



Renato Teixeira Lima

**Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Controle
de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco

Rio de Janeiro
Setembro de 2007



Renato Teixeira Lima

**Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Controle
de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco
Orientadora
Departamento de Engenharia Elétrica/PUC-Rio

Dr. Alexandre Pinto Alves da Silva
COPPE/UFRJ

Dra. Karla Tereza Figueiredo Leite
UERJ

Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa
Departamento de Metrologia/PUCRio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 11 de setembro de 2007

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

Renato Teixeira Lima

Nasceu em 01 de setembro de 1979. Obteve formação técnica em Eletrotécnica Industrial em 1999 e grau de Engenheiro Eletricista em 2005, pelo CEFET-RJ. De 1999 a 2004 trabalhou para Furnas Centrais Elétricas S.A. como Operador do Sistema Elétrico, chegando ao cargo de Operador Supervisor em 2005. Desde 2005 trabalha como Engenheiro de Sistemas de Potência para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Ficha Catalográfica

Lima, Renato Teixeira

Redes neurais artificiais aplicadas no controle de tensão de sistemas elétricos de potência / Renato Teixeira Lima ; orientadora: Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco. – 2007.

99 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Controle de tensão. 3. Redes neurais. 4. Sistema elétrico de potência. I. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuszi. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha família e aos meus amigos.

Agradecimentos

À minha mãe e ao meu avô pelo carinho e educação.

Às minhas avós pelo carinho.

Ao meu irmão pelo companheirismo.

À Fernanda pelo carinho e compreensão.

Aos amigos Aline, Armando, Bruno, Maurício, Renato, Anderson, Kaeby e Daniel que sabem como é importante a amizade.

A todos os amigos do COSR-SE do ONS que contribuíram direta e indiretamente com este trabalho.

Especialmente aos amigos da Pós-operação do COSR-SE.

Luiz Cláudio e Arthur Santa Rosa, muito obrigado pela co-orientação.

À Marley pela ótima orientação, sempre disponível quando necessário.

Aos professores.

A todos que torcem por mim.

Resumo

Lima, Renato Teixeira; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Orientadora). **Redes Neurais Artificiais Aplicadas no Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro, 2007. 99p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O controle das tensões dos diversos barramentos de um sistema elétrico de potência tem como objetivo garantir a qualidade da energia fornecida aos consumidores. As tensões devem respeitar níveis regulamentados pelo governo. Atualmente, no Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, a tarefa do controle de tensão, realizada pelos operadores de tempo real, se baseia nos valores e tendências de diversas variáveis (tensões, potências reativas e ativas, sensibilidade dos equipamentos, dentre outras). Para a formação de um operador nessa tarefa são necessários de um a dois anos, tempo que poderia ser reduzido caso um sistema de apoio à decisão dedicado ao problema de controle de tensão estivesse à disposição durante o treinamento. Entretanto, em virtude do grande número de grandezas a serem analisadas e de suas não linearidades, é necessário uma ferramenta automática de apoio à decisão que seja capaz de tratar intrinsecamente relações não lineares. Deste modo, neste trabalho optou-se por desenvolver um sistema baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) para a confecção do sistema sugerido, com o objetivo de indicar a necessidade de realizar ações de controle de tensão utilizando-se dos recursos ou equipamentos disponíveis. O sistema desenvolvido é composto de três módulos: Pré-processamento; Análise e Classificação do evento; e Pós-processamento. Tal sistema serve para sugerir a manobra de equipamentos mais adequada para o controle de tensão. No estudo de caso, o sistema proposto foi avaliado nos equipamentos de controle de tensão (reatores, capacitores e tapes) constantes no Sistema de Transmissão em 765 kV, responsável pela interligação dos sistemas Sul e Sudeste do Brasil. Utilizando dados obtidos do sistema de aquisição em tempo real, diferentes configurações de RNAs foram testadas. Os melhores resultados foram obtidos com uma estrutura de duas redes neurais por equipamento a ser controlado, apresentando, em média, 80 % de acerto em relação às manobras realizadas em tempo real. Em virtude da complexidade do problema, os resultados foram considerados mais do que satisfatórios, indicando a aplicabilidade desta técnica para a realização do sistema desejado.

Palavras-chave

Controle de tensão, redes neurais, sistema elétrico de potência.

Abstract

Lima, Renato Teixeira; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuszi (Advisor). **Artificial Neural Networks in the Voltage Control of Electrical Power Systems**. Rio de Janeiro, 2007. 99p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of the voltage control in Electrical Power System (EPS) is to guarantee the quality of the energy supplied to consumers. The voltage must respect government regulated levels. Currently, on the Brazilian EPS, the voltage control task is carried out by system operators based on diverse information, such as current values, and trends of electric variables (voltages, reactive and active powers, their sensitivities in the control devices performance, amongst others). To fully train a operator in this task it is necessary one or two years, period that could be greatly reduced if a decision support system was available during the operator's training. However, due to the great number of variables that must be analyzed and their nonlinearity, an automatic decision support tool, capable to treat nonlinear relations, is necessary. Therefore, this work proposes a system based on Artificial Neural Networks (ANN), with the objective to identify the necessity or not to use the voltage control resources in the EPS. The developed system is composed of three modules: Pre-processing; Event Analysis and Classification; and Post-processing. Such decision support system suggests the most adequate equipment maneuver in the voltage control task. In the case study, the proposed system was evaluated using the available voltage control equipments (reactors, capacitors and transformer taps) in the 765 kV Transmission System, main responsible trunk for the interconnection of South and Southeastern Brazilian systems. Using real time data, different ANN configurations have been tested. The best results were obtained with a structure composed of two neural networks, for each controlled equipment, presenting, in average, 80% accuracy in relation to maneuvers occurred in real time. Due to the problem complexity, the results were considered more than satisfactory, indicating the applicability of this technique for the development of the desired system.

Keywords

Voltage control, neural networks, electrical power system.

Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Motivação	13
1.2.	Objetivos	17
1.3.	Descrição do Trabalho	17
1.4.	Organização do Trabalho	18
2	Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência	19
2.1.	Controle de Tensão Mediante Ajuste da Excitação das Unidades Geradoras	22
2.2.	Controle de Tensão por Tapes de Transformadores	26
2.3.	Controle de Tensão por Banco de Capacitores e de Reatores em Paralelo	29
2.4.	Controle de Tensão dos Terminais de Longas Linhas de Transmissão	32
2.5.	Exemplo Real de Controle de Tensão	35
2.6.	Controle Coordenado de Tensão	37
2.7.	Aplicações de RNA nos SEPs	41
2.7.1.	Previsão de Carga	43
2.7.2.	Diagnóstico de Falhas	43
2.7.3.	Planejamento Operacional	44
2.7.4.	Análise de Segurança	44
3	Sistema de Apoio à Decisão para o Controle de Tensão (SADECT) Baseado em Redes Neurais	46
3.1.	Dados de Entrada e Crítica	46
3.2.	Pré-processamento	51
3.3.	Classificação dos eventos	53
3.3.1.	Modelo RNA CENTRAL	54
3.3.2.	Modelo RNA ÚNICA	55
3.3.3.	Modelo RNA DUPLA	56
3.4.	Pós-processamento	58
4	Estudo de Caso	61
4.1.	Base de Dados	64
4.2.	Pré-processamento	71
4.2.1.	Pré-processamento dos Dados de Entrada	71
4.2.2.	Pré-processamento dos Dados de Saída	78
4.3.	Classificação dos eventos	80
4.3.1.	Modelo RNA CENTRAL	81
4.3.2.	Modelo RNA ÚNICA	86
4.3.3.	Modelo RNA DUPLA	87
4.3.4.	Discussão dos Resultados	92

5 Conclusões e Trabalhos Futuros	93
5.1. Conclusões	93
5.2. Trabalho Futuros	97
Referências bibliográficas	98

Lista de figuras

Figura 1 – Curva de carga no Brasil em um dia útil	15
Figura 2 – Triângulo de potências	21
Figura 3 – SEP exemplo	23
Figura 4 – Controle de tensão pelas unidades geradoras	25
Figura 5 – Desequilíbrio de potência reativa entre unidades geradoras	26
Figura 6 – Controle de tensão pelos tapes de transformadores	28
Figura 7 – Desequilíbrio de potência reativa entre os transformadores	29
Figura 8 – Entrada de 20 MW de carga no barramento F	31
Figura 9 – Manobra para ligar o banco de capacitores de 15 <i>Mvar</i>	31
Figura 10 – Elevação da tensão por “Efeito Ferranti”	33
Figura 11 – Mudança de período de carga	35
Figura 12 – Correção da tensão no período de carga pesada	36
Figura 13 – Modelo do controle coordenado de tensão	39
Figura 14 – Percentual do número de publicações para cada aplicação apresentada em [HAQUE, 2005]	43
Figura 15 – Exemplo de RNA	46
Figura 16 – Módulos do SADECT	47
Figura 17 – SEP exemplo	48
Figura 18 – Modelo RNA CENTRAL para os ECT do SEP exemplo	55
Figura 19 – Modelo RNA ÚNICA para os ECT do SEP exemplo	56
Figura 20 – Modelo RNA DUPLA para os ECT do SEP exemplo	57
Figura 21 – SEP exemplo após a entrada de 20 MW de carga	59
Figura 22 – Interligação Sul/Sudeste	61
Figura 23 – Fluxograma da obtenção de dados de entrada do histórico	65
Figura 24 – Interligação Sul/Sudeste e ECTs do SADECT	70
Figura 25 – Todos os valores das tensões, normalizados, referentes aos eventos do agrupamento BR(1 e 2) da STIV	75
Figura 26 – Valores das tensões STIA 765 kV e ITAIPU 500 kV, normalizados, referentes aos eventos do BR(1 e 2) de STIV	76
Figura 27 – Todos os valores das tensões, normalizados de forma ajustada, referentes aos eventos do agrupamento BR(1 e 2) da STIV	77
Figura 28 – Valores encontrados na saídas Não manobrar da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL	83
Figura 29 – Valores normalizados da tensão STIV 765 kV – VT ordenados por saída da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL	84
Figura 30 - Valores normalizados de tensão ordenados por saída da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL	85

Lista de tabelas

Tabela 1 – Faixas de tensão para o SEP exemplo	24
Tabela 2 – Quantidade de artigos publicados utilizando técnicas de RNA entre os períodos de 1990-1996 e 2000-2005.	42
Tabela 3 – ECT e respectivas manobras	49
Tabela 4 – Dados de entradas para o BC	50
Tabela 5 – Valores máximos e mínimos das variáveis de entrada	52
Tabela 6 – Dados de entrada do exemplo da Tabela 4 transformados	52
Tabela 7 – ECTs e respectivos eventos	53
Tabela 8 – Eventos e Classes	54
Tabela 9 – Exemplos de saídas para o modelo RNA CENTRAL	59
Tabela 10 – Exemplos de saídas para o modelo RNA ÚNICA	60
Tabela 11 – Exemplos de saídas para o modelo RNA DUPLA	60
Tabela 12 – Variáveis de entrada do SADECT para o estudo de caso	64
Tabela 13 – Quantidade total de manobras por equipamento	66
Tabela 14 – Amostra das manobras do Tape STTP 765/500 kV	67
Tabela 15 – Amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	68
Tabela 16 - Tensões referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	68
Tabela 17 – Estado operativo dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	69
Tabela 18 - Quantidade total de eventos por equipamento	70
Tabela 19 – Agrupamento dos estados operativos dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	72
Tabela 20 – Valores máximos e mínimos para os agrupamento dos estados operativos dos equipamentos	72
Tabela 21 – Normalização dos valores dos agrupamento dos estados operativos dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	73
Tabela 22 – Valores máximos e mínimos para as tensões e hora	73
Tabela 23 - Valores normalizados para as tensões e hora da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	74
Tabela 24 – Valores normalizados para as tensões e hora da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	74
Tabela 25 – Novas variáveis de entrada do SADECT para o estudo de caso, após o pré-processamento dos dados de entrada	78
Tabela 26 – Eventos e Classes	79
Tabela 27 – Pré-processamento da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP	79

Tabela 28 – Eventos possíveis para a primeira RNA do modelo RNA CENTRAL	83
Tabela 29 – Classificação dos eventos possíveis para a primeira RNA do modelo RNA CENTRAL	83
Tabela 30 – Resultados dos testes da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL	83
Tabela 31 – Eventos possíveis para a RNA referente ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA ÚNICA	86
Tabela 32 – Classificação dos eventos possíveis para a RNA referente ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA ÚNICA	86
Tabela 33 - Testes da Rede Neural para o BR de STIV	87
Tabela 34 – Classificação dos eventos possíveis para as RNAs referentes ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA DUPLA	88
Tabela 35 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o BR(1 e 2) da STIV	89
Tabela 36 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o BC da STTP	89
Tabela 37 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o BR(5) da STTP	90
Tabela 38 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o T3 da STTP	90
Tabela 39 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o T2 da STTP	91
Tabela 40 - Resumo dos resultados dos testes das RNAs para o modelo RNA DUPLA	91
Tabela 41 – Resumo das RNAs do modelo RNA DUPLA	96