamanho do passo de integração é variável ao longo do processo, e diante de uma perturbação eventual, passos de integração pequenos são necessários. Portanto, uma abordagem alternativa seria ignorar as constantes de tempo pequenas de alguns dispositivos da rede. Porém, esta simplificação pode ter um efeito considerável na estabilidade dos controles das máquinas e fornecer resultados inesperados e incorretos na simulação. Além disso, em simulações de longo prazo, com um período de tempo consideravelmente grande em relação às constantes de tempo presentes, o processo de integração torna-se lento e, conseqüentemente, computacionalmente pouco eficiente.

Independentemente da influência no tamanho do passo de integração, as equações dinâmicas devem ser modeladas para que se tenha representatividade dos estados dinâmicos do sistema. Em muitos algoritmos de integração numérica, isto significa identificar as mudanças nos estados e determinar os novos valores a partir do próximo passo de integração. Assim, fica claro que constantes de tempo pequenas exigem um tempo maior de simulação e um esforço computacional considerável. Portanto, abordagens diferenciadas nos modelos de equações do sistema de potência para simulações de curto e longo-prazo permitem aumentar a velocidade de simulação sem comprometer os resultados esperados (4-6).

Também, em estudos de longo-prazo há necessidade de se representar os fenômenos transitórios que eventualmente ocorram, bem como os fenômenos mais lentos, típicos do longo prazo (7-9). Em ambos os casos, uma melhoria na metodologia de passo variável, com a adoção de simplificações ou considerações sobre representação do sistema implica em relativa precisão e velocidade. Uma dessas considerações é o modelo quase-dinâmico, que considera a condição de regime transitória já superada (10).

Portanto, este trabalho apresenta uma reformulação na estratégia de mudança de passo de integração numérica, com o objetivo de redução de esforço computacional, adotando um processo de simulação de passo variável juntamente com os modelos transitório e quase-dinâmico de sistemas de potência. O algoritmo desenvolvido é executado de tal modo que para estimativas de grandes variações no estado do sistema nenhuma simplificação nas equações do sistema ocorra, ou seja, passos de integração pequenos são então adotados e a dinâmica transitória é calculada. Porém, para estimativas de pequenas variações no estado do sistema, a simplificação quase-dinâmica é adotada e nenhum passo de integração é usado. Pretende-se, com esse estudo, proporcionar um algoritmo eficiente para se trabalhar com simulações de curto e longo prazo em sistemas de potência sem perder a qualidade dos resultados obtidos.

2.0 - PROCEDIMENTOS E AJUSTES DE PASSO DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA

O uso dos métodos previsor/corretor permite ajustar o processo de simulação no tempo tornando a análise mais segura e consistente. O procedimento é aplicado recursivamente ao método de cálculo com os novos dados atualizados a cada iteração. Em qualquer processo previsor/corretor, tem-se uma estimativa inicial dos valores das variáveis de interesse e a seguir estes valores iniciais são corrigidos fornecendo valores atualizados das variáveis. A metodologia, tipicamente, parte de uma aproximação linearizada do modelo envolvido em um ponto operativo do sistema. Tendo-se as condições iniciais x_0 e y_0 , o próximo valor x_i , na iteração i , é obtido da relação de Euler (previsor).

$$x_i = x_0 + hf(x_0, y_0) \quad (1)$$

Com h sendo o passo de integração do processo, inicialmente adotado. E $f(x_0, y_0)$ o valor de f no ponto x_0 e y_0 . O passo seguinte é ajustar o valor de h de acordo com a relação para convergência do processo numérico de integração, equação (2):

$$h \leq \frac{2}{\left\| \frac{\partial f(x, y)}{\partial(x, y)} \right\|} \quad (2)$$

Onde a $\left\| \frac{\partial f(x, y)}{\partial(x, y)} \right\|$ é a norma euclidiana da matriz jacobiana J das equações de estado no ponto de equilíbrio atual. Portanto, pode-se escrever (2) como segue:

$$0 < h \leq \frac{2}{\|J\|} \quad (3)$$

Considerando a variável x_i estimada a partir da equação de Euler, equação (1), o passo de integração seguinte pode ser também estimado usando a equação (3).

Quaisquer mudanças ocorridas nas variáveis de estado podem então ser avaliadas e relacionadas à estabilidade do sistema e, portanto, determinantes na estimativa e ajuste do próximo valor do passo de integração. Dessa forma, pode-se obter uma relação matricial entre o conjunto de equações do sistema em dois instantes sucessivos de tempo para os passos de integração distintos. Esta relação pode é, então, representada pela equação (4) abaixo:

$$H_{i+1} = \tilde{J}H_i + \theta \quad (4)$$

Onde H_{i+1} é um vetor dos passos de integração estimados na iteração $i+1$, H_i o vetor de passos obtidos na iteração i , e \tilde{J} é a matriz jacobiana “ligeiramente” modificada do sistema, que relacionando a sensibilidade ou influência das variáveis de estado na estimativa de H_{i+1} , e sendo θ um fator de correção linear que ajusta os valores de H_{i+1} .

A equação (4) pode ser re-escrita identificando os valores presentes nas relações entre as variáveis, considerando as equações (5) e (6), representativas do modelo algébrico-diferencial do sistema dinâmico adotado, respectivamente. Assim, tem-se a equação (7), a seguir:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (5)$$

$$0 = g(x, y) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} h_{x(i+1)} \\ \dots \\ h_{y(i+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{xi} \\ \dots \\ h_{yi} \end{bmatrix} + \theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \dots & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{xi} \\ \dots \\ h_{yi} \end{bmatrix} + \theta \quad (7)$$

A partir da divisão de \tilde{J} em dois conjuntos relacionados às variáveis de estado x e y , notas-se a influência das dinâmicas rápidas e de longo-prazo na estimativa dos novos valores dos passos de integração. A equação (7) permite, então, determinar as mudanças no desempenho do processo de simulação e acompanhar a evolução do estado do sistema à medida que o processo de simulação prossegue.

Consequentemente, as estimativas associadas às mudanças de desempenho no processo de simulação estão diretamente associadas aos passos de integração e podem ser correlacionadas a uma matriz de avaliação de desempenho do processo de simulação. A equação (8) apresenta o modelo predictor/corretor na estimativa do passo de integração, juntamente com a avaliação de desempenho com a simulação em andamento.

$$H_{i+1} = H_i + Z(\tilde{J}H_i + \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{xi} \\ \dots \\ h_{yi} \end{bmatrix} + \theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \dots & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{xi} \\ \dots \\ y_{yi} \end{bmatrix} + \theta \quad (8)$$

A matriz de desempenho do processo de simulação, Z , correlaciona os coeficientes de \tilde{J} e passo de integração, fornecendo uma medida da influência no desempenho da simulação das variáveis de estado e passo de integração. A matriz Z pode ser comparada a matriz de desempenho utilizada em controle de sistemas dinâmicos; portanto, podem ser encontradas, por exemplo, no modelo discreto de filtro de Kalman (11), e apresentadas a seguir, equações (9) a (11).

$$h\left(\frac{i+1}{i}\right) = \phi(i+1)h(i) \quad (9)$$

$$K\left(\frac{i+1}{i}\right) = \phi(i+1)K_i\phi'(i+1) + O_{i+1} \quad (10)$$

$$Z_{i+1} = K\left(\frac{i+1}{i}\right)\tilde{J}'_{i+1}\left[K\left(\frac{i+1}{i}\right)\tilde{J}'_{i+1}\right]^{-1} \quad (11)$$

3.0 - ESCALA DE TEMPO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O conjunto de equações algébrico-diferenciais (12), novamente apresentados a seguir, equações (12) e (13), representa as relações algébricas da rede e das máquinas e a dinâmica das máquinas e demais controles presentes no sistema (13).

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (12)$$

$$0 = g(x, y) \quad (13)$$

Onde x e y representam as variáveis de estado, algébricas e dinâmicas, respectivamente. Uma consideração interessante em análise de longo-prazo em sistemas de potência é a aplicação da condição de equilíbrio ao conjunto puramente diferencial, obtendo um segundo conjunto de equações algébricas representativo da dinâmica de longo-prazo para o sistema de potência (modelo quase-dinâmico). Portanto, o sistema de equações diferenciais (12) passa a ser representado pelo conjunto de equações algébricas a seguir:

$$0 = f(x, y) \quad (14)$$

Fisicamente, considera-se que a dinâmica rápida subjacente aos estados mais lentos são agora relações puramente algébricas, equação (14). Assim, em simulações de sistemas de elétricos de potência pode-se optar pela consideração algébrica das equações dinâmicas do sistema. Obviamente, restrições à aplicação dessa consideração quase-dinâmica devem ser estudadas para cada caso, pois os modelos adotados para representação do sistema afeta diretamente e compromete o resultado. Por exemplo, as variáveis de estado associadas ao controle de tensão dos geradores (Regulador Automático de Tensão) afetam diretamente a estabilidade dos controladores de tensão e, portanto, não podem ser negligenciadas. Dessa forma, a interação entre os estados mais rápidos e lentos do sistema é um problema que deve ser considerado na modelagem quase-dinâmica.

Neste trabalho, faz-se uso do método quase-dinâmico para simulação de longo prazo a partir da determinação das condições em que esse modelo pode ser empregado de forma satisfatória, considerando as restrições impeditivas e a possível perda de precisão nos resultados obtidos para os casos simulados. Portanto, adotou-se o conjunto algébrico-diferencial ou puramente algébrico, representados pelas equações de (12) a (14) em todos os casos simulados.

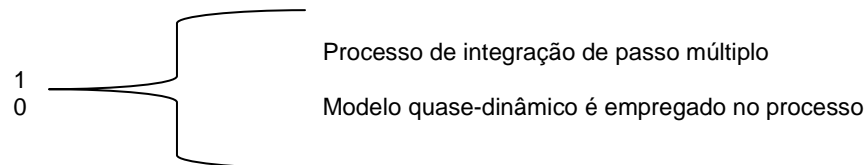
Considerando, então, o modelo quase-dinâmico disparado dentro do processo de integração numérica, pode-se estabelecer os seguintes valores para as equações (9) a (11), apresentadas a seguir, equações (15) a (17):

$$\phi(i+1) = I \quad (15)$$

$$O(i+1) = 0 \quad (16)$$

$$\tilde{J}'_{i+1} = C\tilde{J}' \quad (17)$$

O vetor C é um vetor diagonal cujos valores atribuídos são:



Considerando o efeito da matriz de desempenho de processo Z relacionada ao progresso da simulação e eficiência do algoritmo, é necessário estabelecer algum critério de classificação dos valores dos passos de integração, a partir das estimativas obtidas, e determinar de fato quando o processo deve migrar para o modelo quase-dinâmico, sem as restrições inerentes ao método. Porém, pode-se admitir um erro relativo no passo (estimativa) e nos elementos de Z , associado ao próprio processo de simulação numérica.

O algoritmo prevê tais casos a partir das condições impostas e apresentadas nas equações de obtenção do passo de integração h , da sensibilidade das variáveis em relação à h , \tilde{J} , e também de Z , a partir da avaliação sucessiva de no mínimo três valores estimados de passos de integração.

4.0 - REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E MATRIZ DE DESEMPENHO

O aprendizado em redes neurais artificiais envolve o mapeamento entre a entrada e a saída, por exemplo, uma rede MLP (14), Figura 1, obtida a partir de um modelo do sistema ou de dados reais medidos. Uma intrincada rede de neurônios com funções de ativação não lineares interpola uma curva que a priori pode ser utilizada como um estimador de estados bem sucedido (15). No presente trabalho, um modelo híbrido de matriz de desempenho e RN's são utilizados para predição e estimativa dos passos de integração e da migração de um método integração para o método quase-dinâmico. O diagrama de blocos a seguir, representa o algoritmo utilizado no processo de simulação completo, Figura 2.

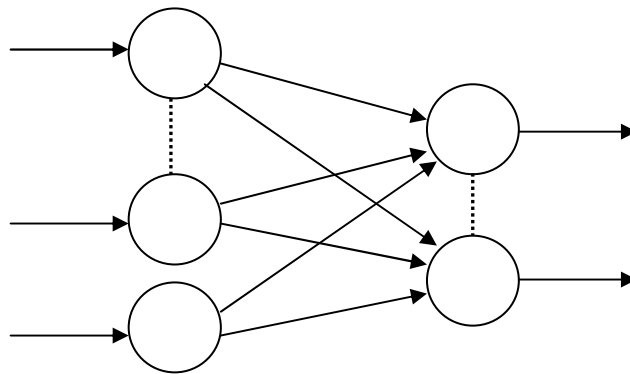


Figura 1 – Exemplo de Rede Neural Artificial (multi-layer perceptron)

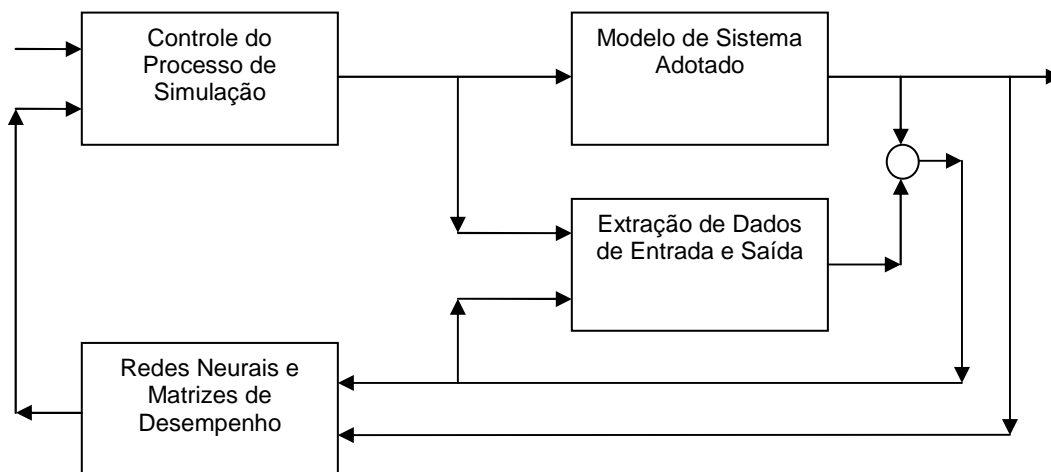


Figura 2 – Diagrama de Blocos do Algoritmo de Simulação

5.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os resultados das simulações para vários sistemas a partir de modelos e dados típicos de máquina, reguladores e motores são apresentados nesta seção. Tais modelos e dados são encontrados na literatura e, basicamente, nesta fase procurou-se comparar e validar a proposta apresentada no trabalho.

A Tabela 1 abaixo mostra os resultados para três sistemas: Itaipu 17 Barras, Cemig 36 Barras e Sistema Teste 212 Barras e 50 Geradores. Os valores e dados de interesse obtidos são apresentados nas respectivas colunas, a saber:

- Variável + Sensível: variável que é determinante no tamanho do passo obtido, esta variável influencia diretamente o controle do processo. Maior valor absoluto ranqueado entre as variáveis dinâmicas;
- Passo inicial: passo inicial adotado para simulação;
- Passo estimado: passo obtido utilizando a equação (2);
- Passo corrigido: passo obtido utilizando a matriz de desempenho e RN's;
- Mudanças de Métodos: quantidade de vezes em houve mudanças de métodos de integração: dinâmico e quase-dinâmico;
- Tempo simulação dinâmica: tempo considerado (pu) de simulação com passo de integração variável e sem mudança de método, para comparação com o processo completo;
- Tempo Processo Completo: tempo total de simulação considerado o processo aplicado.

Tabela 1 – Resultados das Simulações

Sistema/ Contingência	Variável + Sensível	Passo Inicial	Passo Estimado Após 3 Iterações	Passo Corrigido (Híbrido)	Mudanças de Métodos	Tempo Simulação Dinâmica (pu)	Tempo Processo Completo (pu)
Itaipu 17							
Falta 3ϕ	Efd_3 (0,63)	0,001	0,00143	0,0105	1	1,0	0,95
Rampa Carga	ω_2 (0,78)	0,001	0,00112	0,0105	1	1,0	0,93
Cemig 36							
Falta 3ϕ	$E'q_5$ (0,56)	0,001	0,00151	0,0151	1	1,0	0,869
Rampa Carga	ω_5 (0,42)	0,001	0,00172	0,0123	2	1,0	0,543
Teste 212							
Falta 3ϕ	Efd_{36} (0,55)	0,001	0,00147	0,0111	2	1,0	0,121
Rampa Carga	ω_{48} (0,39)	0,001	0,00136	0,00787	7	1,0	0,652

6.0 - CONCLUSÃO

Os métodos de integração numérica de simulação de curto e longo-prazo em sistemas elétricos de potência apresentam características peculiares que fornecem subsídios para a exploração de metodologias e de modelos teóricos sedimentados na literatura. Porém, agregar em um algoritmo que viabilize as simulações de curto e longo-prazo ao longo do processo de simulação é o foco principal da proposta apresentada neste trabalho. A metodologia quase-dinâmica explora as características de longo-termo, empregando, portanto, um método iterativo de solução rápida das equações dinâmicas, que aparecem no modelo completo do sistema elétrico representado. O processo geral de simulação contempla tal metodologia considerando, porém, as restrições impostas, que negligenciam a dinâmica transitória em prol do processo rápido de obtenção dos pontos de equilíbrio que devem existir a priori – senão o método é comprometido. Essa tarefa, nada trivial, de mudança de métodos durante o processo de simulação é satisfatoriamente desempenhada pelo controle de passo de integração, utilizando-se das matrizes de desempenho e de técnicas de inteligência artificial na estimativa de passos de integração e na migração entre os métodos.

Juntamente com a discussão teórica dos métodos empregados em estabilidade transitória e de longo-prazo, o algoritmo de simulação permite acompanhar o período transitório ao longo do tempo e de continuar o processo durante a evolução de longo-prazo. Para esta finalidade, um método iterativo é apresentado, assim que as restrições são superadas. Esta é uma vantagem significativa do método, desde que as equações que modelam o sistema são preservadas. Os resultados das simulações tabelados são bastante relevantes e comprovam a eficiência do método aplicado no estudo de casos. Optou-se, porém, dentre a extensa gama de informações que se obtêm do processo, àquelas que são pertinentes para acompanhar e validar a utilização do algoritmo empregado. A exatidão dos resultados e o desempenho computacional observado confirmam a metodologia como eficaz para a análise proposta.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradem o suporte financeiro do CNPq, CAPES e FAPEMIG, bem como à Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- (2) V. Ajarapu, "Identification of steady state voltage stability in power systems," *Proc. of International Conference on High Technology in the Power Industry*, pp. 244-247, Mar. 1988.
- (3) Daniel Ruiz-Vega, Arturo Messina and Mania Pavella, "Online assessment and control of transient oscillation damping", *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1038-1047, 2004 .
- (4) A. M. Leite da Silva, J. L. Jardim, A. M. Rei and J. C. O. Mello, "Dynamic security risk assessment", *Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999. IEEE, July 1999 pp. 198 - 205 vol.1.
- (5) G. N. Taranto, N. Martins, D. M. Falcao, A. C. B. Martins, M. G. dos Santos, "Benefits of applying secondary voltage control schemes to the Brazilian system", *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. IEEE, pp. 937 - 942 vol. 2
- (6) M. Stubbe, A. Bihain, J. Deuse, J. C. Baader, "STAG – A New Unified Software Program for the Study of the Dynamic Behaviour of Electrical Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, n.1, pp. 129-138, Feb. 1989.
- (7) R. J. Frowd, J. C. Giri and R. Podmore, "Transient Stability and Long Term Dynamics Unified", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 101, n.10, pp. 3841-3849, Oct. 1982.
- (8) A. Manzoni, G. N. TARANTO and D. M. FALCÃO, "A Comparison of Power Flow, Full and Fast Dynamic Simulations", *Power Systems Computation Conference*, 2002, Sevilha. Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference, 2002. pp. 1-6.
- (9) H. L. Fuller, P. M. Hirsch and M. B. Lambie, "Variable integration step transient analysis: VISTA", *IEEE PICA Conf.*, pp. 277-284, 1973.
- (10) Van Cutsem, T., Vournas, C. D., "Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, n.1, pp. 146-154, Feb. 1992.
- (11) Julier, S.J. Uhlmann, J.K., "A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems". *Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simul. And Controls*, 1997.
- (12) F. Verhulst. "Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990.

- (13) J. L. Jardim, C. S. Neto and W. T. Kwasnicki, "Design features of a dynamic security assessment system", *Power Systems Conference and Exposition*, 2004. IEEE PES, Oct. 2004 pp. 446 - 452 vol.1.
- (14) Haykin, S., "Neural Networks – A Comprehensive Foundation", Macmillian, New York, 1994.
- (15) Broomhead, D. S., and Lowe, D., "Multivariate Function Interpolation and Adaptive Networks", *Complex Systems*, Vol. 2, Complex Systems Publications, Champaign, IL, 1988.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

B. Isaias Lima Lopes graduou-se em Engenharia Elétrica em 1999, obteve os graus de Mestre e Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica em 2001 e 2004, respectivamente, pela Universidade Federal de Itajubá. Atualmente é professor adjunto do Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologias da Informação (IESTI/UNIFEI). Suas áreas de interesse são Análise de Estabilidade em Sistemas Dinâmicos e Aplicações de Inteligência Artificial em Áreas Afins.

Antonio Carlos Zambroni de Souza graduou-se em Engenharia Elétrica em 1987 pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro, recebeu o grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica em 1990 pela Universidade Católica do Rio de Janeiro. Em 1995 obteve seu Ph.D. pela Universidade de Waterloo, Canadá. Atualmente, é professor associado da Universidade Federal de Itajubá. Suas áreas de interesse são Estabilidade de Tensão e Sistemas Dinâmicos.

Valerio Oscar Albuquerque graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Belo Horizonte em 1989. Recebeu o grau de Mestre em Ciências pela Universidade Federal em Itajubá em 2002. Desde de 1986 trabalha Companhia Energética de Minas Gerais, hoje no departamento de planejamento da CEMIG. Atualmente é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade de Federal em Itajubá.

Rafael Coradi Leme graduou-se em Engenharia Elétrica em 2002, obteve os graus de Mestre e Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica em 2004 e 2008, respectivamente, pela Universidade Federal de Itajubá. Suas áreas de interesse são Análise de Estabilidade em Sistemas Dinâmicos e Redes Neurais Artificiais.

Otavio A. Salgado Carpinteiro é bacharel em Matemática e Música pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1980 e 1985, respectivamente. Em 1988 recebeu o grau de Mestre em Ciências em Engenharia da Computação em 1990. Em 1996 obteve seu Ph.D em Ciências Cognitivas. Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Itajubá e suas áreas de interesse são Redes Neurais Artificiais e Sistemas Operacionais.