



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

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



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 tapers) 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 e2) 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

1 Introdução

1.1. Motivação

Desde os grandes motores industriais até os equipamentos eletrodomésticos, todos são projetados e construídos para funcionar dentro de certas faixas de tensão, fora das quais podem apresentar comportamento não satisfatório ou até mesmo se danificarem. Em virtude disso é imprescindível o estabelecimento dos níveis de tensão de energia elétrica a serem observados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica.

Tais níveis de tensão, regulamentados pela ANEEL [ANEEL, 1990], impõem a todos os setores relacionados à operação dos sistemas elétricos (planejamento / pré-operação, operação em tempo real e pós-operação) o atendimento de diversas regras, garantindo a realização adequada da operação.

Na fase de planejamento / pré-operação, são definidas as diretrizes e instruções de operação do sistema elétrico através dos estudos elétricos / energéticos, os quais utilizam casos de referência contendo dados passados ou previstos. Estes estudos têm como objetivo identificar possíveis problemas, como, por exemplo, carregamento em equipamentos acima do valor limite e sobre tensões, e corrigi-los para que não ocorram em tempo real. Caso tais problemas não possam ser sanados nesta fase, medidas operativas são informadas previamente para o setor de operação em tempo real, ficando este responsável em adotá-las.

A pós-operação existe para realimentar as demais fases, realizando análises e indicando falhas nos processos e possíveis soluções. Nesta fase, além dos cálculos dos índices de desempenho e qualidade do sistema elétrico, são apurados os desvios do que foi programado pelo planejamento / pré-operação em relação ao verificado em tempo real.

A fase de operação em tempo real é subsidiada pelas diretrizes da fase de planejamento / pré-operação e realimentada pela pós-operação. Além da importante função do restabelecimento do sistema elétrico após a ocorrência de falhas e desligamentos de linhas de transmissão do mesmo, a operação em tempo real é fundamental para o atendimento dos requisitos de qualidade, uma vez que os estudos elétricos são realizados utilizando-se dados aproximados, cabendo aos operadores, em tempo real, a realização dos ajustes necessários para garantir que o programado seja realizado. Tais ajustes ou controles são, dentro do possível, realizados de forma preventiva, evitando operar o sistema elétrico em condições extremas.

Um exemplo clássico do exposto no parágrafo anterior é a tarefa contínua do controle de tensão, sujeita às alterações da carga. Os casos de referência do planejamento procuram representar as condições mais severas de carga representadas pelos períodos de carga leve (período de menor demanda de energia elétrica, de 00h às 07h), de carga média (período de transição entre a carga leve e a pesada, de 07h às 17h e de 22h às 24h) e de carga pesada (período de maior demanda de energia elétrica, de 17h às 22h) [ONS, 2007]. Porém, além desses casos de referência utilizarem dados previstos e sofrerem atualizações quinzenais, não levam em consideração as alterações que ocorrem a todo o momento, observando apenas um ponto de operação (o mais severo) para cada um destes períodos. As alterações na carga, em tempo real, ocorrem continuamente, uma vez que esta é definida basicamente pelo comportamento das pessoas e pelos processos industriais.

Embora a carga varie continuamente, ela apresenta um comportamento cíclico, variando entre a condição de carga leve, passando por um período de carga média até alcançar a carga pesada. Após o término do período de carga pesada ocorrerá novamente um período de carga média, terminando o ciclo. Na Figura 1 é apresentada a curva de carga do Brasil em um dia útil.

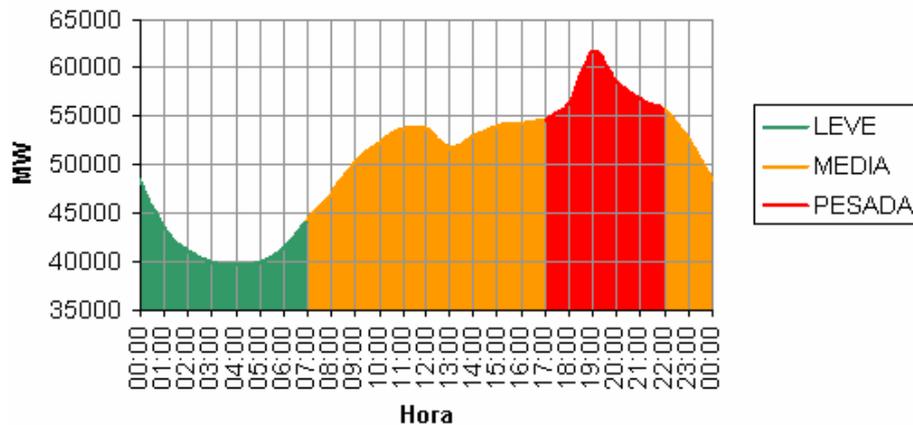


Figura 1 – Curva de carga no Brasil em um dia útil

O atendimento à carga do Brasil é realizado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), o Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro. Um SEP é formado por três componentes principais: Usinas, Sistema de Transmissão e Sistema de Distribuição [STEVENSON, 1975]

As Usinas, através de suas unidades geradoras, geram a energia elétrica demandada pela carga. Esta energia é entregue, com valores de tensões superiores a 138 kV, ao Sistema de Transmissão, composto por linhas de transmissão e subestações. As linhas de transmissão conectam as Usinas às subestações do Sistema de Transmissão e estas ao Sistema de Distribuição. No Sistema de Distribuição as tensões são reduzidas para valores inferiores a 138 kV nas suas subestações, de forma a atender o consumidor final.

As variações de carga causam a variação dos valores de tensão dos barramentos das subestações do SEP. O aumento da demanda de energia elétrica em um sistema elétrico causa a redução das tensões de seus barramentos e em caso contrário, a elevação. Para garantir a qualidade da tensão fornecida aos consumidores, os operadores de sistema elétrico agem nos equipamentos de controle de tensão (ECT) presentes nas subestações com o intuito de mantê-la e/ou retorná-la aos valores permitidos [ONS, 2007].

Atualmente o controle de tensão do SIN é realizado pelas equipes de operadores de tempo real dos Centros de Operação presentes neste Sistema Elétrico de Potência SEP. O operador realiza este controle com base em diversas informações, tais como:

- ✓ valores atuais e tendências das grandezas elétricas (na maioria das vezes tensões, em kV, e potências reativas, em *Mvar*);

- ✓ topologia do sistema (se o SEP apresenta condições diferentes do programado e quantos e quais equipamentos estão disponíveis para uso);
- ✓ período de carga (mínima / leve, média ou pesada);
- ✓ influências dos ECT (valor da variação do valor de tensão dos barramentos em virtude da manobra do ECT);
- ✓ diretrizes do planejamento / pré-operação;
- ✓ características de cada região ou subsistema do SEP de modo a realizar o controle de tensão de forma preventiva, uma vez que cargas de regiões próximas podem apresentar comportamentos distintos (uma região com comportamento predominantemente comercial - maior demanda no período de carga pesada - próxima a outra com característica industrial - maior demanda no período de carga mínima/leve), enquanto que regiões distantes podem apresentar cargas com comportamentos equivalentes;
- ✓ influências entre subsistemas (uma ação em um dado subsistema pode prejudicar ou contribuir na operação de outro); e
- ✓ suas experiências passadas.

Deste modo, o controle de tensão depende, fundamentalmente, da interpretação destes diversos dados por um especialista, o operador de tempo real. O tempo necessário para a formação de um operador é de um a dois anos; durante este período o operador em treinamento acompanha as ações de um operador mais experiente, aprendendo as diretrizes da operação em tempo real e as relações entre as influências das manobras dos ECT e as grandezas elétricas das diversas regiões e subsistemas do SIN. Alcançando a metade do período de treinamento o operador já está apto para atuar de forma supervisionada, sugerindo e realizando ações. Após esta última fase o operador já realiza o controle de tensão por si só.

Os operadores, para a realização do controle de tensão, não possuem um sistema que os auxilie no processo de decisão. A existência de tal sistema de apoio à decisão reduziria bastante o tempo de treinamento, além de contribuir com a redução do tempo de tomada de decisão, uma vez que este sugere ao operador como e quando realizar uma manobra para o controle de tensão.

Além de auxiliar os operadores, o sistema também pode ser usado em treinamentos de outras pessoas (técnicos ou engenheiros) que estejam ligadas ao assunto do controle de tensão.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de apoio à decisão que auxilie o operador de tempo real na determinação de como e onde agir durante a realização da tarefa contínua do controle de tensão. Este trabalho, motivado pela não linearidade das variáveis relacionadas ao problema, utiliza um sistema baseado na técnica de Redes Neurais Artificiais (RNA).

1.3. Descrição do Trabalho

Este trabalho foi realizado em cinco etapas principais: pesquisa bibliográfica; modelagem e desenvolvimento do sistema de apoio à decisão; obtenção de uma base de dados históricos; análise e pré-processamento da base de dados; testes e análise de desempenho. Essas etapas são descritas de forma resumida a seguir.

Pesquisa bibliográfica – nesta primeira etapa foi realizada a pesquisa de material bibliográfico ligado aos assuntos de controle de tensão em tempo real e à utilização de técnicas de inteligência computacional, como RNA e Lógica *Fuzzy*, em sistemas elétricos de potência.

Definição e desenvolvimento do modelo do sistema de apoio à decisão – De forma a determinar a melhor modelagem para o sistema de apoio à decisão, foram desenvolvidos três modelos diferentes, todos baseados em redes neurais, as quais indicam para o operador se algum ECT deverá ser manobrado ou não. Essas modelagens se diferenciam em função do uso de uma única rede ou de múltiplas redes neurais para cada um dos ECTs.

Definição e obtenção do banco de dados históricos – de forma a avaliar os modelos propostos de controle de tensão, os dados foram obtidos de um histórico real, evitando, assim, a utilização de dados simulados ou previstos. Nesta etapa foi criado o banco de dados históricos com as informações utilizadas pelos

operadores durante as ações de controle de tensão de uma área do SIN, eliminando-se os padrões com informações inválidas.

Pré-processamento dos dados – de posse do banco de dados, para utilização dos mesmos na RNA, os padrões de entrada foram normalizados entre 0 e 1 e associados à classe de saída correspondente (Ligar / Elevar, Desligar / Reduzir ou Não manobrar).

Testes e análises de desempenho – Nesta última etapa foram realizados testes para verificar o percentual de acerto de cada modelagem, com o objetivo de indicar a mais adequada ao procedimento de controle de tensão.

1.4. Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos adicionais, descritos a seguir.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte do controle de tensão, descrevendo de que forma um operador pode controlar a tensão em tempo real. Além disso, o capítulo apresenta um pequeno resumo sobre a utilização de técnicas inteligentes nos SEPs.

O Capítulo 3 apresenta o sistema de apoio à decisão ao controle de tensão (SADECT), descrevendo em detalhes as diferentes modelagens propostas neste trabalho.

O Capítulo 4 detalha a base de dados utilizada, o ambiente de teste, os resultados de cada modelo proposto e apresenta uma discussão final de todos os resultados obtidos.

Finalmente, o Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho e identifica possíveis trabalhos futuros.

2

Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência

Conforme apresentado no Capítulo 1, o controle de tensão do Sistema Interligado Nacional (SIN), o SEP brasileiro, é realizado pelos operadores de tempo real, com base em diversas informações, tais como: valores atuais e tendências das grandezas elétricas (na maioria das vezes tensões, em kV, e potências reativas, em *Mvar*); topologia do SIN, período de carga (mínima/leve, média ou pesada); e suas sensibilidades na atuação dos dispositivos de controle com base em suas experiências passadas.

As informações de valores das grandezas elétricas e de sua topologia são obtidas das diversas subestações do SIN e concentradas em um aplicativo computacional denominado Sistema de Supervisão e Controle (SSC). As informações de cada subestação percorrem grandes distâncias, em alguns casos milhares de quilômetros, das mais distintas formas: via fibra ótica, microondas, satélite, *carrier*, dentre outras, até chegarem ao centralizador referente ao SSC. Uma vez no SSC, as informações ficam disponíveis através de gráficos e diagramas aos operadores de tempo real em diversas telas, para que os mesmos possam utilizá-las de forma prática, viabilizando a tarefa do controle de tensão.

A tarefa do controle de tensão tem como principal objetivo impedir que as tensões dos barramentos sob sua responsabilidade ultrapassem valores limites não permitidos. Tais valores são definidos tanto pelas características dos equipamentos presentes no SEP quanto pelos estudos realizados no planejamento / pré-operação. Estes estudos informam as diretrizes para a operação indicando, para cada barramento, a faixa de tensão (valor inferior e superior de referência) que não pode ser ultrapassada, de forma a garantir uma tensão de qualidade para o consumidor final [ONS, 2007].

As faixas de tensão são definidas para cada período de carga (pesada, média ou leve / mínima), podendo apresentar valores iguais em períodos de carga diferentes.

Barramentos próximos aos centros de carga que apresentem valores altos de tensão, acima do limite superior da faixa, podem causar danos aos equipamentos dos consumidores e das subestações do SEP (pára-raios, disjuntores, transformadores, dentre outros). Tensões baixas também podem causar danos em motores, interromper processos industriais baseados em eletrônica de potência e levar a operação do sistema elétrico a uma região não segura, caso ocorra uma alteração no SEP (por exemplo, o desligamento de uma linha de transmissão ou a entrada de um grande bloco de carga).

A carga (Z) de um SEP possui duas componentes (equação (1)): a resistiva ou real (símbolo: R , unidade: Ω) e a reativa ou imaginária (símbolo: X , unidade: Ω). A reatância pode ser indutiva (X_L) ou capacitiva (X_C), conforme apresentado na equação (2).

$$Z = R + jX \quad (1)$$

$$X = X_L - X_C \quad (2)$$

A potência total fornecida às cargas de um SEP recebe o nome de Potência Aparente (símbolo: S , unidade: VA). Esta potência, assim como a carga, possui duas componentes: a ativa ou real (símbolo: P , unidade: W) e a reativa ou imaginária (símbolo: Q , unidade: var). A potência reativa pode estar sendo fornecida ou absorvida, dependendo, respectivamente, se a carga é predominantemente indutiva (Q_L) ou capacitiva (Q_C).

$$S = P + jQ \quad (3)$$

$$Q = Q_L - Q_C \quad (4)$$

Parte da potência aparente fornecida pelo SEP será transformada em trabalho pela resistência e parte será armazenada, não realizando trabalho, em virtude da reatância. A potência pode ser representada através do triângulo de potência (Figura 2), constituído pelas três potências S , P e Q .

Nota-se que o cosseno do ângulo φ é uma relação entre a potência ativa e a potência aparente; por essa razão ele é um parâmetro denominado fator de potência (fp). Quando o fp é unitário indica que a carga é puramente resistiva.

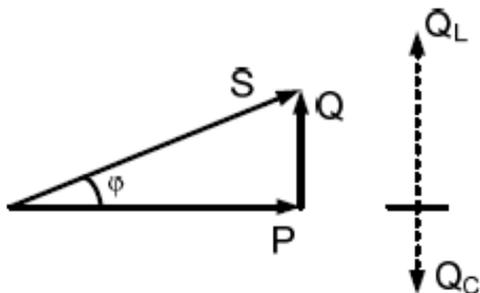


Figura 2 – Triângulo de potências

Uma carga resistiva funciona como um dissipador de energia, utilizando toda a potência ativa fornecida pelas unidades geradoras do SEP. As cargas indutivas absorvem potência reativa e armazenam energia sob a forma de campo eletromagnético, como é o caso de reatores (indutores) e motores. As cargas capacitivas, por sua vez, fornecem potência reativa ao SEP e armazenam energia sob a forma de campo elétrico, como é o caso de condensadores e filtros.

Os níveis de tensão dependem grandemente do fluxo de potência reativa do sistema elétrico. Quando há deficiência de potência reativa, o nível de tensão cai; inversamente, quando há excesso de potência reativa o nível de tensão sobe. Portanto, controlam-se os níveis de tensão em um sistema elétrico controlando-se a geração, a absorção e o fluxo de potência reativa no sistema.

Praticamente todas as cargas possuem, em sua composição, uma grande parte indutiva e, portanto, absorvem potência reativa (*var*). Reatores em paralelo também absorvem *var*, ao passo que capacitores em paralelo geram *var*. Os cabos condutores das linhas de transmissão também geram *var*, em virtude da alta capacitância entre estes e o solo. Além de reatores, capacitores e cabos condutores, também é possível controlar os fluxos de *var*, e, conseqüentemente, os níveis de tensão, ajustando-se a excitação das unidades geradoras e compensadores síncronos, ou alterando-se os tapes dos transformadores.

Portanto, para efetuar o controle de tensão os operadores atuam nos diversos recursos, ou equipamentos de controle de tensão (ECT), presentes no SEP

(capacitores e reatores em paralelo, potência reativa de compensadores síncronos, compensadores estáticos e unidades geradores e tapes de transformadores). A decisão de quando e em qual ECT atuar depende, principalmente, das influências destes ECT nos valores de tensão dos diversos barramentos do SEP.

A manobra para o controle de tensão pode ser realizada localmente (na subestação onde está instalado o ECT) ou remotamente (em local distante à subestação através do envio de telecomando).

A alteração da tensão de um barramento pode resultar em violações em outros barramentos. Desta forma, embora os conceitos fundamentais de controle de tensão sejam simples, sua implementação prática em sistemas de potência é bastante complexa. Isto por que:

- ✓ Os ECT são localizados, ou seja, são instalados em locais definidos pelos estudos de planejamento / pré-operação, e, desta forma, os mesmos não podem ser retirados para a realização do controle de tensão em outra localidade do SEP; e
- ✓ Os ECT são independentes, não existindo nenhum tipo de controle ou automatismo entre os mesmos.

Uma vez que as cargas e, portanto, os fluxos de *var* e as tensões mudam continuamente, as medidas ou manobras de controle de tensão devem também ser tomadas continuamente.

A seguir apresenta-se como os ECTs (geradores, tapes de transformadores, banco de capacitores, etc.) podem ser utilizados durante o controle de tensão, além das restrições existentes na sua utilização [ELETROBRAS, 1990].

2.1. Controle de Tensão Mediante Ajuste da Excitação das Unidades Geradoras

A tensão nos terminais de uma unidade geradora geralmente é controlada por um regulador automático que induz mudanças na corrente de excitação do gerador, de modo a manter a tensão a níveis constantes preestabelecidos. Quando a tensão cai abaixo do ponto de ajuste, a corrente de excitação aumenta. Com isto, o gerador passa a suprir mais potência reativa (maior valor de *var*), mas a produção de potência ativa (*W*) não se altera significativamente. Quando a tensão

nos terminais ultrapassa o ponto de ajuste, o regulador reduz a corrente de excitação, o que faz com que a geração de *var* também diminua. Se a corrente de excitação for suficientemente reduzida, o gerador passará a absorver *var*.

Conforme mencionado na seção anterior, nos sistemas elétricos as tensões são controladas pela quantidade de *var* suprida ou absorvida. Os pontos de ajuste dos reguladores de tensão podem ser alterados de modo a controlar a produção de *var* do gerador. Isto, porém, deve ser feito com cuidado porque, caso se reduza demais a excitação da unidade geradora (ou seja, se ocorrer subexcitação), a unidade pode tornar-se instável. Por outro lado, caso essa corrente aumente demais, a unidade geradora pode ficar sobre excitada, provocando um possível superaquecimento do rotor.

A Figura 3 mostra um SEP exemplo que possui três unidades geradoras idênticas, cada uma delas suprindo 50 MW e absorvendo 20 Mvar ligadas a um sistema de transmissão para atendimento de uma carga de 80 MW e 10 Mvar conectada ao barramento F.

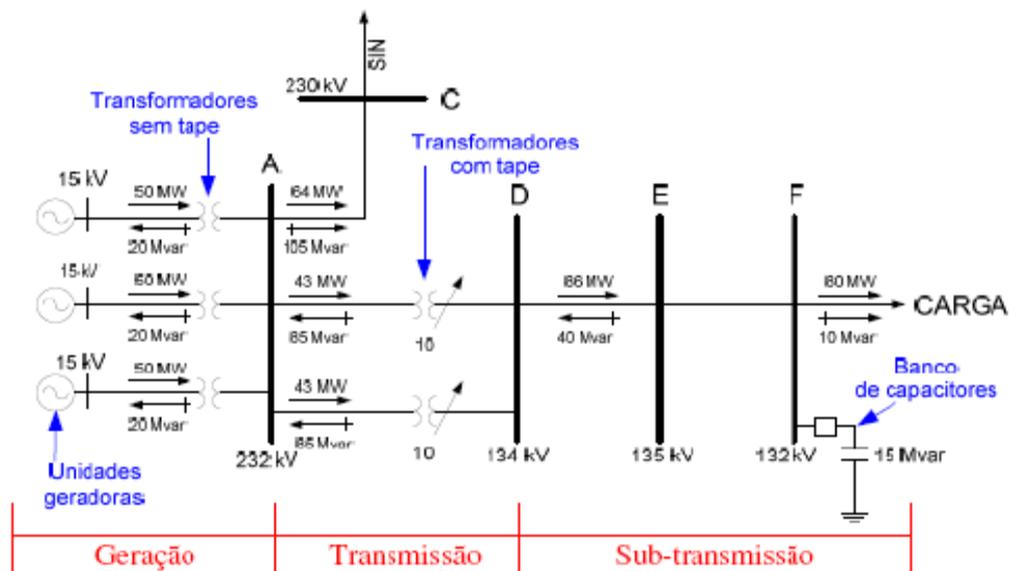


Figura 3 – SEP exemplo

As unidades geradoras possuem tensão nominal de 15 kV, os barramentos A e C 230 kV e os demais 138 kV. Cada unidade geradora possui um transformador elevador de 15 kV para 230 kV e existem dois transformadores abaixadores de 230 kV para 138 kV entre os barramentos A e D. Estes dois últimos

transformadores possuem seus tapes na posição dez (10), podendo variar de zero a dezesseis (0-16). Existe disponível para ser inserido ou ligado no barramento F um banco de capacitores de 15 Mvar. O quadrado (símbolo de um disjuntor) compreendido entre o banco de capacitores e o barramento F indica se o mesmo está ligado (quadrado preenchido em preto) ou desligado (quadrado não preenchido).

As linhas contínuas que conectam os barramentos representam linhas de transmissão. Os barramentos de 138 kV e as linhas de transmissão que os conectam constituem um sistema radial, uma vez que entre o barramento D e a carga, no barramento F, não existe uma linha de transmissão que os conecte ao SIN.

As setas horizontais marcadas com um traço vertical indicam o fluxo de *var* que entra no gerador, o que significa que a unidade está absorvendo *var* (fator de potência em avanço). Se o fluxo de *var* tivesse a direção oposta, isso indicaria que a unidade fornece *var* (fator de potência em atraso). A figura também mostra que está sendo entregue ao SIN o total de 64 MW e 105 Mvar.

Na Tabela 1 são indicadas faixas de tensão em cada período de carga para o SEP exemplo. Será considerado que o sistema está na carga leve (em negrito).

Suponha que o operador queira elevar em 4 kV a tensão do barramento de 230 kV da usina (terminal de alta), elevando-a de 232 kV para 236 kV. Para tal, ele eleva o ponto de ajuste do regulador de tensão das três unidades geradoras e, conseqüentemente, eleva a injeção de *Mvar*. Ao fazer isto, a situação passa a ser aquela mostrada na Figura 4. Nota-se que a produção de *MW* não se altera, mas as unidades geradoras passam a fornecer *var* e todas as tensões do SEP se elevam.

Tabela 1 – Faixas de tensão para o SEP exemplo

Tensão nominal (kV)	Leve / Mínima (kV)	Média (kV)	Pesada (kV)
15	14,2 - 15,7	14,7 - 15,6	14,7 - 15,4
138	131,1 - 144,9	135,2 - 143,5	135,2 - 142,1
230	218,5 - 241,5	225,4 - 239,2	225,4 - 239,2

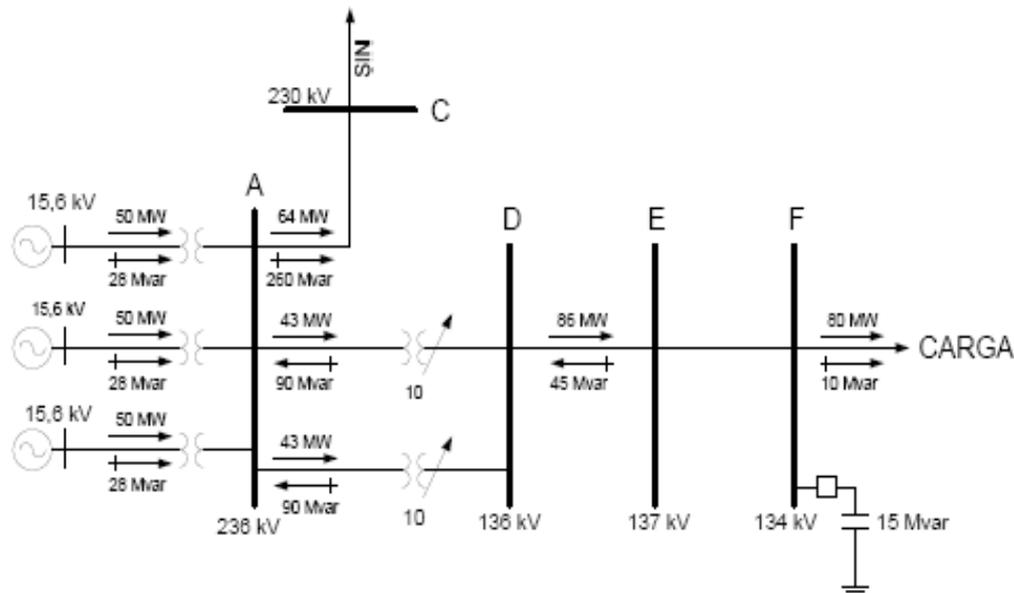


Figura 4 – Controle de tensão pelas unidades geradoras

Caso o desejado fosse a redução da tensão, o inverso deveria ser realizado, reduzindo-se o ponto de ajuste do regulador de tensão e, por conseqüência, a corrente de excitação dos geradores.

Quando existem vários geradores em uma só usina, como no caso da Figura 4, a tensão nos terminais e o nível de excitação de cada um deles devem ser controlados simultaneamente. Se somente um gerador for alterado, os controles automáticos dos outros tentarão compensar a diferença (até os limites de potência reativa de cada um) para manter a tensão da barra da estação no ponto de ajuste, causando um desequilíbrio de *var* entre as unidades geradoras. Na Figura 5 é possível notar que duas unidades geradoras permanecem absorvendo *var*, enquanto a que foi alterada passa a fornecer *var*, causando o mencionado desequilíbrio.

As tensões dos barramentos das usinas também podem sofrer alteração em virtude de alguma mudança no SEP, como, por exemplo, uma alteração de carga. Desta forma o operador deve estar sempre atento, impedindo a operação destas tensões em valores não permitidos.

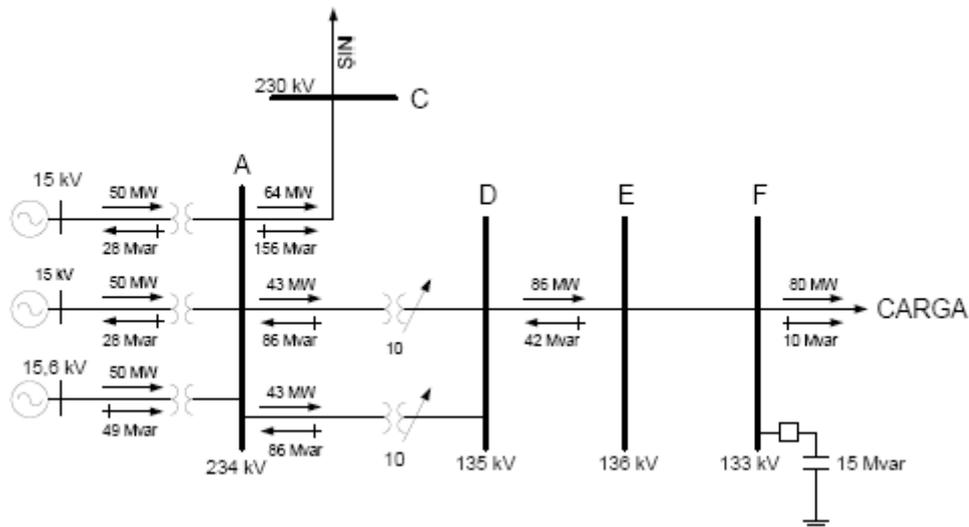


Figura 5 – Desequilíbrio de potência reativa entre unidades geradoras

No SIN o principal suporte de *var* vem das usinas. O modelo brasileiro é basicamente hidroelétrico, fazendo com que a maioria das usinas esteja: longe da carga (centenas de quilômetros) e presentes no Sistema de Transmissão (em 230, 345, 440, 500 e 765 kV), conforme apresentado no Capítulo 1. A alteração de alguns kV na tensão do barramento de alta das usinas acarreta uma alteração de tensão em diversos outros barramentos. Assim, as tensões das usinas são utilizadas para o controle de tensão do Sistema de Transmissão, o que é fundamental para a manutenção das tensões das usinas dentro das faixas. Esse tipo de controle com geradores é, portanto, chamado de “ajuste grosso”.

Já os bancos de capacitores e de reatores em paralelo ou tapes de transformadores estão, em sua maioria, localizados próximos aos barramentos de carga, sendo utilizados na tarefa de “ajuste fino” do controle de tensão, conforme descrito nas seções a seguir.

2.2. Controle de Tensão por Tapes de Transformadores

É possível controlar as tensões de um sistema elétrico mudando-se os tapes dos transformadores. Quase todos os transformadores possuem tapes no enrolamento de alta ou de baixa tensão e, às vezes, em ambos os enrolamentos. Trocando-se os tapes, altera-se o número de espiras no lado de alta ou de baixa e, com isto, o valor da tensão também é alterado.

A troca de tapes pode ser feita com o transformador desligado ou quando o mesmo está conectado ao SEP. Neste último caso, diz-se que o transformador tem "comutação sob carga". A troca de tapes sob carga pode ser feita manualmente ou eletro manualmente pelo operador, ou ainda de forma automática, quando o transformador for dotado de relé regulador de tensão capaz de trocar os tapes automaticamente. A mudança de tapes altera os fluxos de *var* do sistema, podendo, em alguns casos, causar uma mudança de produção ou absorção de *var* nas unidades geradoras.

Quando se supre potência a partir de uma rede de alta tensão para uma rede de distribuição de tensão mais baixa, a posição dos tapes dos transformadores pode ser alterada de modo a controlar a tensão no lado de baixa. Este tipo de controle de tensão é frequentemente necessário durante o dia, à medida que ocorrem mudanças na carga.

Embora na maioria dos casos os tapes dos transformadores sejam utilizados para controlar o valor da tensão no lado de baixa, estes também podem ser utilizados no controle do valor de tensão do lado de alta.

Suponha que dois transformadores idênticos estejam ligados em paralelo, como na Figura 4, e que ambos estejam com seus tapes na posição dez (10). Suponha também que o despachante tente aumentar em 4 kV a tensão no lado de baixa, ajustando-se os tapes dos transformadores.

Sabendo que as tensões das unidades geradoras já estão próximas ao máximo permitido, o operador de tempo real, conhecedor da influência da alteração destes tapes no valor da tensão do lado de baixa tensão, decide que para a realização de tal elevação devem ser elevados três tapes, indo para a posição treze (13). A Figura 6 mostra os fluxos e tensões resultantes.

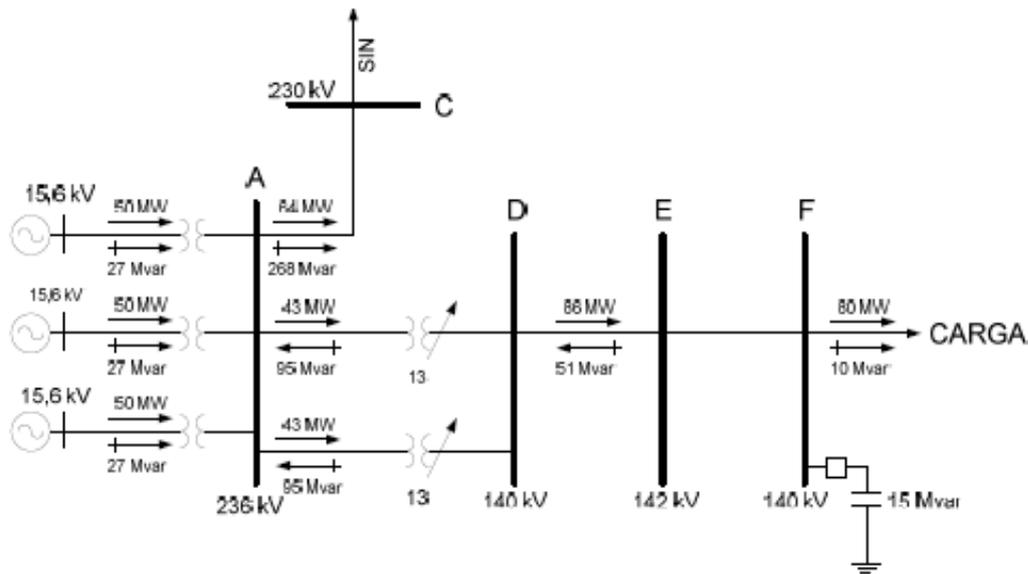


Figura 6 – Controle de tensão pelos tapes de transformadores

Observa-se que a quantidade de MW que flui em cada transformador não mudou e que todas as tensões dos barramentos cujo valor nominal é 138 kV elevaram. Em SEPs mais interligados, diferentemente do SEP radial do exemplo, a alteração dos tapes para a elevação da tensão do lado de baixa (menor tensão) pode acarretar na redução da tensão do lado de alta, e vice-versa. O operador deve estar atento a esta condição, impedindo que os barramentos apresentem valores de tensão não permitidos.

Quando uma subestação tem dois ou mais transformadores operando em paralelo, deve-se ter o cuidado em ajustar os tapes de todos os transformadores para o mesmo valor, e não somente de um. Um ajuste desigual dos tapes de transformadores que operam em paralelo provoca uma distribuição desigual do fluxo de var (Figura 7). Não se deve permitir que esta situação perdure indefinidamente, uma vez que gera fluxo desnecessário de var entre os transformadores, além da possibilidade do transformador com maior fluxo de var apresentar violação do seu limite de MVA (sobrecarga). O despachante pode igualar novamente o fluxo de var nos transformadores igualando a posição dos tapes (ou seja, ajustando também o tape do outro transformador para aumentar a tensão em 4 kV). Após o ajuste a condição volta à normalidade (Figura 6).

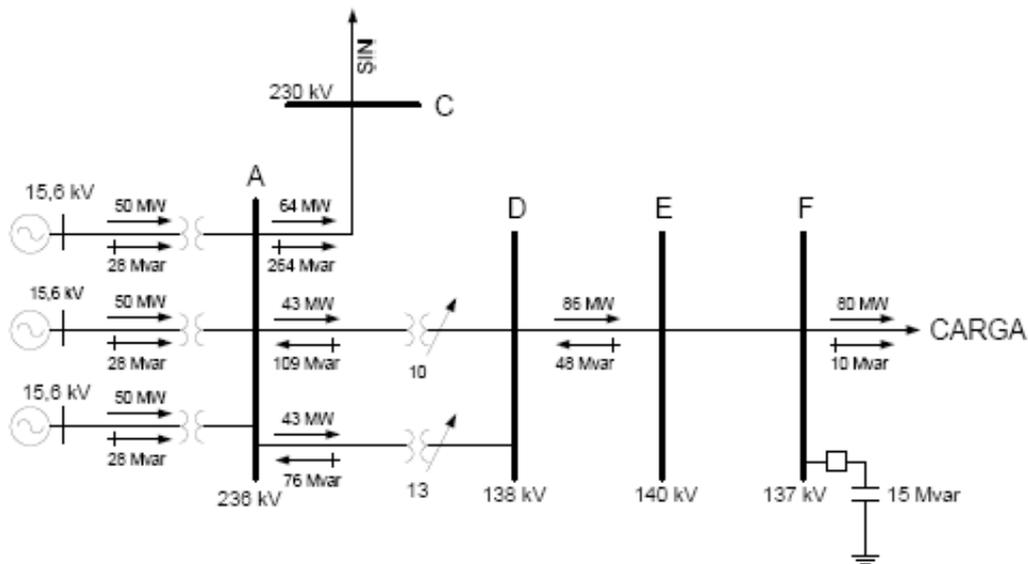


Figura 7 – Desequilíbrio de potência reativa entre os transformadores

Quando se tem transformadores diferentes ligados em paralelo (por exemplo, transformadores de tamanhos diferentes ou com métodos de refrigeração diferentes), pode ocorrer substancial diferença de fluxo de *var*. Em tais casos, pode ser conveniente e necessário adotar ajustes desiguais de tapas a fim de igualar os fluxos.

Como pôde ser visto, as tensões dos barramentos, principalmente dos barramentos de carga, podem ser controladas através dos tapas dos transformadores. Porém também foi descrito que a alteração do valor do tapa, na maioria dos casos, causa alterações tanto das tensões do lado de baixa quanto do lado de alta tensão. Tal alteração pode levar a tensão do lado de alta para valores fora das faixas pré-estabelecidas. Desta forma, a utilização desse tipo de ECT pode ser combinada com bancos de capacitores e de reatores em paralelo (ou *shunt*), conforme a seguir.

2.3.

Controle de Tensão por Banco de Capacitores e de Reatores em Paralelo

Foram apresentados até agora dois métodos básicos de controlar as tensões de um sistema elétrico. O primeiro, através do controle da geração ou absorção de *var* pelas unidades geradoras, ajustando-se o regulador de tensão (isto é, a

corrente de campo), e o segundo através da mudança do ajuste dos tapes dos transformadores de modo a elevar ou rebaixar as tensões e alterar os fluxos de *var* em uma rede.

Outros equipamentos no sistema elétrico podem ser utilizados para controlar tensões. Bancos de capacitores ligados em paralelo ao sistema geram *var* e elevam as tensões. Reatores ligados em paralelo absorvem *var* e reduzem as tensões. Tais ECTs são tidos como paralelos (ou shunt), pois os mesmos possuem uma extremidade conectada ao SEP e outra aterrada.

Em todo sistema de transmissão e distribuição existem diferentes problemas de controle de tensão. Alguns se devem a quedas (ou elevações) de tensão ao longo de um circuito em virtude de mudanças nos fluxos de *var* em condições de carga constante, ao passo que outros são mais complexos devido a variações de tensão decorrente de mudança de carga.

Um exemplo destes tipos de problema ocorre freqüentemente em sistemas de transmissão ou distribuição radiais. A Figura 8 mostra o sistema radial em 138 kV do SEP exemplo, após entrada de 20 MW de carga adicionais (totalizando 100 MW de carga). A entrada deste bloco adicional de carga causa a redução das tensões de todos os barramentos do sistema radial, levando a tensão do barramento F para valores próximos ao limite inferior (Tabela 1). As tensões do lado de alta não sofreram alteração em virtude da atuação automática dos reguladores de tensão das unidades geradoras. Tal atuação pode ser observada pela elevação do valor de *var* das mesmas (de 28 para 30 Mvar).

Uma possibilidade para elevar os valores de tensão do lado de baixa seria a elevação da posição dos tapes dos transformadores, porém estes tapes já estão na posição treze (13), e os três restantes (16 é a posição máxima) não solucionariam o problema. A próxima solução possível seria a elevação das tensões das unidades geradoras, porém, como visto no item anterior, as mesmas já estão com tensão próxima ao limite superior.

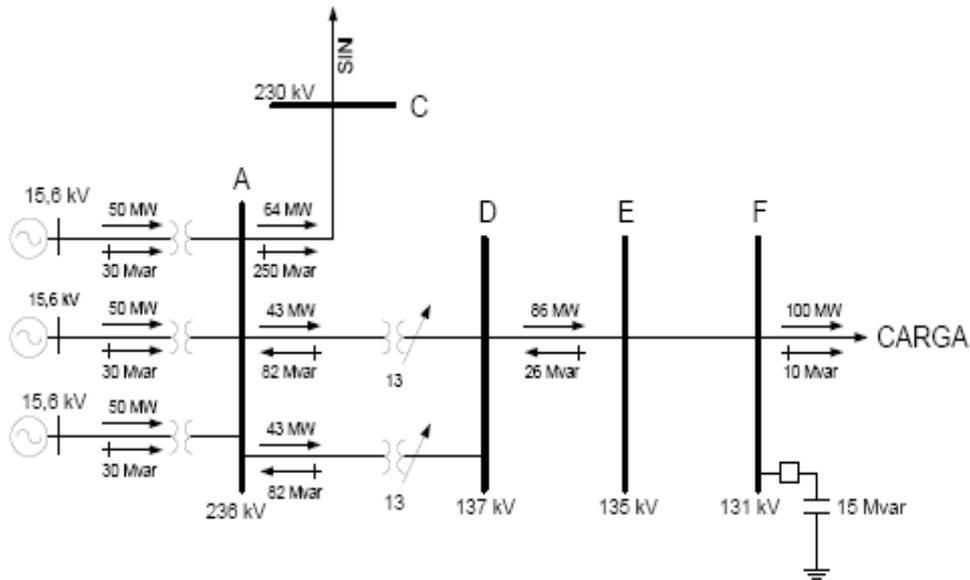


Figura 8 – Entrada de 20 MW de carga no barramento F

Não dispondo de outra alternativa, a manobra realizada será a de ligar o banco de capacitores presente no barramento F. Como esperado, após a manobra as tensões do sistema radial elevaram-se (Figura 9).

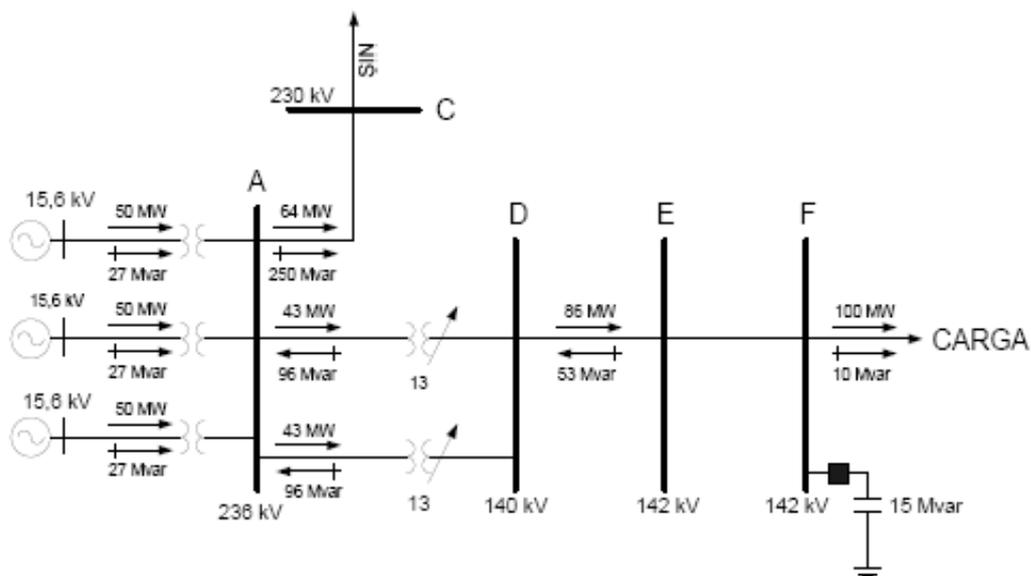


Figura 9 – Manobra para ligar o banco de capacitores de 15 Mvar

Dependendo de onde estão instalados, os bancos de capacitores ou de reatores em paralelo também podem ser utilizados para o “ajuste grosso”, elevando ou reduzindo, como visto com as unidades geradoras, as tensões de todo um tronco de transmissão. Neste caso, os bancos de capacitores possuem valores de potência reativa maiores que os conectados aos barramentos de carga.

Se existisse um banco de capacitores instalado no barramento A do SEP exemplo e este fosse ligado, todas as tensões do SEP se elevariam (exceto das barras controladas automaticamente pelas unidades geradoras) e as unidades geradoras reduziriam o fornecimento de *var*. Para o banco de reatores o inverso ocorreria: as tensões seriam reduzidas e as unidades geradoras passariam a fornecer mais *var*. Este tipo de ação é muito utilizado quando se deseja que unidades geradoras e compensadores síncronos operem com *var* próximo de zero, pois estes bancos de capacitores ou de reatores passam a fornecer ou absorver, respectivamente, os *var* fornecidos ou absorvidos pelas unidades geradoras ou compensadores síncronos, criando margem para seus reguladores automáticos de tensão acompanharem a entrada de carga ou atuarem em casos de ocorrências no SEP.

Além do que já foi apresentado, outro aspecto importante é o controle dos valores das tensões dos terminais de longas linhas de transmissão.

2.4.

Controle de Tensão dos Terminais de Longas Linhas de Transmissão

Em Sistemas de Transmissão, com tensões nominais de 138 kV ou acima, que exigem linhas mais longas, os operadores podem encontrar valores altos de tensão quando se abre uma das extremidades de uma linha longa e a outra extremidade permanece energizada. O problema se deve ao "Efeito Ferranti" [ELETROBRAS, 1990] e é provocado pelos *var* gerados ao longo da linha pela capacitância natural do circuito. Uma linha de 150 quilômetros de comprimento gera uma quantidade substancial de *Mvar*. Quando o circuito está carregado, esses *var* são absorvidos pelas perdas de *var* ao longo da linha e na carga.

Quando o circuito está levemente carregado, ou aberto em uma das extremidades, esses *var* não são absorvidos e podem causar tensão inaceitavelmente alta na extremidade aberta. Em uma linha aberta, a proporção

entre a tensão no lado receptor (E_r) e a tensão no lado transmissor (E_t) varia em função do comprimento da linha, como mostra a Figura 10.

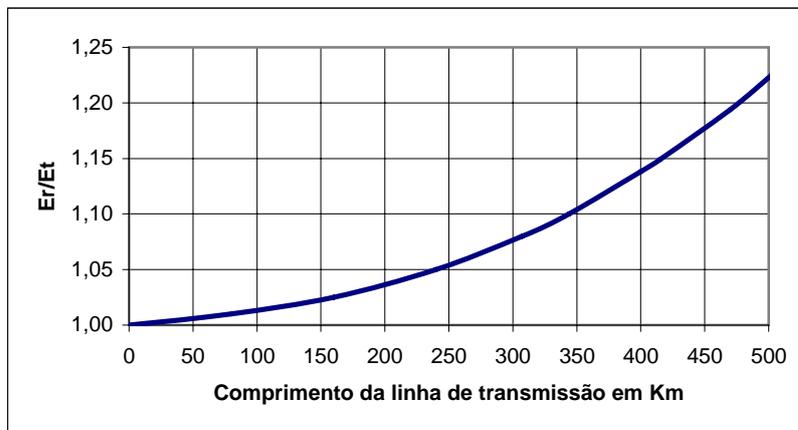


Figura 10 – Elevação da tensão por “Efeito Ferranti”

O equipamento ligado a uma longa linha de transmissão levemente carregada ou aberta em uma extremidade pode não ter sido projetado para suportar, durante muito tempo, as tensões máximas indicadas na referida figura. No caso de linhas de mais de 150 quilômetros de comprimento, deve haver algum meio de absorver os *var* gerados pela corrente capacitiva da linha. Neste caso, instalam-se reatores em paralelo nos terminais do circuito para absorver esses *var*. Em alguns casos, reatores em paralelo podem ser automaticamente ligados à linha sempre que um disjuntor se abre. Em outros casos, esses reatores em paralelo podem permanecer ligados permanentemente em ambas as extremidades da linha.

Quando um circuito de transmissão está com seu carregamento elevado, bancos de capacitores em paralelo podem ser instalados na subestação próxima à carga, a fim de gerar *Mvar* adicionais destinados a manter o valor da tensão dentro dos limites. No caso de linhas de transmissão fortemente carregadas, a queda de tensão ao longo da linha pode ser excessiva (como no exemplo do circuito radial que vimos anteriormente). Na maioria dos casos, esses bancos de capacitores são ligados e desligados de modo a suprir as diferentes necessidades de *var* exigidas pelos diferentes valores de carga e condições do sistema.

Em virtude da natureza variável da carga, torna-se necessário, às vezes, suprir *var* e absorver *var* no mesmo local, porém, em horários diferentes. As duas funções podem ser exercidas por uma combinação de bancos de capacitores e

reatores, dotada de mecanismos de manobra e controle. Costuma-se dar a essa combinação o nome de compensador estático. Quando a tensão é baixa, o compensador estático supre *var*, quando a tensão é alta ele absorve *var*.

Certas empresas instalam compensadores síncronos como meio auxiliar de controle de tensão. Trata-se de grandes máquinas elétricas rotativas, construídas como um gerador, mas operadas como um motor (isto é, sem acionamento por turbina). Os compensadores síncronos não geram *W*. Controlando-se a corrente de excitação, pode-se fazer com que eles gerem ou absorvam *var*. Quando a tensão no sistema é baixa, a corrente de campo do compensador é aumentada, de modo a gerar *var*. Em períodos de tensões elevadas no sistema, reduz-se a excitação do compensador síncrono para que a unidade passe a absorver *var*.

Pode-se, então, resumir as técnicas de controle de tensão apresentadas como se segue:

- ✓ Para realizar a tarefa de controle de tensão os operadores de tempo real utilizam diversos ECT;
- ✓ O operador de tempo real deve observar todas as variáveis relacionadas ao controle de tensão, atuando nos ECT de forma que as tensões nos barramentos de sua responsabilidade não operem fora das faixas;
- ✓ É possível controlar as tensões de um SEP gerando-se *var*, absorvendo-se *var* ou redistribuindo-se o fluxo de *var* no sistema;
- ✓ Unidades geradoras de usina e compensadores síncronos podem gerar e absorver *var*, dependendo do nível de excitação da unidade;
- ✓ Bancos de capacitores em paralelo geram *var* e reatores em paralelo absorvem *var*;
- ✓ Mudando-se os tapes dos transformadores, alteram-se as condições locais de tensão e, portanto, altera-se o fluxo de *var* no sistema. A mudança de tapes não afeta o fluxo de *MW*;
- ✓ As unidades geradoras das usinas são principalmente utilizadas para efetuar o “ajuste grosso” durante controle de tensão, elevando ou reduzindo as tensões dos barramentos de um subsistema; por outro lado, na maioria das vezes os bancos de capacitores, reatores e tapes de transformadores são utilizados para o controle local da tensão, ou seja, efetuam o “ajuste fino”.

A próxima seção apresenta um exemplo real de como são realizadas ações de controle de tensão em um barramento de carga.

2.5. Exemplo Real de Controle de Tensão

Na Figura 11 é apresentado um exemplo real de controle de tensão. O gráfico representa os valores e a faixa de tensão do barramento de 138 kV da estação de Jacarepaguá, uma das barras do SIN e de propriedade de Furnas Centrais Elétricas S.A., em um dia útil. Nesta estação estão conectados os principais circuitos que alimentam os consumidores da LIGHT nas proximidades do bairro de Jacarepaguá.

É possível notar às 07h a transição de faixa do período de carga leve para o período de carga média, assim como a elevação do valor da tensão neste horário. É importante ressaltar que para este barramento as faixas para os períodos de carga média e pesada são iguais.

Essa elevação de tensão foi realizada pelos operadores de tempo real que, utilizando os ECTs disponíveis (tapes e bancos de capacitores), alteraram o valor da tensão deste barramento.

Tensão da Estação Jacarepaguá 138 kV

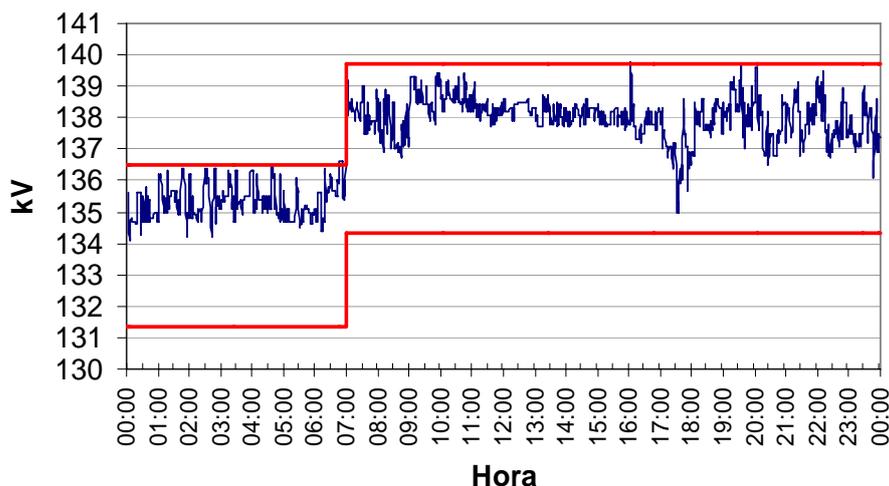


Figura 11 – Mudança de período de carga

A Figura 12 apresenta o detalhamento da Figura 11 entre os horários de 17h e 19h, mostrando uma parte do período de carga pesada. Nesta figura verifica-se que, às 17h30min, o valor de tensão foi reduzido com a entrada de carga no período de carga pesada.



Figura 12 – Correção da tensão no período de carga pesada

Com a entrada de carga e a aproximação do valor da tensão para o seu limite inferior, ações são tomadas para a elevação do seu valor, tendo como medida principal a inserção de um banco de capacitores em paralelo desta estação às 17h42min. Nota-se também que, após a inserção do banco de capacitores, o valor da tensão permanece reduzindo (após 17h43min), indicando que se a manobra não tivesse sido realizada a tensão ultrapassaria seu limite inferior, acarretando em tensões baixas para os consumidores.

Embora a manobra para a elevação da tensão tenha sido realizada na própria subestação, também deve ser considerado, no processo de decisão, o valor das tensões das outras subestações e a influência dos demais equipamentos deste sistema. Este processo procura otimizar a quantidade de manobras, evitando excessos, esgotamento dos recursos ou até manobras conflitantes, como por exemplo, ligar um banco de capacitores em uma subestação e ligar um banco de reatores em uma subestação vizinha.

Deste modo, o controle depende, fundamentalmente, da interpretação destas diversas informações pelo operador que, embora o faça impedindo as

violações, nem sempre resulta na otimização das manobras e dos recursos. Esta falta de otimização ocorre em virtude de vários aspectos:

- a) o operador de tempo real não possui uma ferramenta para a otimização de tais recursos;
- b) algumas ações de controle de tensão são realizadas de forma diferente, dependendo do operador que está realizando a tarefa no momento;
- c) ECTs de um dado subsistema, com influência em outro(s) subsistema(s), podem ser manobrados sem o conhecimento dos operadores deste(s) outro(s) subsistema(s), tornando a operação de ambos os SEP não ótima.

O controle de tensão é um assunto muito estudado, pois está diretamente ligado à qualidade, confiabilidade e custo da energia fornecida aos consumidores. O custo da energia está tomando ainda maior importância com a reestruturação dos setores elétricos, pois empresas (ou agentes) estão sendo remuneradas quando a potência reativa de suas unidades geradoras é utilizada para atendimento ao controle de tensão do SEP. Este uso gera um encargo identificado como *serviço ancilar*. Tal encargo é pago por todos os consumidores em suas “contas de luz” e a falta de otimização durante o controle de tensão pode aumentar o seu valor.

Muitas táticas foram pensadas para que o controle de tensão fosse realizado de forma otimizada. Buscando esta condição ótima, em alguns países da Europa o controle de tensão já é realizado de forma coordenada.

2.6. Controle Coordenado de Tensão

Como dito anteriormente, o controle de tensão é realizado tradicionalmente de forma “manual”. Entretanto, motivados pelas reestruturações das regras do setor elétrico em todo o mundo, os responsáveis pela operação dos SEP estão buscando sua evolução de forma a adaptar-se a este “novo mundo” [TARANTO, 2002].

A coordenação ocorre em três níveis hierárquicos: primário, secundário e terciário. Além de coordenado, este controle também é realizado utilizando dados de tempo real e de forma descentralizada, uma vez que o sistema elétrico em questão é dividido em subáreas; cada área possui seus controles primário e secundário, ficando para o terciário a responsabilidade de realizar a coordenação entre as subáreas. A seguir são explicados cada um dos níveis de hierarquia citados.

O controle primário de tensão, em inglês *Primary Voltage Control (PVC)*, atua com a resolução temporal de segundos e é realizado pelos controladores automáticos de tensão presentes nas unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos. Cada controlador é responsável por manter a tensão de um barramento de uma subárea do SEP em um valor pré-determinado. Este nível de controle compensa as rápidas variações que ocorrem nestas tensões.

O controle secundário de tensão, em inglês *Secondary Voltage Control (SVC)*, atua com a resolução temporal de minutos e realimenta os *PVC* de sua subárea, atualizando os valores de referência de tensão dos barramentos e atuando nos equipamento de resposta mais lenta, como tapes de transformadores. Este nível de controle tem como objetivo o controle da tensão de barramentos “piloto” previamente definidos, além de otimizar a potência reativa das unidades geradoras. Este nível de controle também compensa as variações de tensão mais lentas.

O controle terciário de tensão, em inglês *Tertiary Voltage Control (TVC)*, é o último nível na hierarquia e realimenta os *SVC* de todas as subáreas, assegurando que o controle está sendo realizado de forma segura e econômica, garantindo a otimização do controle de tensão. O *TVC* executa um fluxo de potência ótimo a cada quinze minutos ou por solicitação do operador (após a ocorrência de uma alteração do SEP).

A Figura 13 [TARANTO, 2002] apresenta um modelo do controle coordenado de tensão. Nesta figura V_p representa o valor da tensão do barramento (ou barra) “piloto”; $V_p Opt$ é o valor ótimo calculado pelo *TVC* para o V_p ; V_{ref} é o valor de referência de tensão das unidades geradoras fornecido ao *PVC* pelo *SVC* para que V_p seja igual à $V_p Opt$; V_t é o valor de tensão do barramento terminal das unidades geradoras e E_{fd} é o valor de tensão fornecida pelo *PVC* às unidade geradoras para que V_t seja igual a V_{ref} .

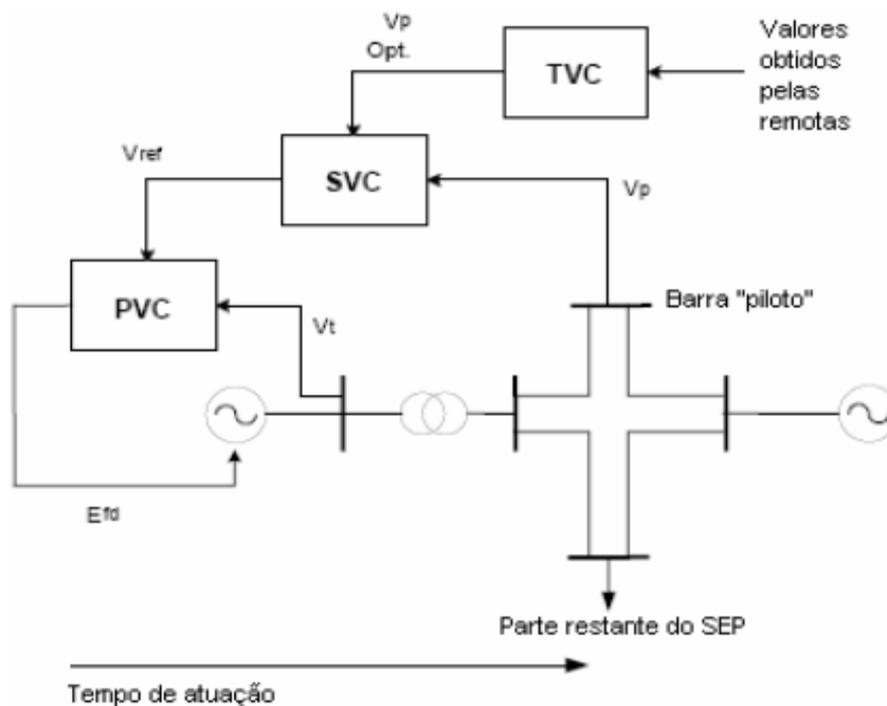


Figura 13 – Modelo do controle coordenado de tensão

Na Itália e na França já se realiza este controle de forma automática e coordenada [TARANTO, 2002]. Na Bélgica [HECKE, 2000] e Espanha o controle de forma coordenada ainda não foi totalmente estabelecido, porém técnicas para o TVC já foram estudadas e aplicadas como ferramentas de auxílio à decisão.

Recentemente, soluções para o problema de controle de tensão de SEP também vêm sendo encontradas utilizando-se técnicas de inteligência computacional. Um SVC baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA) [HAYKIN, 1999] para unidades geradoras é sugerido em [GUBINA, 1999]. O SVC do artigo em questão foi utilizado no SEP fictício de testes IEEE 30. O SEP em questão possui 30 barras, sendo 20 barras de carga e 10 de geração. O autor utilizou a topologia *Multi-Layer Perceptron* com treinamento *Back-propagation* e uma camada intermediária. Foram utilizados de três a cinco neurônios na camada de entrada (um para a tensão do gerador e as demais para os valores das potências reativas de cada linha conectada à usina, com valores normalizados entre 0 e 1), seis na intermediária e um na saída (referente à tensão de referência, podendo assumir qualquer valor entre 0,9 e 1,1).

Para o autor, o SVC baseado na técnica de RNA pode controlar de forma sub-ótima e robusta a tensão em uma ampla quantidade de pontos de operação do SEP, além de permitir fácil re-treinamento caso ocorra alguma alteração no SEP.

Diferentemente do artigo em questão, que utilizou um SEP de testes fictício, treinado com valores simulados, para o controle de tensão utilizando apenas unidades geradoras, este trabalho utiliza dados reais de um SEP real, com o objetivo de criar um sistema de auxílio à decisão para o controle de tensão utilizando outros tipos de ECT como bancos de capacitores, reatores e tapes de transformadores.

Outros trabalhos já utilizaram técnicas de Lógica *Fuzzy* para avaliação dos benefícios da existência de um SVC no Brasil [TARANTO, 2000]. O SVC em questão foi testado no SEP da Área Rio de Janeiro / Espírito Santo, subsistema do SIN, utilizando alguns ECTs deste sistema para a correção das tensões e verificações quanto à instabilidade de tensão após ocorrências como: a perda de uma linha de transmissão ou a entrada de carga. No artigo também ocorreu a alteração do barramento “piloto” para verificação da resposta do SVC. Os resultados tidos como preliminares indicaram benefícios com a aplicação do SVC, aumentando o controle e a segurança do SEP, além de indicar a importância da escolha correta da barra “piloto”, que para o sistema em questão estaria dentre as de maior tensão.

O SEP utilizado em [TARANTO, 2000] e seus dados, embora simulados, possuíam uma representação próxima do real. Não foram utilizados todos os ECT disponíveis no SEP. O artigo se diferencia do trabalho desta dissertação por apresentar um sistema secundário de controle de tensão e mostrar análises quanto à instabilidade de tensão em casos de contingência. Este trabalho não realizou tais análises, uma vez que as ações dos operadores em tempo real não entram neste mérito, e sim na manutenção das faixas de tensão dentro dos limites estabelecidos, objetivo do trabalho.

Muito tem se estudado para a aplicação de um controle coordenado de tensão no Brasil, porém o SIN possui dispositivos de controle complexos, com usinas suprindo grandes centros de carga através de longos troncos de transmissão, ao contrário dos europeus que possuem sua geração próxima às barras de carga. Em sistemas elétricos com as características do SIN, o chaveamento de grandes blocos de compensação em paralelo e/ou atuação manual

em tapes de transformadores provocam grande impacto no sistema, requerendo coordenação durante estas manobras, em função das interações entre estes controles e da possibilidade de impacto adverso associado a suas atuações.

Assim, no Brasil, o controle de tensão é realizado pelos operadores de tempo real, o que torna a disponibilidade de uma ferramenta de apoio no processo de decisão uma solução bastante atraente, principalmente no treinamento de novos operadores de Centros de Operação de sistemas elétricos de grande porte. A aplicação desta ferramenta é um passo importante para a criação de um SVC ou TVC visando o controle de tensão de forma coordenada no Brasil. Desta forma, este trabalho tem a intenção de desenvolver um sistema de apoio à decisão baseado em RNAs.

2.7. Aplicações de RNA nos SEPs

Com o advento de novas tecnologias e regras de mercado em virtude da reestruturação do setor elétrico, as empresas ligadas aos SEP estão reformulando seus processos, passando a utilizar as técnicas de Inteligência Computacional (IC) nos mais diversos problemas [MOMOH, 2000].

Por serem capazes de tratar problemas complexos, de natureza não linear, as técnicas de IC, em particular RNA, têm sido amplamente aplicadas nos mais diversos problemas relacionados aos SEP para a classificação de padrões, reconhecimento de padrões, otimização, previsão e controle automático.

Em [HAQUE, 2005] é realizado um resumo dos diversos artigos publicados sobre aplicações de RNA no SEP no *IEEE proceedings* e conferências do ramo nos períodos de 1990 a 1996 e 2000 a 2005. A quantidade de artigos publicados em cada período e seus respectivos assuntos podem ser vistos na , indicando de forma clara o aumento destes.

Dentre as diversas aplicações de Redes Neurais presentes no SEP [HAQUE, 2005 e CIGRE, 1995], destacam-se as de previsão de carga [VELLASCO, 2004], diagnóstico de falhas [RAMOS, 2003], planejamento operacional [RONALDO, 1999], análises de segurança estática [AGGOURE, 1991], e dinâmica [KUMAR, 1991]. Nesta seção do trabalho é apresentado um histórico da RNA aplicada no SEP e, de forma sucinta, um resumo sobre as aplicações acima apresentadas. Em

[HAQUE, 2005] também é apresentado um gráfico que mostra, percentualmente, o número de publicações para cada aplicação, Figura 14.

Nas seções a seguir são apresentadas, de forma sucinta, as aplicações apresentadas acima.

Tabela 2 – Quantidade de artigos publicados utilizando técnicas de RNA entre os períodos de 1990-1996 e 2000-2005 [HAQUE, 2005].

Assunto	Quantidade de artigos publicados de 1990 a 1996	Quantidade de artigos publicados de 2000 a abril de 2005
	RNA	RNA
Planejamento		
- Expansão		
Geração	-	1
Transmissão	-	1
Distribuição	-	-
- Estrutural		
Potência Reativa	1	-
- Confiabilidade	-	1
Operação		
(i) Instalação		
- Programação de geração	-	4
- Despacho econômico	1	14
- Despacho ótimo	-	-
- Despacho de potência reativa	1	1
- Controle de tensão	4	3
- Avaliação de segurança		
Estática	7	3
Dinâmica	6	9
- Programação de manutenções	3	1
- Gerenciamento de contratos	-	-
- Monitoramento de equipamentos	4	3
(ii) Sistema		
- Previsão de carga	12	23
- Gerenciamento de carga	-	-
- Processamento de alarmes	13	20
- Restauração de serviços	-	2
- Alteração de Redes	-	-
- Análise de contingências	1	2
- TFCA	-	-
- Estimação de estado	4	2
Análises / Modelagem		
- Fluxo de potência	4	4
- Harmônicas	-	3
- Estabilidade Transiente	5	9
- Estabilidade Dinâmica	13	7
- Simulação / operadores	-	1
- Proteção	7	4



Figura 14 – Percentual do número de publicações para cada aplicação apresentada em [HAQUE, 2005]

2.7.1. Previsão de Carga

A previsão de carga, para diferentes horizontes ou prazos, é um assunto de grande importância no SEP. É a partir desta previsão que serão definidas tanto a quantidade de energia que deverá ser gerada para o minuto seguinte do dia corrente quanto à necessidade de novas usinas ou linhas de transmissão para daqui a 20 anos ou mais. A previsão é categorizada em três grupos: curto prazo (de quinze minutos a uma semana), médio prazo (de um mês a cinco anos) e longo prazo (superior a cinco anos).

Para a realização da previsão de carga, em resumo, são fornecidos diversos insumos, como por exemplo: valor da carga na hora anterior, no dia anterior e a temperatura, sendo que a rede neural apresenta na sua saída a carga prevista. Conforme pode ser visto em [CIGRE, 1995] o modelo mais utilizado para esta aplicação é o *Multi-Layer Perceptron (MLP)* com algoritmo de treinamento *Back-Propagation* [HAYKIN, 1999].

2.7.2. Diagnóstico de Falhas

Quando há uma ocorrência no SEP como, por exemplo, a abertura de uma ou mais linhas de transmissão por falha (curto-circuito), é necessária uma rápida

interpretação por parte dos operadores do que ocorreu e que tipo de ação deve ser tomada. O diagnóstico e a localização de falhas auxiliam o operador, permitindo que este, a partir das informações fornecidas pelos relés de proteção das linhas de transmissão do sistema, otimize os recursos e reduza o tempo em que a linha ficará desligada

Para o diagnóstico de falhas, as entradas fornecidas à RNA são as informações dos relés de proteção e da operação do(s) disjuntor(es) da(s) linha(s). Como na aplicação para previsão de carga, o modelo mais utilizado também para esta aplicação é o *MLP* com *Back-Propagation*.

2.7.3. Planejamento Operacional

De todas as práticas de planejamento aparece em destaque o Despacho econômico. Com as reestruturações das regras de comercialização de energia dos SEP de diversos países, a existência de um despacho de energia elétrica que reduza os custos desta se faz cada vez mais importante. A obtenção do despacho ótimo está diretamente ligada às limitações de transmissão existentes e à previsão de carga, pois conhecendo esta última é possível determinar o montante de energia a ser gerado, ficando o despacho ótimo responsável por definir em quais usinas isto ocorrerá, respeitando as limitações.

Para esta aplicação, diferentemente das demais apresentadas, o modelo de redes neurais mais utilizado é o de Hopfield, demonstrando boa capacidade na solução do problema de otimização.

2.7.4. Análise de Segurança

A análise de segurança pode ser dividida em dois grupos: estática e dinâmica. A análise estática avalia o SEP em regime permanente, ou seja, sem levar em consideração os transitórios no domínio do tempo. Estes são utilizados na análise dinâmica, que trabalha com todos os fenômenos dinâmicos e dependentes no tempo. Ambas as análises têm como principal objetivo garantir que a demanda de energia seja atendida, sem que ocorram violações dos limites aceitáveis de frequência e de tensão após perturbações no SEP.

Assim como as duas primeiras aplicações o modelo mais utilizado para esta aplicação é o MLP com back-propagation.

Embora o problema do controle de tensão também seja de extrema importância para a operação dos SEPs, não se encontra com facilidade artigos deste tema utilizando técnicas de RNA. Algumas soluções encontradas utilizando técnicas de IC relacionadas ao controle de tensão foram apresentadas na seção 2.6, sendo aplicadas no controle de tensão coordenado.

Como verificado na , é pequena a quantidade de artigos referentes à utilização de RNAs no controle de tensão. Os objetivos e as modelagens dos poucos trabalhos de utilização de RNAs no controle de tensão não foram apresentados em [HAQUE, 2005].

O modelo para o sistema de apoio à decisão para o controle de tensão em tempo real, objetivo deste trabalho, é apresentado no próximo capítulo.

3

Sistema de Apoio à Decisão para o Controle de Tensão (SADECT) Baseado em Redes Neurais

Motivado pela importância do estabelecimento de um sistema de apoio à decisão que auxiliasse o operador de tempo real durante realização da tarefa do controle de tensão, um problema extremamente não linear, desenvolveu-se nesta dissertação o Sistema de Apoio à Decisão para o Controle de Tensão (SADECT) baseado em RNA.

As diferentes configurações do SADECT baseiam-se nas redes *Multi-Layer Perceptrons (MLP)* com treinamento *Back-propagation*, por ser este modelo um aproximador universal [HORNIK, 1989] e o mais utilizado na literatura. No algoritmo *Back-propagation*, os erros dos elementos processadores da camada de saída (conhecidos através do treinamento supervisionado) são retro-propagados para as camadas intermediárias para o ajuste dos pesos.

A Figura 15 mostra uma RNA com cinco neurônios na camada de entrada, três na intermediária ou escondida, e quatro na de saída. Cada conexão entre dois neurônios possui um peso, sendo este representado pela letra w_{ij} . Durante o processo de treinamento supervisionado [HAYKIN, 1999], o valor numérico de cada peso é alterado com o objetivo de reduzir o erro na camada de saída.

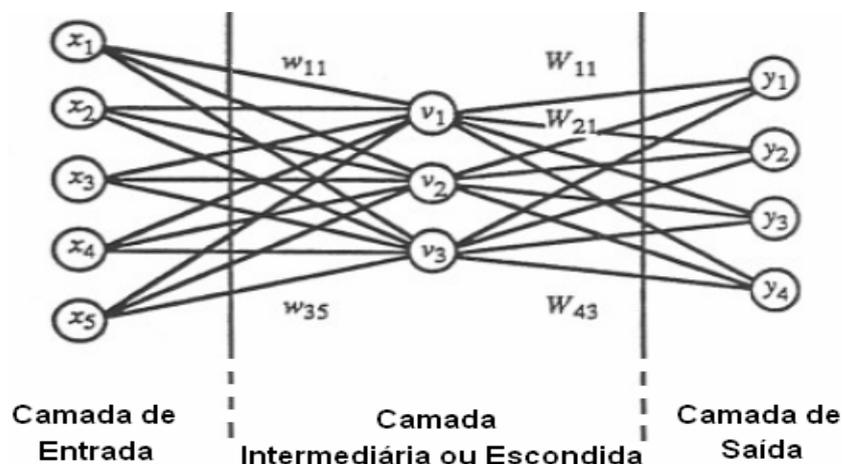


Figura 15– Exemplo de RNA

O sistema de apoio à decisão para o controle de tensão, SADECT, é composto de três módulos em série: *Pré-processamento dos dados*, *Análise e classificação dos dados* e *Pós-processamento*.

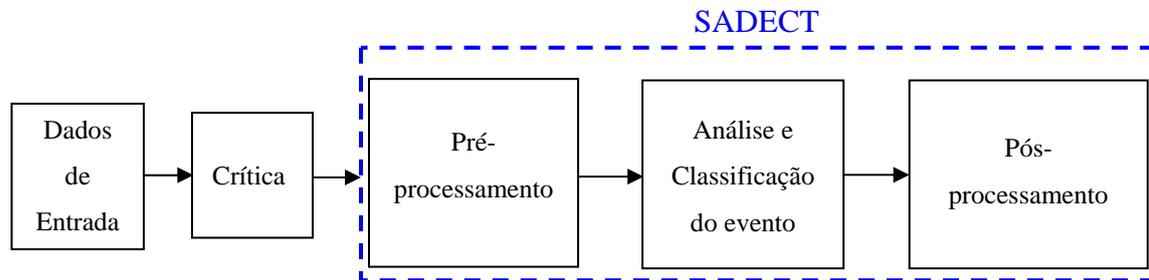


Figura 16– Módulos do SADECT

Os dados de entrada para o SADECT são os mesmos valores utilizados pelos operadores de tempo real para decidir entre manobrar ou não os ECTs, isto é, as grandezas elétricas e informações sobre a topologia do SEP. Entretanto, a leitura desses dados pode resultar em valores inválidos, sendo necessário um módulo de crítica para eliminá-los. Já criticados, os dados são pré-processados, sofrendo normalizações e ajustes de modo que os mesmos possam ser utilizados pelas redes neurais de classificação. O módulo de classificação utiliza os dados pré-processados e, em função destes, as redes neurais treinadas fornecem a classificação do evento necessário para efetuar o controle de tensão, isto é, manobrar ou não manobrar o ECT. Finalmente, o módulo de pós-processamento avalia as saídas do módulo de classificação e faz a indicação final do evento sugerido pelo SADECT para o operador.

Todos os módulos apresentados estão descritos de forma mais detalhada nas próximas seções.

3.1. Dados de Entrada e Crítica

Relembrando o que foi apresentado no Capítulo 2, para decidir quando e em qual dos ECTs disponíveis deve ser realizada a manobra (alteração de seu estado), o operador verifica:

- ✓ a posição dos ECTs: no caso de bancos de capacitores ou reatores, o operador verifica se estão ligados ou desligados; para os tapes,

verifica-se as posições dos mesmos; por fim, para as unidades geradoras e compensadores síncronos, analisa-se a corrente de excitação ou a potência reativa, verificando se estão próximas do limite mínimo ou máximo;

- ✓ quais são os barramentos que estão com seus valores de tensão próximos dos limites das faixas;
- ✓ a hora, pois as faixas de tensão são definidas em função da hora do dia.

Desta forma, os padrões ou dados de entrada para o SADECT são:

- ✓ valores das grandezas elétricas (tensões dos barramentos, potência reativa, dentre outras);
- ✓ posição ou estado dos ECT; e
- ✓ hora em que os valores e os estados acima foram verificados.

A título de ilustração de todo o processamento do SADECT, será utilizado o SEP exemplo apresentado no Capítulo 2 com a adição de mais um banco de capacitores em paralelo no barramento F (Figura 17).

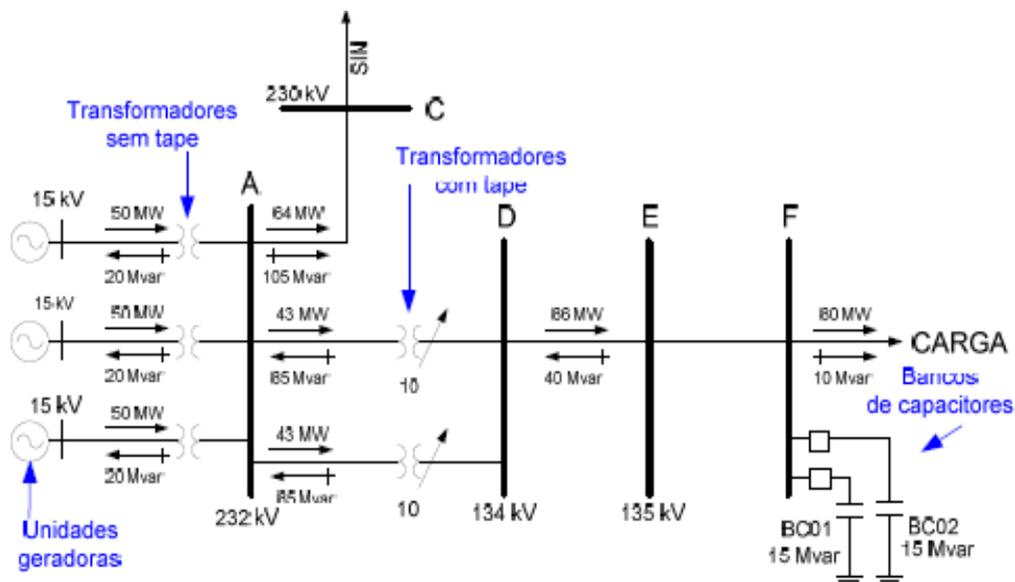


Figura 17– SEP exemplo

Os ECTs disponíveis neste SEP são:

- ✓ três unidades geradores de -30 a 30 *Mvar* cada, que devem operar em conjunto;
- ✓ tapes de dois transformadores, com tapes variando entre 0 e 16, que também devem operar em conjunto; e
- ✓ dois bancos de capacitores em paralelo (BC01 e 02) de 15 *Mvar*.

A indica as possíveis manobras para cada um dos ECT do SEP exemplo.

Tabela 3 – ECT e respectivas manobras

ECT	Manobras
Unidades geradoras e compensadores síncronos	Elevar ou Reduzir a corrente de excitação ou a potência reativa
Tapes de transformadores	Elevar ou Reduzir o tape
Bancos de capacitores (BC) e de reatores em paralelo	Ligar ou Desligar o banco

Suponha que o operador verifique as seguintes informações para manobrar os BC:

- valor da tensão dos barramentos D e F;
- potência reativa das unidades geradoras;
- posição dos tapes dos transformadores;
- estado dos BC01 e BC02; e
- hora.

O SADECT atua da mesma forma que o operador, utilizando as mesmas regras, e, desta forma, recebe como dados de entrada as mesmas informações. Considerando que as informações acima são atualizadas a cada minuto, a apresenta, por exemplo, os dados de entrada para o SADECT de 18h às 18h05min de um dia fictício.

Tabela 4 – Dados de entradas para o BC

Hora	Tensão barramento D (kV)	Tensão barramento F (kV)	Potência reativa das unidades geradoras	Posição dos tapes	Estado do BC01	Estado do BC02
18:00	135	132	-60 Mvar	10	Desligado	Desligado
18:01	136	134	-60 Mvar	10	Desligado	Desligado
18:02	140	135	-60 Mvar	13	Desligado	Desligado
18:03	138	132	-60 Mvar	13	Desligado	Desligado
18:04	137	131	-60 Mvar	13	Desligado	Desligado
18:05	140	142	-54 Mvar	13	Ligado	Desligado

Para a definição de manobrar ou não os outros ECTs do SEP (isto é, ECTs diferentes de banco de capacitores), informações diferentes das mostradas acima podem ser necessárias. Desta forma, cada um dos ECTs presente no SADECT possuirá seu conjunto de dados de entrada.

O principal objetivo do SADECT é auxiliar o operador de tempo real durante a tarefa do controle de tensão. Por usar dados obtidos do Sistema de Supervisão e Controle (SSC) de tempo real, as informações ou entradas fornecidas ao sistema podem apresentar valores inválidos, ocasionados por falha em qualquer um dos equipamentos que fazem parte do processo de transmissão destes dados de sua origem, as subestações, até o local onde está instalado o SADECT. Para que este funcione corretamente, é indispensável que os dados de entrada sofram uma crítica prévia, informando sua validade e impedindo que o SADECT utilize dados inválidos, o que prejudicaria os resultados obtidos.

Esta crítica prévia pode ser realizada de várias formas, como por exemplo: a substituição do dado inválido por outro equivalente válido ou através da estimação de seu valor. O dado equivalente pode ser obtido da mesma fonte, porém através de outra forma de aquisição, por exemplo: se o dado é transmitido via microondas e fibra ótica, adota-se uma via como *back-up* da outra. Já no caso de estimação do valor, este é obtido através de cálculos matemáticos, onde o valor a ser utilizado é calculado em função de outros valores válidos. Uma vez criticados e aceitos, os dados passam pelo módulo de pré-processamento para sua adequação ao módulo de classificação do evento.

3.2. Pré-processamento

O módulo de pré-processamento é a primeira fase do SADECT. Nesta fase, os dados de entrada já criticados são ajustados, de forma que sejam apresentados adequadamente ao próximo módulo, onde estará o modelo de RNA.

A forma que este ajuste é realizado depende do tipo de dado que está sendo usado, podendo convertê-lo em codificação binária (uma entrada para cada categoria, no caso de dados categóricos) ou normalizá-lo entre 0 e 1 (apenas uma entrada) através de transformação linear ou não linear.

Para o sistema em questão os dados utilizados são grandezas elétricas, hora e posição dos ECTs, que sempre variam entre valores máximos e mínimos conhecidos, possibilitando a normalização de seus valores entre 0 e 1 sem prejuízo para o treinamento da RNA.

A equação (5) indica como é realizada a transformação linear de uma variável de entrada.

$$V_{TL} = \frac{V - V_{MÍN}}{V_{MÁX} - V_{MÍN}} \quad (5)$$

onde:

V_{TL} é o valor da variável de entrada já normalizada de forma linear

V é o valor da variável de entrada

$V_{MÍN}$ é o valor mínimo da variável de entrada

$V_{MÁX}$ é o valor máximo da variável de entrada

Para exemplificar a referida transformação, serão utilizados os dados de entrada para o BC do SEP, apresentados como exemplo na .

Equipamentos como bancos de capacitores e de reatores estão sempre ligados ou desligados, caracterizando um estado digital. Assim, a variável de entrada referente ao estado do ECT recebe o valor 1 quando ligado, e recebe o valor 0 quando desligado.

Os ECTs equivalentes (equipamentos com as mesmas características) de uma mesma subestação devem ser considerados como um grupo de ECTs, e sua normalização ocorrerá utilizando-se os valores máximos e mínimos deste grupo.

Unidades geradoras semelhantes dentro da mesma usina ou compensadores síncronos de uma mesma subestação também constituem um grupo, e terão como limites mínimo e máximo de potência reativa o somatório dos limites das mesmas. No exemplo da Figura 3 existem três unidades geradoras com limite mínimo de -30 Mvar e máximo de 30 Mvar; assim os limites mínimo e máximo do grupo serão, respectivamente, -90 e 90 Mvar.

O mesmo ocorrerá para o grupo de banco de capacitores, pois para o operador é importante saber quantos do grupo estão ligados e não quais. O limite mínimo para cada banco de capacitores é 0 (desligado) e o máximo 1 (ligado), desta forma os limites mínimos e máximos do grupo serão, respectivamente, 0 e 2.

Embora os transformadores em paralelo também constituam um grupo, os limites mínimo e máximo dos tapes não podem ser somados. Isto ocorre porque a posição dos tapes destes transformadores operam, salvo condições especiais, sempre no mesmo valor.

Os valores máximos e mínimos de cada variável ou grupo de variáveis são apresentados na Tabela 5. A Tabela 6 apresenta o mesmo exemplo de dados entradas para o BC da Tabela 4, mas com os valores já transformados.

Tabela 5 – Valores máximos e mínimos das variáveis de entrada (* = valores definidos pelo ONS)

	Hora	Tensão barramentos* D e F (kV)	Potência reativa das unidades geradoras	Posição dos tapes	Posição dos BCs
Mínimo	0	131	-90 Mvar	0	0
Máximo	24	145	90 Mvar	16	2

Tabela 6 – Dados de entrada do exemplo da transformados

Hora	Tensão barramento D	Tensão barramento F	Potência reativa das unidades geradoras	Posição dos tapes	Posição dos BCs
0,75	0,29	0,07	0,17	0,63	0,00
0,75	0,36	0,21	0,17	0,63	0,00
0,75	0,64	0,29	0,17	0,81	0,00
0,75	0,50	0,07	0,17	0,81	0,00
0,75	0,43	0,00	0,17	0,81	0,00
0,75	0,64	0,79	0,20	0,81	0,50

Nesta seção foram pré-processados os dados de entrada referentes ao BC do exemplo para a ilustração do processo. Os dados dos demais ECTs de qualquer sistema desejado são pré-processados seguindo a mesma metodologia.

Uma vez pré-processados os dados são entregues ao módulo de classificação.

3.3. Classificação dos eventos

Neste módulo os dados de entrada pré-processados são classificados entre os três eventos possíveis para cada um dos ECTs (Tabela 7). Este é o segundo módulo do SADECT, sendo o módulo principal do sistema.

Tabela 7 – ECTs e respectivos eventos

ECT	Eventos
Unidades geradoras ou Compensadores síncronos	Elevar, Reduzir ou Não alterar a corrente de excitação
Tapes de transformadores	Elevar, Reduzir ou Não manobrar o tape
Banco de capacitores ou reatores em paralelo	Ligar, Desligar ou Não manobrar o banco

Como o evento para cada um dos ECTs acontece de forma isolada, não sendo possível a ocorrência de mais de um evento ao mesmo tempo no SADECT, é possível a divisão dos eventos em três classes. Os eventos “Elevar a corrente de excitação”, “Elevar o tape” ou “Ligar o banco” são ações com “intenção positiva”, denominados de eventos Classe 1. Os eventos “Reduzir a corrente de excitação”, “Reduzir o tape” ou “Ligar o banco” têm “intenção negativa”, sendo denominadas Classe -1. Finalmente, os eventos “Não alterar a corrente de excitação”, “Não manobrar o tape” ou “Não manobrar o banco” são ações com “intenção nula” e, desta forma, são Classe 0. A faz o resumo das classificações.

Tabela 8 – Eventos e Classes

Eventos	Classe 1	Classe -1	Classe 0
Elevar a corrente de excitação, Elevar o tape ou Ligar o banco	1	0	0
Reduzir a corrente de excitação, Reduzir o tape ou Desligar o banco	0	1	0
Não alterar a corrente de excitação, Não manobrar o tape ou Não manobrar o banco	0	0	1

As regras de classificação dos dados de entrada entre os eventos citados acima são obtidas através do treinamento dos modelos de redes neurais, apresentados nas seções seguintes, utilizando-se dados dos eventos ocorridos em tempo real. A técnica utilizada para o treinamento, assim como o estudo de caso, são apresentados no Capítulo 4.

De forma a determinar a melhor modelagem de redes neurais para efetuar o controle de tensão, foram avaliados três diferentes modelos, formados por um conjunto de RNAs que atuam em série e/ou paralelo, conforme descritos nas sub-seções seguintes.

3.3.1. Modelo RNA CENTRAL

Este modelo é formado por dois níveis de redes neurais, sendo constituído de $(1 + n)$ RNAs, onde n é a quantidade de ECTs presentes no SADECT (ver Figura 18).

O primeiro nível contém a RNA principal deste modelo, denominada RNA CENTRAL. Esta rede é treinada com os dados de todos os equipamentos presentes no SEP escolhido e possui $1 + n$ saídas. Uma de suas saídas, quando ativada, indica o evento “Não manobrar os ECTs” (eventos Classe 0) e as demais, cada uma responsável por um ECT, quando ativadas, indicam que o referido ECT deve ser manobrado. Entretanto, a RNA CENTRAL não informa qual deve ser a manobra (Ligar / Elevar ou Desligar / Reduzir). A saída que indica que um dado ECT deve ser manobrado aciona uma RNA no segundo nível, referente ao respectivo ECT.

Conforme mencionado, o segundo nível contém n RNAs, cada uma especializada em um dos n ECTs existentes. Cada RNA deste segundo nível, treinada com os dados de apenas um ECT, é especializada em definir qual será a

manobra realizada (Tabela 7), Ligar / Elevar (eventos Classe 1) ou Desligar / Reduzir (eventos Classe -1).

Seguindo o exemplo apresentado nas seções anteriores, a Figura 18 apresenta o modelo RNA CENTRAL para o SEP exemplo. Os números entre parênteses indicam qual saída é ativada em função da classificação do evento pelo SADECT.

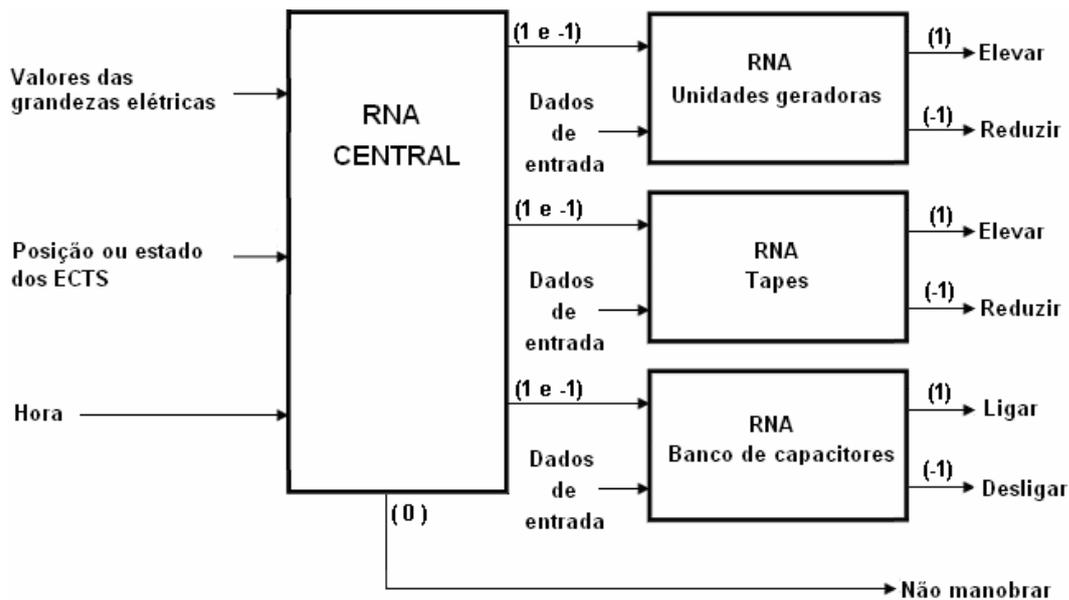


Figura 18 – Modelo RNA CENTRAL para os ECT do SEP exemplo

Como pode ser visto na figura anterior, o SADECT para o SEP exemplo possui quatro RNAs. A RNA CENTRAL possui quatro saídas, três destas destinadas a acionar as RNAs dos ECTs (unidades geradoras, tapes dos transformadores e banco de capacitores).

3.3.2. Modelo RNA ÚNICA

Este modelo de RNA é constituído de n RNAs, sendo n a quantidade de ECTs presentes no SADECT.

Neste modelo uma Rede Neural é treinada para cada ECT presente no SADECT. Cada RNA é especializada em definir qual será o evento a ser realizado pelo seu referido ECT (Tabela 7).

A Figura 19 apresenta o modelo RNA ÚNICA para o SEP exemplo. Os números entre parênteses indicam qual saída é ativada em função da classificação do evento pelo SADECT.

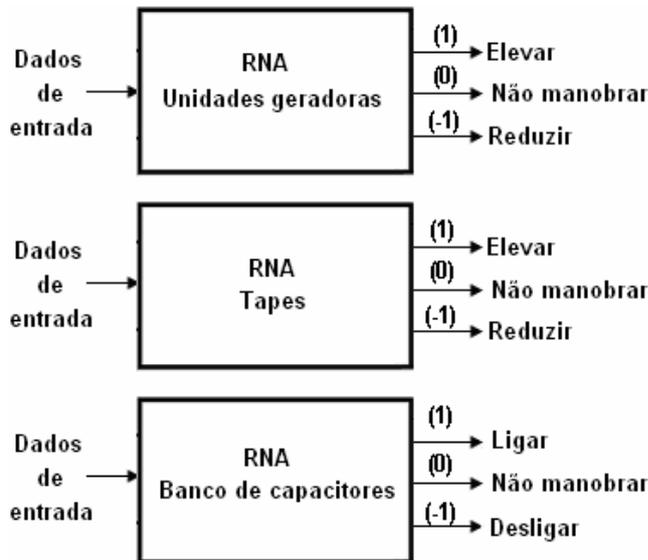


Figura 19 – Modelo RNA ÚNICA para os ECT do SEP exemplo

Analisando a figura anterior, verifica-se que o SADECT para o SEP exemplo possui três RNAs, uma para cada ECT (unidades geradoras, tapes dos transformadores e banco de capacitores). Este modelo necessita de um número menor de RNAs treinadas, porém, diferentemente do modelo anterior, permite que o SADECT informe a manobra de mais de um ECT, cabendo ao operador a decisão de qual realizar.

3.3.3. Modelo RNA DUPLA

Este modelo de RNA é constituído de $2n$ RNAs, onde n , novamente, é a quantidade de ECTs presentes no SADECT.

Neste último modelo, duas RNAs são treinadas para cada equipamento presente no SADECT com os dados de entrada do equipamento específico. Uma rede neural (RNA-1) é especializada em indicar se o ECT deve ser Ligado / Elevado ou Não Ligado / Não Elevado (eventos Classe 1 e 0); uma segunda rede neural (RNA-2) é especializada em indicar a necessidade de Desligar / Reduzir o ECT (eventos Classe -1) ou não realizar manobra alguma (eventos Classe 0). A

RNA-2 só será ativada caso a RNA-1 indique a necessidade de Não ligar / Não elevar o ECT. Assim como o modelo RNA CENTRAL, o modelo RNA DUPLA possui RNAs que dependem de condições prévias para o seu acionamento.

A Figura 20 mostra o modelo RNA DUPLA para o mesmo SEP exemplo usado nas duas últimas seções. Os números entre parênteses indicam qual saída é ativada um função da classificação do evento pelo SADECT.

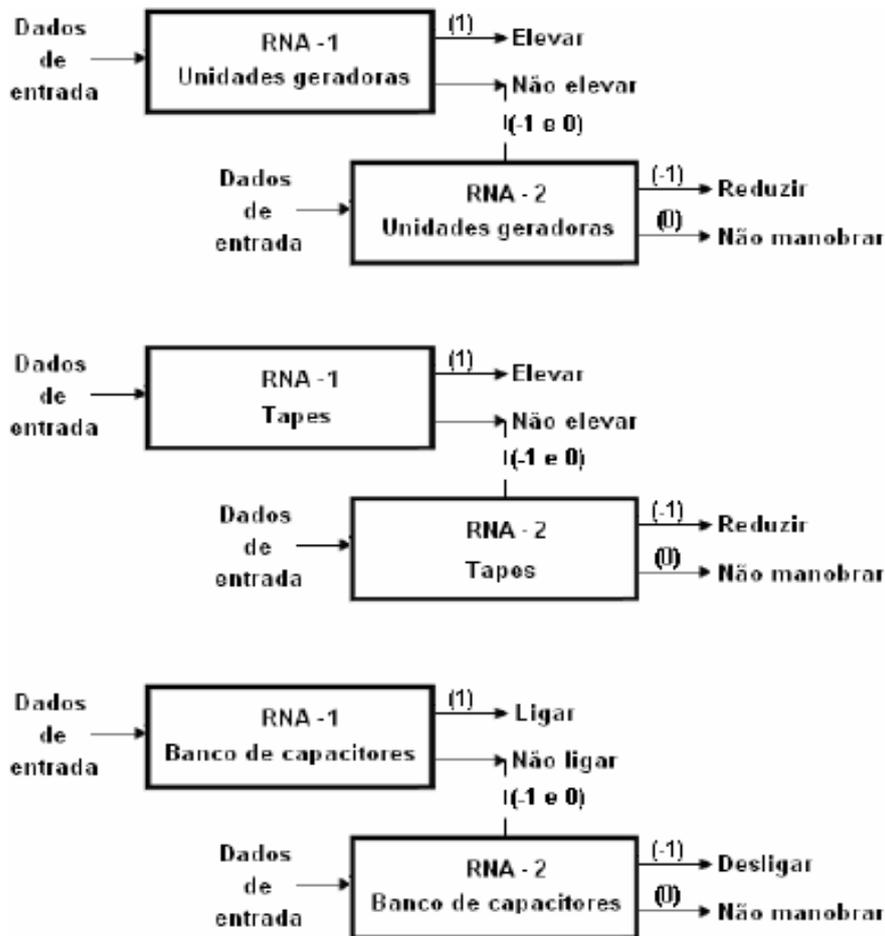


Figura 20 – Modelo RNA DUPLA para os ECTs do SEP exemplo

Analisando a Figura 20, verifica-se que o SADECT para o SEP exemplo possui seis RNAs, duas para cada um dos ECTs (unidades geradoras, tapes dos transformadores e banco de capacitores). Dos modelos apresentados este é o que necessita de um número maior de RNAs treinadas e, da mesma forma que o modelo anterior, permite que o SADECT informe a manobra de mais de um ECT, ficando para o operador a decisão de qual manobra realizar.

Independente do modelo utilizado (RNA CENTRAL, RNA ÚNICA ou RNA DUPLA), após processarem os dados de entrada, as RNAs dos modelos apresentados informam saídas com valores entre 0 e 1. Para o correto funcionamento do SADECT se faz necessário a transformação destes em valores iguais a 0 (saída não ativa) ou iguais a 1 (saída ativa), uma vez que todas as RNAs dos modelos apresentados devem possuir somente uma saída ativa. Deste modo, o SADECT possui um módulo de Pós-processamento, que determina efetivamente qual o evento a ser realizado para efetuar o controle de tensão.

3.4. Pós-processamento

O pós-processamento é o último módulo do SADECT. Neste módulo as saídas dos modelos são transformadas, de forma que a manobra sugerida pelo sistema seja apresentada claramente ao operador de tempo real.

Em todas as RNAs dos modelos apresentados a função de ativação utilizada nos neurônios da camada de saída é a função *sigmoid* (saídas entre 0 e 1). Para definir qual das saídas deve ser ativada, isto é, receber o valor 1, utilizou-se o critério simples da maior saída, isto é:

- ✓ saída com maior valor = 1
- ✓ demais saídas = 0

Para exemplificar o pós-processamento, suponha que os três modelos do SADECT estão funcionando e obtendo dados, criticados e pré-processados, em tempo real do SEP exemplo. Suponha ainda que as condições do referido SEP estejam conforme apresentadas na Figura 21. Conforme discutido no Capítulo 2, as condições da figura abaixo indicam a necessidade de ligar o banco de capacitores.

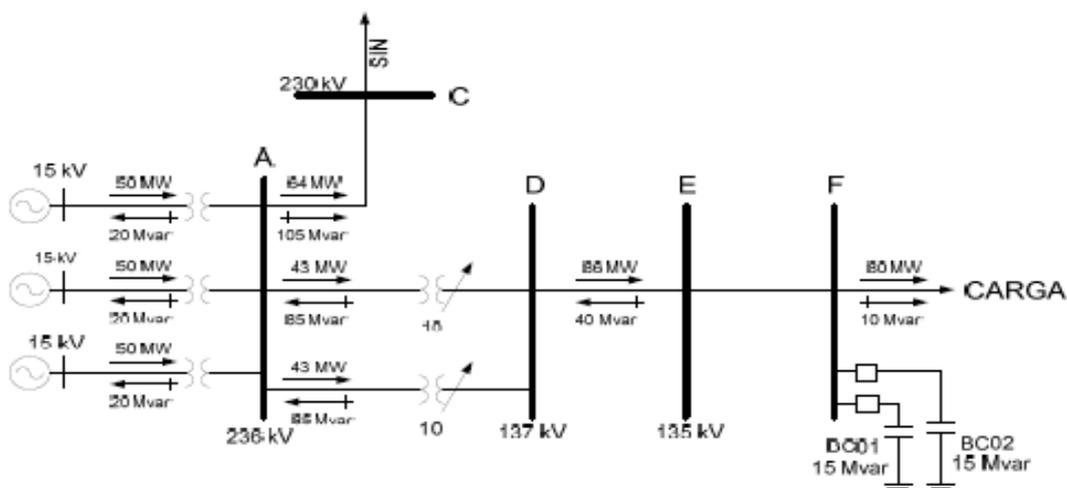


Figura 21 – SEP exemplo após a entrada de 20 MW de carga

As Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11, a seguir, mostram, para cada modelo apresentado, utilizando valores ilustrativos para o banco de capacitores, as saídas do módulo de Classificação dos eventos do SADECT antes e depois do pós-processamento. Tais saídas, depois de realizado o pós-processamento, indicam ao operador que o capacitor em questão deve ser ligado. As RNAs e as saídas ativas estão sombreadas em cinza.

Tabela 9 – Exemplos de saídas para o modelo RNA CENTRAL

RNA CENTRAL				
Pós-processado?	Não manobrar (Classe 0)	RNA Unidades geradoras (Classes 1 e -1)	RNA Tapes (Classes 1 e -1)	RNA Banco de capacitores (Classes 1 e -1)
Não	0,3	0,5	0,5	0,7
Sim	0	0	0	1

RNA Banco de capacitores		
Pós-processado?	Ligar (Classe 1)	Desligar (Classe -1)
Não	0,8	0,1
Sim	1	0

Tabela 10 – Exemplos de saídas para o modelo RNA ÚNICA

RNA			
Banco de capacitores			
Pós-processado?	Ligar (Classe 1)	Não manobrar (Classe 0)	Desligar (Classe -1)
Não	0,8	0,3	0,1
Sim	1	0	0

Tabela 11 – Exemplos de saídas para o modelo RNA DUPLA

RNA -1		
Banco de capacitores		
Pós-processado?	Ligar (Classe 1)	Não Ligar (Classes -1 e 0)
Não	0,8	0,5
Sim	1	0

Para verificar a viabilidade de aplicação do SADECT, foi escolhido, por possuir diversos ECTs, o principal tronco responsável pela interligação das áreas Sul e Sudeste do Brasil. Esta área do SIN é responsável pela transmissão da geração da usina hidroelétrica (UHE) de Itaipu para estas áreas.

Os resultados referentes ao estudo de caso são apresentados no próximo capítulo.

4 Estudo de Caso

O SADECT, apresentado no capítulo anterior, foi avaliado no controle de tensão do Sistema de Transmissão responsável pela transmissão da geração da usina hidrelétrica (UHE) de Itaipu para as áreas Sul e Sudeste do Brasil e pela interligação entre estas duas áreas. A interligação Sul/Sudeste, que possui nove linhas de transmissão em 765 kV com compensação capacitiva em série, permite o intercâmbio de energia elétrica entre as duas áreas.

Em virtude da complementaridade hidrológica dessas áreas (enquanto uma está na fase seca, a outra está na fase úmida), a interligação Sul/Sudeste viabiliza a otimização energética entre as mesmas.

A Figura 22 apresenta uma representação unifilar da interligação Sul/Sudeste. As linhas horizontais em vermelho representam os barramentos e, em azul, estão destacados os recursos ou equipamentos de controle de tensão (ECTs).

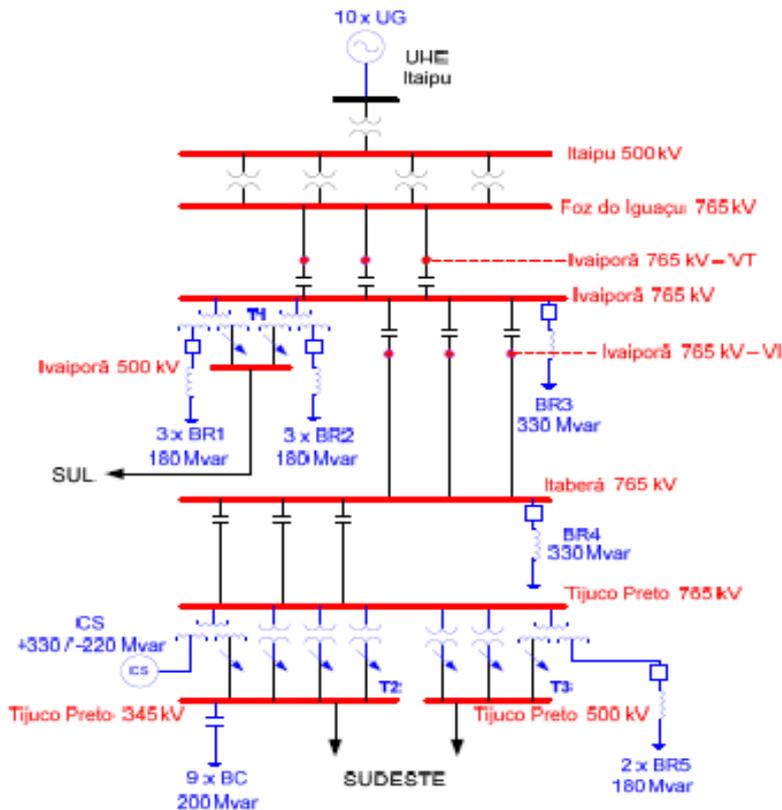


Figura 22 – Interligação Sul/Sudeste

Nessa interligação os operadores possuem os seguintes ECTs, cujas posições (estado operativo) são importantes para a realização da tarefa do controle de tensão dos seus barramentos:

- ✓ dez (10) unidades geradoras do setor de 60 Hz da UHE Itaipu - **(10 x UG)**;
- ✓ um (1) compensador síncrono da subestação Tijuco Preto (STTP) - **(CS +330/-220 Mvar)**;
- ✓ nove (9) bancos de capacitores em paralelo, de 200 Mvar cada, da STTP 345 kV - **(9 x BC)**;
- ✓ seis (6) bancos de reatores em paralelo, de 180 Mvar cada, presentes no terciário de dois transformadores de 765/500 kV da subestação Ivaiporã (STIV) - **(3 x BR1 e 3 x BR2)**;
- ✓ dois (2) bancos de reatores em paralelo, de barra, de 330 Mvar cada, das STIV 765 kV **(BR3)** e subestação Itaberá (STIA) 765 kV **(BR4)**;
- ✓ dois (2) bancos de reatores em paralelo, de 180 Mvar cada, presentes no terciário de um dos transformadores de 765/500 kV da STTP - **(2 x BR5)**;
- ✓ dois transformadores em paralelo de 765/500 kV da STIV com vinte e três (23) tapes - **(T1)**;
- ✓ quatro transformadores em paralelo de 765/345 kV da STTP com vinte e três (23) tapes - **(T2)**; e
- ✓ três transformadores em paralelo de 765/500 kV da STTP com trinta (30) tapes - **(T3)**.

O controle da tensão da interligação é realizado pelos operadores de tempo real com base nos valores de tensão de sete barramentos principais:

- ✓ subestação Itaipu 500 kV;
- ✓ subestação Foz do Iguaçu (STFI) 765 kV;
- ✓ STIV 765 kV;
- ✓ STIA 765 kV; e
- ✓ STTP 765 kV, 500 kV e 345 kV.

Além das tensões dos barramentos, outras duas são utilizadas como referência no controle de tensão dessa interligação:

- STIV 765 kV – VT (medida nos capacitores em série com saída para STFI); e
- STIV 765 kV – VI (medida nos capacitores em série com saída para STIA).

Outra informação importante para o controle de tensão é a hora do dia, pois, conforme explicado no Capítulo 1, a hora está diretamente relacionada à demanda de carga do SIN. A importância desta informação é verificada quando, perto das 17h, os operadores de tempo real realizam as ações para elevar as tensões dos barramentos próximos aos centros de carga. Tais ações são realizadas preventivamente, uma vez que as tensões destes barramentos se reduzem com a elevação da carga no período de carga pesada.

Escolhido o SEP para o estudo de caso e conhecidas as informações necessárias para o controle das tensões de seus barramentos, foram definidos os três blocos de dados que servirão de insumo para o SADECT, ou seja, os dados de entrada (padrões de entrada):

- ✓ Estado dos equipamentos ou recursos de controle de tensão;
- ✓ Valor das tensões dos barramentos; e
- ✓ Hora.

A apresenta cada variável de entrada dos três blocos de dados.

Os valores das tensões dos barramentos de STFI, STIV e STTP 765 kV não foram utilizados no SADECT. Estes valores foram desconsiderados, pois os valores das tensões STIV – VT, VI e STIA 765 kV são mais representativos.

O BR4 de STIA também não foi utilizado, uma vez que o mesmo pouco sofre alteração em seu estado operativo, ficando na maior parte do tempo Ligado.

Uma vez definidas as variáveis de entrada, iniciou-se o procedimento de coleta de dados do histórico.

Tabela 12 – Variáveis de entrada do SADECT para o estudo de caso

Blocos	Variáveis
Equipamentos ou recursos de controle de tensão (ECTs)	10 x UG de Itaipu CS da STTP 9 x BC da STTP 3 x BR1 e 3 x BR2 da STIV BR3 da STIV 2 x BR5 da STTP T1 da STIV T2 da STTP T3 da STTP
Tensões	STIV 765 kV – VT (medida nos capacitores em série com saída para STFI) STIV 765 kV – VI (medida nos capacitores em série com saída para STIA) STIA 765 kV ITAIPU 500 kV STIV 500 kV STTP 500 kV STTP 345 kV
Hora	Hora associada aos valores das demais variáveis

4.1. Base de Dados

O histórico utilizado para a obtenção dos dados compreende os meses de junho a dezembro de 2004 (308.160 minutos), possuindo valores adquiridos, de minuto em minuto, das tensões dos principais barramentos, dos estados dos equipamentos de controle de tensão da área escolhida e da hora.

Os dados utilizados para treinar as RNAs do SADECT são referentes às mudanças de estado ocorridas em tempo real. A utilização destes dados para o treinamento tem como objetivo “ensinar” a RNA as regras utilizadas pelos operadores durante a execução da tarefa do controle de tensão do sistema escolhido.

Não foi possível obter o histórico das manobras de controle de tensão utilizando as unidades geradoras de Itaipu e o compensador síncrono de STTP. Desta forma, o SADECT foi treinado apenas com os dados de entrada referentes às mudanças de estado dos bancos de capacitores, reatores e tapes.

Diferentes procedimentos de coleta de dados foram utilizados, dependendo dos equipamentos analisados. Nos casos dos bancos de capacitores e reatores em paralelos (BC e BR, respectivamente), as mudanças de estado operativo ocorrem quando há manobras de Ligar ou Desligar os equipamentos. Os dados de entrada para esses equipamentos foram obtidos no minuto anterior às suas variações de estado.

Para os tapes, a mudança de estado ocorre quando sua posição é alterada para baixo (Reduzir) ou para cima (Elevar). Os dados, nesse caso, foram obtidos do segundo minuto anterior às suas variações de estado, uma vez que, ao contrário dos BC e BR, tais alterações são registradas manualmente pelos operadores após a solicitação das mesmas. A Figura 23 apresenta o fluxograma da obtenção de dados de entrada do histórico.

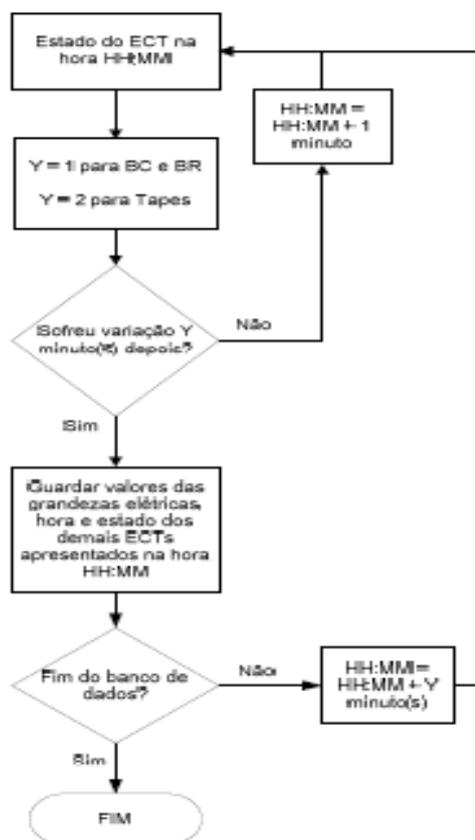


Figura 23 – Fluxograma da obtenção de dados de entrada do histórico

No modelo proposto não há diferença entre as manobras de um mesmo grupo de equipamentos, ou seja, as manobras realizadas por um dos nove BCs (02 a 10) de STTP são consideradas como sendo realizadas pelo BC de STTP. Esta prática é comumente usada, já que todos possuem as mesmas características e dificilmente são manobrados dois equipamentos do mesmo grupo no mesmo minuto.

Assim como para o BC de STTP, essa afirmativa é válida para os demais grupos descritos na primeira coluna da . Nesta mesma tabela são relacionados os ECTs aos seus grupos e também são apresentadas as quantidades de manobras por ECT obtidas em cada mês e sua totalização em todo o histórico. Os equipamentos sombreados são aqueles cujo número de manobras foi considerado insuficiente e, portanto, retirados do teste do SADECT.

Tabela 13 – Quantidade total de manobras por equipamento

Grupo	Equipamento ou Recurso de controle de tensão (ECT)	Mês							TOTAL
		6	7	8	9	10	11	12	
T1 da STIV	Tape 765/500 kV da STIV	51	28	0	0	0	1	15	95
T2 da STTP	Tape 765/345 kV da STTP	115	140	132	130	77	10	16	620
T3 da STTP	Tape 765/500 kV da STTP	81	57	48	41	33	13	15	288
BC da STTP	BC 02 da STTP	62	77	102	57	2	3	24	2097
	BC 03 da STTP	63	68	96	35	2	1	20	
	BC 04 da STTP	0	2	2	0	12	1	0	
	BC 05 da STTP	2	4	10	32	1	3	15	
	BC 06 da STTP	38	57	78	30	0	6	20	
	BC 07 da STTP	35	40	16	26	40	64	32	
	BC 08 da STTP	38	49	66	20	2	71	26	
	BC 09 da STTP	32	40	50	50	28	45	22	
	BC 10 da STTP	54	58	70	66	36	70	26	
	TOTAL	324	395	490	316	123	264	185	
BR(3) da STIV	BR da STIV	6	18	10	10	18	12	2	76
BR(5) da STTP	BR 01 da STTP	65	74	69	67	60	47	63	908
	BR 02 da STTP	73	73	76	67	62	45	67	
	TOTAL	138	147	145	134	122	92	130	
BR (1 e 2) da STIV	BR 1A da STIV	56	68	65	81	65	73	90	2250
	BR 1B da STIV	51	61	70	50	56	50	44	
	BR 1C da STIV	33	53	77	53	48	54	44	
	BR 2A da STIV	54	68	64	69	66	57	63	
	BR 2B da STIV	47	59	58	19	24	13	15	
	BR 3B da STIV	29	49	59	49	52	47	47	
	TOTAL	270	358	393	321	311	294	303	

A apresenta uma pequena amostra das manobras obtidas do histórico para os tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP. A referida tabela informa a posição do tape antes (Coluna “Tape STTP 765/500 HORA”) e após a manobra (Coluna “Tape STTP 765/500 HORA + 2 min”).

Nas tabelas apresentadas em seguida foram destacadas as manobras de Redução, Elevação, respectivamente, em vermelho e verde. Os eventos onde não ocorreram manobras foram destacados em amarelo.

Tabela 14 – Amostra das manobras do Tape STTP 765/500 kV

EVENTO	DIA	MÊS	HORA	Tape STTP 765/500 kV HORA	Tape STTP 765/500 kV HORA + 2 min	MANOBRA
1	1	6	07:27	18	22	Elevar
2	1	6	09:36	22	18	Reduzir
3	1	6	17:17	18	10	Reduzir
4	3	6	00:27	12	14	Elevar
5	3	6	04:13	14	18	Elevar
6	3	6	16:48	18	14	Reduzir
7	3	6	18:15	14	10	Reduzir
8	4	6	00:28	10	15	Elevar

Além dos dados referentes às manobras dos equipamentos, é necessária a obtenção dos dados nos momentos onde tais equipamentos não foram manobrados. Estes dados são importantes para treinar os modelos de classificação na decisão entre Manobrar ou Não manobrar o equipamento de controle de tensão. Entretanto, pelo fato deste conjunto de dados representar praticamente todo o histórico, pois na maior parte do tempo o equipamento não é manobrado, foram selecionados, de forma aleatória, 3000 dados para cada equipamento. A quantidade destes dados a ser efetivamente usada dependerá da quantidade de dados válidos obtidos para as manobras de Ligar ou Desligar e Elevar ou Reduzir.

Como ilustração do processo de obtenção dos eventos citados anteriormente, referente aos eventos onde os ECTs não foram manobrados, a Tabela 15 apresenta o grupo de eventos mostrado na Tabela 14 com a adição de quatro eventos onde não ocorreram a manobra dos tapes dos transformadores de 765/500 kV da STTP.

Para cada evento estão associados os valores de tensão e do estado operativo dos ECTs do SEP. Os valores das tensões e do estado operativo de cada um dos ECTs do SEP são apresentados na Tabela 16 e na Tabela 17,

respectivamente (das linhas 1 a 8). As informações apresentadas nestas tabelas indicaram ao operador de tempo real a necessidade de realizar as manobras acima.

É importante para o treinamento dos modelos de redes neurais que os dados obtidos para cada grupo de ECTs estejam divididos, de forma razoavelmente equilibrada, entre Ligar ou Desligar e entre Elevar ou Reduzir. Esta divisão dos dados foi obtida sem a necessidade de procedimento adicional.

Os valores das tensões e do estado operativo de cada um dos ECTs do SEP para os eventos onde não ocorreram a manobra dos tapes dos transformadores de 765/500 kV da STTP também são apresentados na Tabela 16 e na Tabela 17, respectivamente (das linhas 9 a 12).

Tabela 15 – Amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

EVENTO	DIA	MÊS	ANO	HORA	Tape STTP 765/500 HORA	Tape STTP 765/500 HORA + 2 min	EVENTO
1	1	6	2004	07:27	18	22	Elevar
2	1	6	2004	09:36	22	18	Reduzir
3	1	6	2004	17:17	18	10	Reduzir
4	3	6	2004	00:27	12	14	Elevar
5	3	6	2004	04:13	14	18	Elevar
6	3	6	2004	16:48	18	14	Reduzir
7	3	6	2004	18:15	14	10	Reduzir
8	4	6	2004	00:28	10	15	Elevar
9	1	6	2004	06:50	18	18	Não manobrar
10	4	6	2004	07:10	16	16	Não manobrar
11	4	6	2004	23:20	16	16	Não manobrar
12	5	6	2004	01:46	16	16	Não manobrar

Tabela 16 - Tensões referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

EVENTO	STIV 765 kV -VT	STIV 765 kV -VI	STIA 765 kV	ITAIPU 500 kV	STIV 500 kV	STTP 500 kV	STTP 345 kV
1	796,00	762,70	795,80	510,00	527,00	505,70	356,90
2	786,40	766,30	788,20	519,00	532,90	495,70	358,60
3	782,00	771,10	774,10	516,00	533,60	519,60	359,80
4	774,80	745,20	782,50	505,00	501,30	518,30	348,10
5	780,60	757,30	788,60	499,00	503,20	506,30	345,60
6	781,10	774,20	777,60	520,00	529,00	505,80	358,10
7	793,60	787,50	784,90	523,00	540,80	525,70	357,30
8	787,80	760,90	790,30	520,00	520,70	501,70	346,40
9	785,40	748,20	787,80	500,00	505,90	515,20	356,00
10	789,80	762,10	795,20	508,00	524,40	518,60	357,90
11	757,40	737,30	764,70	502,00	502,90	500,30	346,50
12	787,80	760,90	790,30	520,00	520,70	501,70	346,40

De posse de todos os dados válidos inicia-se a etapa de Pré-processamento.

4.2. Pré-processamento

O módulo de pré-processamento constitui o primeiro módulo do SADECT. Nesta fase os dados criticados são normalizados e transformados, de forma que estejam adequados para sua utilização no próximo módulo, onde é efetuada a classificação do evento.

A funcionalidade do módulo de Pré-processamento dos dados de entrada foi previamente apresentado no Capítulo 3, porém, para o treinamento supervisionado do módulo de classificação (algoritmo *Back-propagation* das RNAs *Multi-Layer Perceptrons (MLP)* são necessários dados de saída categorizados.

Desta forma, esta seção está dividida em Pré-processamento dos dados de entrada e Pré-processamento dos dados de saída.

4.2.1. Pré-processamento dos Dados de Entrada

Conforme discutido no Capítulo 2, para efetuar o pré-processamento dos dados de entrada (etapa de normalização), devem ser definidos os valores máximos e mínimos de cada valor de tensão e do estado operativo dos equipamentos.

Com o objetivo de exemplificar os procedimentos realizados neste módulo, serão apresentados os resultados referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP (Tabela 15, Tabela 16 e Tabela 17).

Para a normalização do estado operativo dos equipamentos presentes nos dados de entrada dos ECTs do SADECT, é necessário realizar previamente o agrupamento dos equipamentos. O procedimento de agrupamento foi apresentado no Capítulo 3. A Tabela 19 apresenta o agrupamento dos estados operativos dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP, vistos na Tabela 17.

Tabela 19 – Agrupamento dos estados operativos dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

EVENTO	T3 da STTP	T1 da STIV	T2 da STTP	BC da STTP	BR(5) da STTP	BR (1 e 2) da STIV	BR(3) da STIV
1	18	14	6	0	0	4	1
2	22	14	4	1	0	2	1
3	18	16	4	5	0	0	1
4	12	16	8	0	2	6	1
5	14	20	10	0	2	6	1
6	18	14	4	3	0	2	1
7	14	14	6	5	0	0	1
8	10	14	8	0	2	6	1
9	18	12	8	0	2	4	1
10	16	16	8	0	0	6	1
11	16	16	6	0	2	4	1
12	16	16	8	0	2	6	1

Os valores dos agrupamentos variam entre valores máximos (todos os equipamentos ligados ou tapes no valor máximo) e mínimos (todos os equipamentos desligados ou tapes no valor mínimo). A Tabela 20 indica estes valores máximos e mínimos por agrupamento de equipamentos e a Tabela 21 apresenta a normalização dos valores da Tabela 19, isto é, dos agrupamentos dos estados operativos dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP.

Tabela 20 – Valores máximos e mínimos para os agrupamento dos estados operativos dos equipamentos

Grupo	Valor máximo	Valor mínimo
T3 da STTP	30	0
T2 da STTP	23	0
T1 da STIV	23	0
BC de STTP	9	0
BR(5) de STTP	2	0
BR(1 e 2) de STIV	6	0
BR(3) de STIV	1	0

Tabela 21 – Normalização dos valores dos agrupamentos dos estados operativos dos equipamentos referentes à amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

EVENTO	T3 da STTP	T1 da STIV	T2 da STTP	BC da STTP	BR(5) da STTP	BR (1 e 2) da STIV	BR(3) da STIV
1	0,60	0,61	0,26	0,00	0,00	0,67	1,00
2	0,73	0,61	0,17	0,11	0,00	0,33	1,00
3	0,60	0,70	0,17	0,56	0,00	0,00	1,00
4	0,40	0,70	0,35	0,00	1,00	1,00	1,00
5	0,47	0,87	0,43	0,00	1,00	1,00	1,00
6	0,60	0,61	0,17	0,33	0,00	0,33	1,00
7	0,47	0,61	0,26	0,56	0,00	0,00	1,00
8	0,33	0,61	0,35	0,00	1,00	1,00	1,00
9	0,60	0,52	0,35	0,00	1,00	0,67	1,00
10	0,53	0,70	0,35	0,00	0,00	1,00	1,00
11	0,53	0,70	0,26	0,00	1,00	0,67	1,00
12	0,53	0,70	0,35	0,00	1,00	1,00	1,00

Para realizar a normalização dos valores de tensão e da hora do dia, presentes nos dados de entrada dos ECTs do SADECT, foram utilizados os valores máximos e mínimos apresentados na Tabela 22. Estes valores foram obtidos com a análise do histórico dos valores destas tensões. A Tabela 23 apresenta os valores normalizados dessas tensões e da hora da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP.

Tabela 22 – Valores máximos e mínimos para as tensões e hora

Variáveis	Valor máximo (kV)	Valor mínimo (kV)
STIV 765 kV – VT	815	750
STIV 765 kV – VI	815	720
STIA 765 kV	810	755
ITAIPU 500 kV	530	495
STIV 500 kV	555	490
STTP 500 kV	555	480
STTP 345 kV	370	335
HORA	24:00	00:00

Tabela 23 – Valores normalizados para as tensões e hora da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

EVENTO	HORA	STSTIV 750-VT KV	STSTIV 750-VI KV	STIA 750 KV	ITAIPU 500 KV	STIV 500 KV	STTP 500 KV	STTP345 KV
1	0,31	0,71	0,45	0,74	0,43	0,57	0,34	0,63
2	0,40	0,56	0,49	0,60	0,69	0,66	0,21	0,67
3	0,72	0,49	0,54	0,35	0,60	0,67	0,53	0,71
4	0,02	0,38	0,27	0,50	0,29	0,17	0,51	0,37
5	0,18	0,47	0,39	0,61	0,11	0,20	0,35	0,30
6	0,70	0,48	0,57	0,41	0,71	0,60	0,34	0,66
7	0,76	0,67	0,71	0,54	0,80	0,78	0,61	0,64
8	0,02	0,53	0,33	0,72	0,11	0,28	0,43	0,37
9	0,34	0,58	0,43	0,64	0,71	0,47	0,29	0,33
10	0,32	0,54	0,30	0,60	0,14	0,24	0,47	0,60
11	0,32	0,61	0,44	0,73	0,37	0,53	0,51	0,65
12	0,22	0,11	0,18	0,18	0,20	0,20	0,27	0,33

A Figura 25 mostra todos os valores das tensões normalizadas referentes aos eventos do BR(1 e 2) da STIV. Nesta figura é possível perceber que foram observados poucos valores entre 0,0 e 0,2 e entre 0,8 e 1,0. Este comportamento também foi verificado para as tensões referentes aos eventos dos demais equipamentos. Em virtude deste problema, adotou-se uma nova normalização realizada de forma a se obter uma maior dispersão dos dados, ou seja, estas faixas com poucos valores sofreram redução, aumentando a faixa que possuía a maioria dos dados. A indica os valores de referência para a normalização ajustada dos dados.

Tabela 24 – Valores normalizados para as tensões e hora da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

Normalização ajustada	STIV 765 kV – VT	STIV 765 kV - VI
Entre 0,0 e 0,1	750 a 770	720 a 740
Entre 0,1 e 0,9	770 a 800	740 a 795
Entre 0,9 e 1,0	800 a 815	795 a 815
Normalização ajustada	STIA 765 kV	STIV 500 kV
Entre 0,0 e 0,1	755 a 775	490 a 505
Entre 0,1 e 0,9	775 a 800	505 a 540
Entre 0,9 e 1,0	800 a 810	540 a 555
Normalização ajustada	STTP 500 kV	
Entre 0,0 e 0,1	480 a 500	
Entre 0,1 e 0,9	500 a 540	
Entre 0,9 e 1,0	540 a 555	
Normalização ajustada	STTP 345 kV	
Entre 0,0 e 0,05	335 a 340	
Entre 0,05 e 0,5	340 a 352	
Entre 0,5 e 0,95	352 a 363	
Entre 0,95 e 1,0	363 a 370	

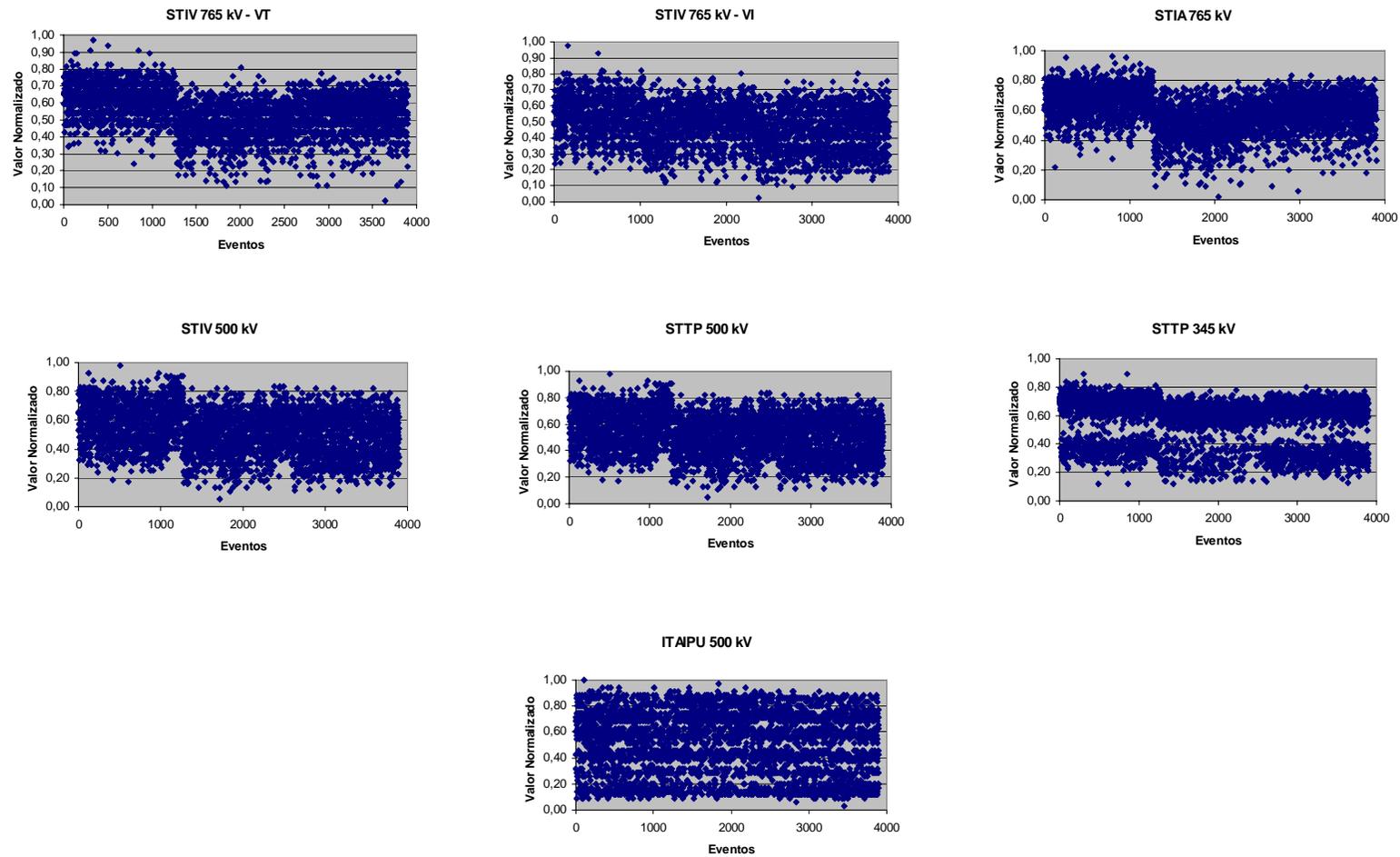


Figura 25 – Todos os valores das tensões, normalizados, referentes aos eventos do agrupamento BR(1 e 2) da STIV

Os valores de tensão de ITAIPU 500 kV, apresentados no último gráfico da Figura 25, foram desconsiderados por apresentarem grande dispersão nos dados para todos os equipamentos, não mostrando um padrão definido para cada evento.

As demais tensões apresentaram comportamentos diferenciados para os eventos de ligar, desligar e não manobrar, sendo portanto utilizadas no SADECT. Como confirmação desta afirmação são apresentados, na Figura 26, para efeito de comparação, os valores normalizados de tensão de STIA 765 kV e ITAIPU 500 kV separados por evento para o BR(1 e 2) da STIV.

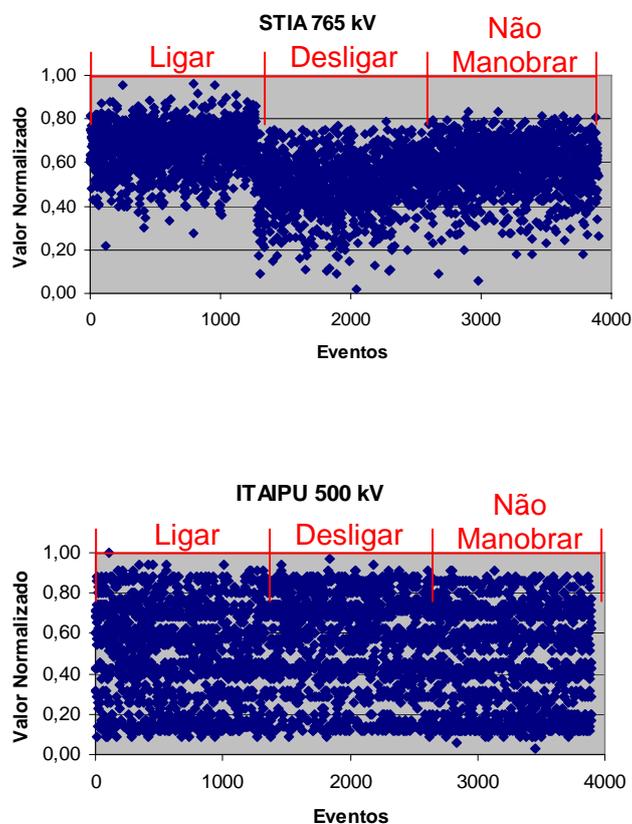


Figura 26 – Valores das tensões STIA 765 kV e ITAIPU 500 kV, normalizados, referentes aos eventos do BR(1 e 2) de STIV

A Figura 27 mostra todos os valores das tensões referentes aos eventos do BR de STIV, normalizados de forma ajustada, confirmando a maior dispersão dos dados.

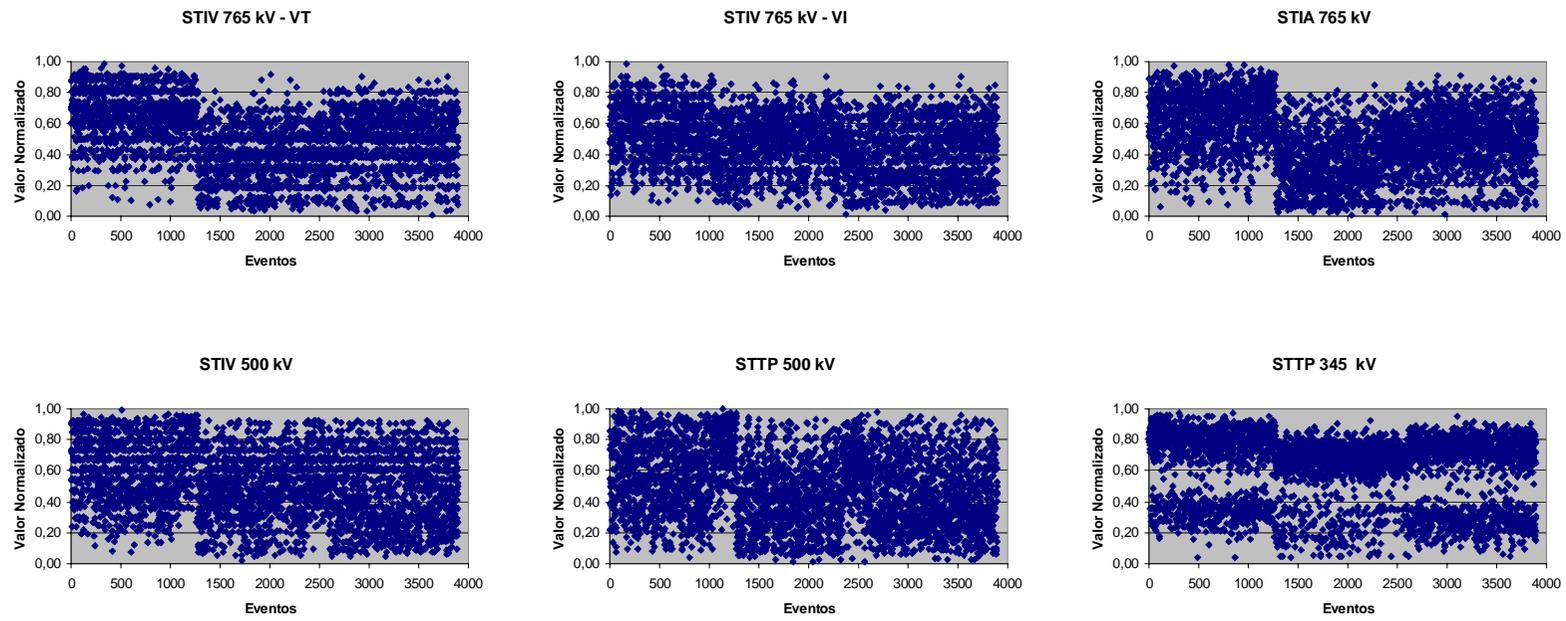


Figura 27 – Todos os valores das tensões, normalizados de forma ajustada, referentes aos eventos do agrupamento BR(1 e 2) da STIV

Após as análises resultantes do Pré-processamento dos dados de entrada, as variáveis de entrada do SADECT, para este estudo de caso específico, apresentadas na Tabela 12, sofreram alterações. As novas variáveis são listadas na Tabela 25, totalizando quatorze (14).

A análise da relevância dessas variáveis foi feita durante os testes das diferentes configurações do módulo de Classificação dos eventos, conforme descrito na seção 4.3.

Tabela 25 – Novas variáveis de entrada do SADECT para o estudo de caso, após o pré-processamento dos dados de entrada

Blocos	Variáveis
<p>Agrupamentos de equipamentos ou recursos de controle de tensão (ECTs)</p> <p>Total = 7</p>	<p>BC da STTP</p> <p>BR(1 e 2) da STIV</p> <p>BR(3) da STIV</p> <p>BR(5) da STTP</p> <p>T1 da STIV</p> <p>T2 da STTP</p> <p>T3 da STTP</p>
<p>Tensões</p> <p>Total = 6</p>	<p>STIV 765 kV – VT (medida nos capacitores série com saída para STFI)</p> <p>STIV 765 kV – VI (medida nos capacitores série com saída para STIA)</p> <p>STIA 765 kV</p> <p>STIV 500 kV</p> <p>STTP 500 kV</p> <p>STTP 345 kV</p>
<p>Hora</p>	<p>Hora associada as valores das demais variáveis</p>

4.2.2.

Pré-processamento dos Dados de Saída

Todo evento está associado à ação de Manobrar ou Não manobrar um equipamento. Os eventos para cada um dos ECTs são apresentados na , conforme descrito no Capítulo 3. Analisando-se a tabela, verifica-se que, para um dado ECT, existem três (3) eventos possíveis.

Como o evento para cada um dos ECTs acontece de forma isolada, não sendo possível a ocorrência de mais de um evento ao mesmo tempo, é possível a divisão dos eventos em três classes. Conforme descrito no capítulo 3, os eventos “Elevar a corrente de excitação”, “Elevar o tape” ou “Ligar o banco” são ações com “intenção positiva”, denominados de Classe 1. Os eventos “Reduzir a corrente de excitação”, “Reduzir o tape” ou “Desligar o banco” recebem a denominação Classe -1. Finalmente, os eventos “Não alterar a corrente de excitação”, “Não manobrar o tape” ou “Não manobrar o banco” são ações com “intenção nula” e, desta forma, são chamados de Classe 0. A seguir faz o resumo das classificações.

Para os tapes, em virtude das manobras se concentrarem na alteração de uma e quatro posições e da pequena diferença de influência entre as mesmas, optou-se em não definir a quantidade a ser elevada ou reduzida, ficando esta decisão a cargo do operador.

Como exemplo do procedimento descrito, é apresentado na o Pré-processamento dos eventos 1, 2 e 12 referentes, respectivamente, aos eventos de Elevar, Reduzir e Não manobrar os tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP.

Tabela 26 – Eventos e Classes

ECTs	Eventos	Classe 1	Classe -1	Classe 0
Unidades geradoras ou Compensadores síncronos	Elevar a corrente de excitação, Elevar o tape ou Ligar o banco	1	0	0
Tapes de transformadores	Reduzir a corrente de excitação, Reduzir o tape ou Desligar o banco	0	1	0
Banco de capacitores ou reatores em paralelo	Não alterar a corrente de excitação, Não manobrar o tape ou Não manobrar o banco	0	0	1

Tabela 27 – Pré-processamento da amostra de eventos dos tapes dos transformadores 765/500 kV da STTP

EVENTO	DIA	MÊS	ANO	HORA	EVENTO	Classe 1	Classe -1	Classe 0
1	1	6	2004	07:27	Elevar	1	0	0
2	1	6	2004	09:36	Reduzir	0	1	0
12	5	6	2004	01:46	Não manobrar	0	0	1

Os dados pré-processados de entrada e de saída formam o banco de dados utilizado para o treinamento das RNAs presentes nos três modelos propostos para o SADECT. Tais RNAs compõem o módulo de classificação dos eventos.

4.3. Classificação dos eventos

De posse do banco de dados já criticado e pré-processado, é possível realizar o treinamento das RNAs que constituem o módulo de Classificação dos eventos. O banco de dados é dividido em três conjuntos: Treinamento (60 % dos dados), Validação (20 %) e Teste (20 %). Os dois primeiros conjuntos servem para o processo de escolha do melhor modelo.

Após definidos os Conjuntos de Treinamento, Validação, Teste e os parâmetros iniciais da RNA, treina-se as RNAs com o Conjunto de Treinamento. O Conjunto de Validação é utilizado para interromper o processo de treinamento, evitando o super treinamento (*overfitting*) da RNA e garantindo a generalização dos resultados [HAYKIN, 1999 e MITCHEL, 1997].

O Conjunto de Teste, por fim, é utilizado para medir o erro da RNA, comparando as saídas da RNA treinada com as saídas esperadas. O erro da RNA foi obtido pela média dos erros de três testes utilizando-se a mesma configuração, com a inicialização aleatória dos pesos.

O treinamento das RNAs deste módulo do SADECT foi realizado no MATLAB®. Em todas as RNAs *MLP* deste trabalho foi realizado o treinamento *Back-propagation* com taxa de aprendizado (η) adaptativa e momento (α). Conforme mencionado acima, para o término do treinamento foi utilizado o critério de validação cruzada.

A função de ativação utilizada para todos os neurônios da camada intermediária de todas as RNAs foi a tangente hiperbólica (*tansig* – equação (6)). Para os neurônios da camada de saída foi utilizada a função de ativação logarítmica (*logsig* - equação (7)). Nas referidas equações $f(v)$ é a função de ativação, v é potencial de ativação do neurônio, a é o parâmetro de inclinação da curva e b é uma constante.

$$f(v) = a \tanh(bv) \quad (6)$$

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \quad (7)$$

Para a escolha da quantidade de neurônios na camada intermediária foram realizados testes utilizando os três modelos propostos. Variou-se esta quantidade entre cinco (5) e quinze (15) neurônios e, para todos os modelos, os melhores resultados foram obtidos utilizando-se de oito (8) a dez (10) neurônios. Para efeito de comparação entre os modelos, adotou-se a quantidade de oito (8) neurônios.

Os modelos utilizados neste módulo do SADECT, descritos anteriormente no Capítulo 3, foram testados na seguinte ordem: RNA CENTRAL, RNA ÚNICA e RNA DUPLA. A ordem apresentada indica a evolução da modelagem, ou seja, os modelos RNA ÚNICA e DUPLA foram construídos, respectivamente, para solucionar problemas encontrados durante os testes na RNA CENTRAL e RNA ÚNICA

A seguir são apresentados os resultados de cada modelagem.

4.3.1.

Modelo RNA CENTRAL

Este modelo possui uma RNA especializada em indicar se deve haver manobra ou não de um equipamento. No caso de necessidade de manobra, um segundo módulo, com uma RNA para cada ECT, indica qual deve ser a manobra. Para o estudo de caso, este modelo é composto de seis (6) RNAs.

Para realizar o treinamento da primeira RNA são utilizados dados de entrada de todos os ECTs e os dados de saída possuem seis (6) classes (Não manobrar nenhum ECT, Manobrar o T2 da STTP, Manobrar o T3 da STTP, Manobrar o BC da STTP, Manobrar o BR(5) da STTP ou Manobrar o BR (1 e 2) da STIV).

As cinco (5) classes referentes aos eventos de manobrar os ECTs são obtidas dos eventos de Classes 1 e -1 resultantes do pré-processamento dos dados de saída dos ECTs, conforme descrito na seção 4.2.2. A classe Não manobrar é obtida dos eventos Classe 0.

Para o correto treinamento da RNA, a quantidade de eventos por ECT deve ser semelhante. Esta quantidade é limitada pelo ECT que possui menos manobras; porém pode-se aumentar a quantidade de manobras de um ECT através da duplicação ou triplicação destas. Para o T3 da STTP foi realizada a duplicação dos

dados de manobra, pois, como pode ser visto na , este ECT possui a menor quantidade de dados (apenas 203, enquanto os outros possuem mais de 500).

Desta forma, para cada ECT foram usadas 406 manobras e, para manter o equilíbrio dos dados, foram adicionados mais 406 eventos onde não ocorreram manobras de nenhum dos ECTs, totalizando 2436 eventos.

Os dados de entrada utilizados são os valores normalizados do estado operativo do agrupamento de equipamentos, dos valores das tensões, e da hora do dia, conforme descrito na seção 4.2.1, totalizando quatorze (14) possíveis entradas para a primeira RNA.

Como dito anteriormente, a primeira RNA possui seis (6) saídas que indicam, com o valor 1, a manobra de um dos cinco (5) ECTs ou não manobrar nenhum destes. A Tabela 28 apresenta os possíveis eventos indicados por esta RNA e a Tabela 29 a separação, já pós-processada, destes eventos nas suas seis (6) classes ou saídas. As cinco colunas sombreadas são as saídas referentes aos ECTs. Caso uma destas saídas seja ativada, uma segunda RNA classificará qual manobra será sugerida pelo SADECT.

Supondo que a saída ativada seja a referente ao BC da STTP, a segunda RNA indicará se o mesmo deve ser Ligado ou Desligado.

Tabela 28 – Eventos possíveis para a primeira RNA do modelo RNA CENTRAL

Número de evento	Evento
1	Não manobrar nenhum ECT.
2	Manobrar o T2 da STTP
3	Manobrar o T3 da STTP
4	Manobrar o BC da STTP
5	Manobrar o BR(5) da STTP
6	Manobrar o BR (1 e 2) da STIV

Tabela 29 – Classificação dos possíveis eventos para a primeira RNA do modelo RNA CENTRAL

Número de evento	Saídas da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL					
	Não manobrar (Classe 0)	T3 da STTP (Classes 1 e -1)	T2 da STTP (Classes 1 e -1)	BC da STTP (Classes 1 e -1)	BR(5) da STTP (Classes 1 e -1)	BR(1 e 2) da STIV (Classes 1 e -1)
1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	1

Buscando o melhor desempenho da primeira RNA do modelo, esta foi treinada com todos os dados e com a retirada de uma das entradas. Porém, em todos os testes realizados este modelo de RNA não apresentou bons resultados após o pós-processamento, conforme indicado na Tabela 30. Analisando os resultados antes do pós-processamento, verificou-se que as saídas da RNA em questão apresentaram poucos valores acima de 0,5. Para comprovar o fato são apresentados na Figura 28 os resultados para a saída Não manobrar.

Tabela 30 – Resultados dos testes da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL

Teste	Entradas	Quantidade de neurônios na camada intermediária	Acerto
1	Todas	15	42 %
2	Todas	8	36 %
3	Todas	12	40 %
4	Todas exceto BR07 de STIV	10	39 %

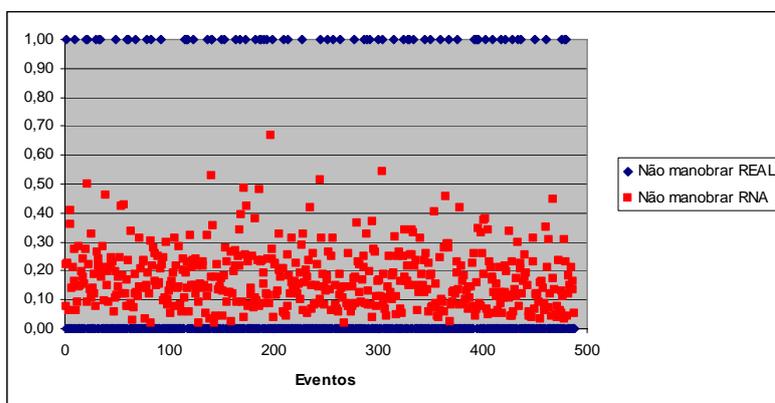


Figura 28 – Valores encontrados na saída “Não manobrar” da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL

Tentando resolver o problema citado, e como uma segunda alternativa de treinamento, utilizou-se a saída pós-processada para avaliar o desempenho de generalização, isto é, o objetivo durante o treinamento era determinar o menor erro de classificação, com a saída já pós-processada. Embora fosse esperada uma melhora, os resultados pioraram, ficando a média do acerto em 38 %.

Também se tentou usar um modelo apenas para os ECTs da STTP, diminuindo as entradas para cinco (5); porém a média de acerto ficou em 50 %. Em virtude do baixo desempenho, este modelo foi abandonado.

O principal motivo para os baixos desempenhos das RNAs testadas neste modelo foi a semelhança dos valores de tensão para os eventos de Manobrar ou Não manobrar os ECTs. Este fato pode ser constatado na Figura 29, onde são apresentados os valores normalizados da tensão STIV 765 kV-VT, separados por classe de saída. A Figura 30 apresenta o mesmo tipo de gráfico para as demais tensões.

Como solução deste problema optou-se por um modelo que possua uma RNA para cada ECT. Este modelo é apresentado na seção a seguir.

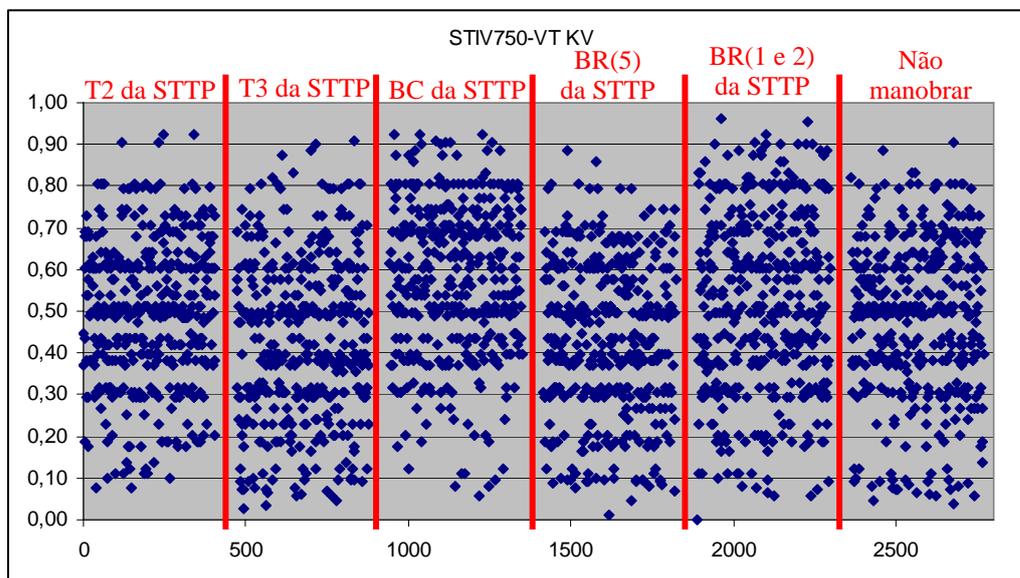


Figura 29 – Valores normalizados da tensão STIV 765 kV – VT ordenados por saída da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL

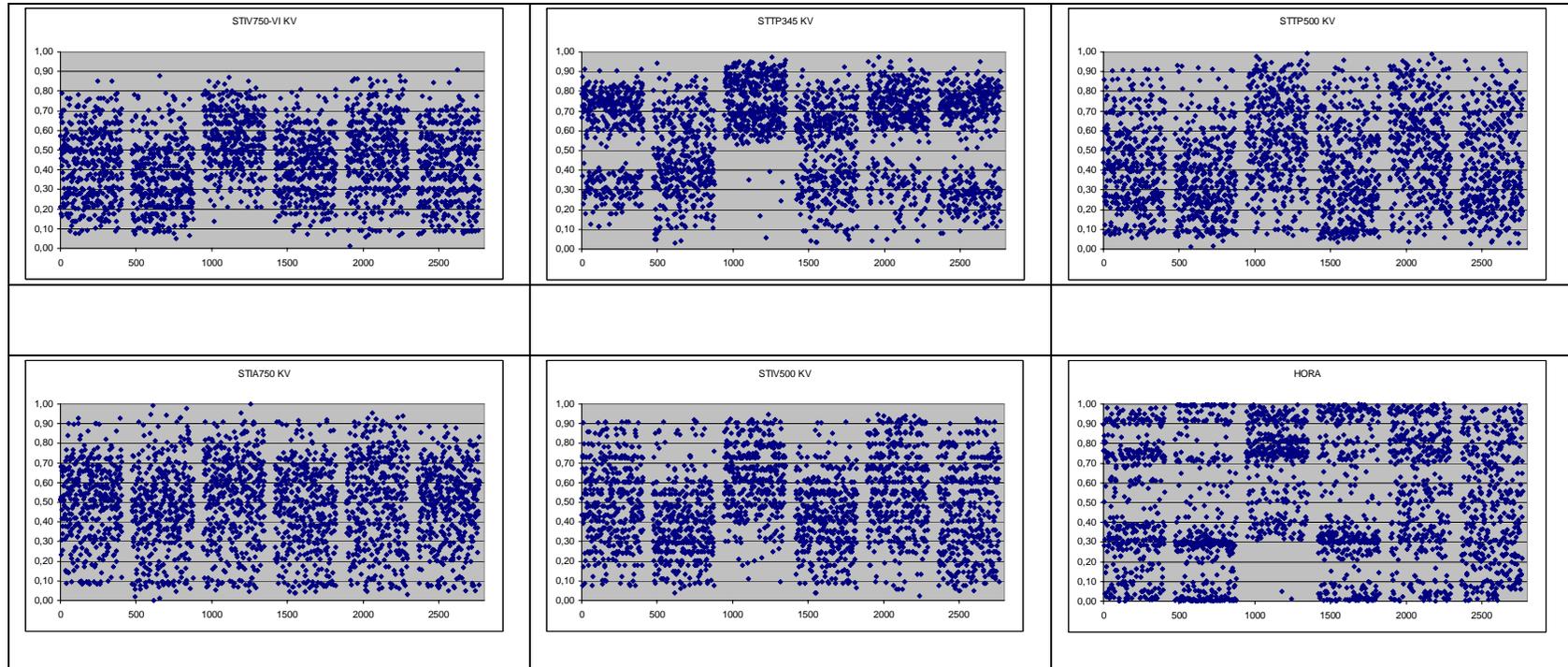


Figura 30 – Valores normalizados de tensão ordenados por saída da primeira RNA do modelo RNA CENTRAL

4.3.2. Modelo RNA ÚNICA

Este modelo possui uma RNA para cada ECT e é especializada em indicar se o mesmo deve ser ou não manobrado e, em caso de manobra, qual deve ser a manobra. Desta forma, para o estudo de caso, o modelo possui cinco (5) RNAs e os eventos são separados em cada RNA em três classes: Ligar / Elevar, Desligar / Reduzir e Não manobrar.

Para realizar o treinamento de cada RNA são utilizados dados de manobras do ECT em questão e os dados onde não ocorreram manobras do mesmo, não existindo limitação da quantidade de dados já que as RNAs são treinadas separadamente. Os dados de cada ECT devem estar equilibrados, ou seja, apresentar a mesma quantidade de dados para as três classificações: Ligar / Elevar (eventos Classe 1), Desligar / Reduzir (eventos Classe -1) e Não manobrar (eventos Classe 0) obtidas no pré-processamento dos dados de saída.

Para o treinamento também são usadas as mesmas 14 variáveis de entrada utilizadas no modelo anterior, sendo que as saídas são reduzidas para 3.

A Tabela 31 apresenta os possíveis eventos indicados pela RNA referente ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA ÚNICA e a Tabela 32 a separação, já pós-processada, destes eventos nas suas três (3) classes ou saídas. A mesma transformação deve ser realizada para os demais ECTs.

Tabela 31 – Eventos possíveis para a RNA referente ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA ÚNICA

Número de evento	Evento
1	Não manobrar o BR(1 e 2) de STIV
2	Ligar o BR(1 e 2) de STIV
3	Desligar BR(1 e 2) de STIV

Tabela 32 – Classificação dos eventos possíveis para a RNA referente ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA UNICA

Número de evento	Saídas da RNA referente ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA ÚNICA		
	Não manobrar (Classe 0)	Ligar (Classe 1)	Desligar (Classe -1)
1	1	0	0
2	0	1	0
3	0	0	1

Da mesma forma que na modelagem anterior, foram realizados diversos testes buscando o melhor desempenho da RNA alterando a quantidade de entradas.

A apresenta o aumento gradual no percentual da média de acerto para a RNA referente ao BR(1 e 2) da STIV, conforme foram inseridas novas entradas. Assim como na modelagem anterior este percentual de acerto foi considerado insuficiente.

Tabela 33 – Testes da Rede Neural para o BR de STIV

Teste	Entradas	Acerto
1	6 Tensões	64 %
2	6 Tensões e Hora	67 %
3	6 Tensões e Hora e Quantidade de BR de STIV ligados	71 %

Durante os testes também se utilizou apenas uma saída, com função de ativação *tansig*, para representar a decisão do operador em Ligar (1), Não Manobrar (0) e Desligar (-1) um dos reatores do BR(1 e 2) de STIV; esta opção foi descartada em virtude de apresentar baixo percentual de acerto, da ordem de 50 %.

Analisando os valores da tensão STIA 765 kV na Figura 26 e as demais tensões nas Figura 27 e Figura 28, percebe-se que os dados referentes à manobra de Desligar e de Não manobrar possuem valores muito próximos. Esta proximidade dos valores, verificada também para os demais ECTs, dificultou o treinamento das RNAs deste modelo.

Desta forma, o modelo em questão não foi testado para os demais ECTs, sendo substituído pela terceira modelagem, apresentada na seção seguinte, que tem como objetivo criar uma RNA especializada em identificar a diferença entre os eventos Classe 0 e -1.

4.3.3. Modelo RNA DUPLA

Esta modelagem possui duas RNAs para cada ECT, a primeira (RNA-1) especializada em indicar se o ECT deve ser Ligado (ou Elevado) ou Não ligar (ou

Não elevar). Caso esta primeira RNA indique que o ECT não deva ser ligado, uma segunda Rede Neural (RNA-2) é acionada, especializada em indicar se o ECT deve ser Desligado (ou Reduzido) ou Não manobrado. Esta segunda RNA ficará responsável em separar os dados que a segunda hipótese teve dificuldades.

Para o SADECT do estudo de caso este modelo será constituído por dez (10) RNAs. Os eventos para cada RNA-1 são separados em duas classes: Não Ligar / Não Elevar (eventos Classe 0 e -1) e Ligar / Elevar (eventos Classe 1). Em cada RNA-2 os eventos são separados em outras duas classes: Desligar / Reduzir (eventos Classe -1) e Não manobrar (eventos Classe 0). As classes apresentadas são obtidas através do pré-processamento dos dados de saída.

Assim como no modelo anterior, são utilizados dados de manobras do ECT em questão e dados onde não ocorreram manobras do mesmo, não existindo limitação da quantidade de dados.

Para o treinamento da RNA-1 de cada ECT foi necessária a duplicação dos dados referentes ao evento Ligar / Elevar (Classe 1), já que a quantidade de dados referentes aos eventos de Não Ligar / Não Elevar (Desligar / Reduzir e Não manobrar) equivalem ao dobro dos dados do evento Ligar / Elevar. Esta medida teve como objetivo equilibrar os dados para os treinamentos das RNA-1.

Para o treinamento das RNA-1 e RNA-2 também serão usadas as mesmas 14 variáveis de entrada e as saídas serão elevadas para quatro (4) (duas em cada RNA).

A Tabela 34 apresenta a classificação dos eventos possíveis para as RNAs referentes ao BR(1 e 2) da STIV do modelo RNA DUPLA. Tais eventos foram apresentados previamente na Tabela 31.

Tabela 34 – Classificação dos eventos possíveis para as RNAs referentes ao BR(1 e 2) de STIV do modelo RNA DUPLA

Evento	RNA-1		RNA-2	
	Ligar (Classe 1)	Não ligar (Classe 0 e -1)	Desligar (Classe -1)	Não manobrar (Classe 0)
Não manobrar o BR(1 e 2) de STIV	0	1	0	1
Ligar o BR(1 e 2) de STIV	1	0	-	-
Desligar BR(1 e 2) de STIV	0	1	1	0

Buscando o melhor desempenho das RNAs do modelo, foram realizados diversos testes retirando e inserindo variáveis de entrada. Os resultados encontrados durante estes testes para cada ECT são apresentados nas tabelas a seguir. Os testes sombreados apresentam o melhor conjunto de entradas para a RNA de acordo com o seguinte critério:

1° - Maior acerto;

2° - Maior quantidade de entradas referentes aos ECTs da mesma estação.

Tabela 35 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o BR(1 e2) da STIV

Teste	RNA	BR(1 e2) da STIV Variáveis de Entrada	Acerto
1	RNA-1	6 Tensões	80 %
2	RNA-1	6 Tensões e Hora	82 %
3	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estado do BR(1 e 2) da STIV	87 %
4	RNA-2	6 Tensões	73 %
5	RNA-2	6 Tensões e Hora	76 %
6	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estado do BR(1 e 2) da STIV	77 %

Tabela 36 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o BC da STTP

Teste	RNA	BC da STTP Variáveis de Entrada	Acerto
1	RNA-1	Todas	88 %
2	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estado do BR(1 e 2) da STIV e do BR(5) e BC da STTP	88 %
3	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estado do BR(5) e BC da STTP	87 %
4	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	88 %
5	RNA-2	Todas	85 %
6	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados do BR(1 e 2) da STIV e do BR(5) e BC da STTP	86 %
7	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	86 %
8	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados do BR(5) e BC da STTP	86 %
9	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estado do BC da STTP	86 %

Tabela 37 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o BR(5) da STTP

Teste	RNA	BR(5) da STTP Variáveis de Entrada	Acerto
1	RNA-1	Todas	90 %
2	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	93 %
3	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estados do BR(5) e BC da STTP	90 %
4	RNA-2	Todas	86 %
5	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	89 %
6	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados do BR(5) e BC da STTP	86 %
7	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados do BR(5) da STTP	82 %

Tabela 38 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o T3 da STTP

Teste	RNA	T3 da STTP Variáveis de Entrada	Acerto
1	RNA-1	Todas	89 %
2	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	90 %
3	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estado do T3 da STTP	89 %
4	RNA-1	6 Tensões e Hora	73 %
5	RNA-2	Todas	75 %
6	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	77 %
7	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estado do T3 da STTP	73 %
8	RNA-2	6 Tensões e Hora	60 %

Tabela 39 – Resultados dos testes das RNA-1 e RNA-2 para o T2 da STTP

Teste	RNA	T2 da STTP Variáveis de Entrada	Acerto
1	RNA-1	Todas	88 %
2	RNA-1	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	88 %
3	RNA-1	6 Tensões , Hora e Estado do T2 da STTP	87 %
4	RNA-1	6 Tensões e Hora	87 %
5	RNA-2	Todas	78 %
6	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estados dos ECTs da STTP	87 %
7	RNA-2	6 Tensões, Hora e Estado do T2 da STTP	74 %
8	RNA-2	6 Tensões e Hora	71 %

O resumo dos percentuais de acerto das RNAs escolhidas é apresentado na . É possível notar que para todos os equipamentos os resultados foram melhores para a RNA-1 em virtude da dificuldade em separar os eventos Não manobrar (eventos Classe 0) e Desligar / Reduzir (eventos Classe -1).

Tabela 40 – Resumo dos resultados dos testes das RNAs para o modelo RNA DUPLA

Grupo	RNA-1	RNA-2
T3 da STTP	90 %	77 %
T2 da STTP	88 %	77 %
BC da STTP	88 %	86 %
BR(5) da STTP	93 %	89 %
BR(1 e 2) da STIV	87 %	77 %

Os resultados dessa modelagem, superiores aos resultados das outras modelagens, foram considerados satisfatórios em virtude da complexidade do problema.

A próxima seção apresenta uma discussão sobre todos os resultados obtidos pelos modelos testados neste trabalho.

4.3.4. Discussão dos Resultados

O modelo inicial testado para o SADECT, RNA CENTRAL, apresentava uma RNA principal responsável em identificar a manobra de todos os ECTs do SEP do estudo de caso. O principal motivo para o baixo percentual de acerto deste modelo, da ordem de 40 %, foi a semelhança da dispersão dos valores de cada tensão em relação às Classes de saída referentes às manobras dos ECTs (eventos Classe 1 e -1). O modelo RNA ÚNICA foi criado para solucionar este problema.

O modelo RNA ÚNICA representa, basicamente, a divisão da RNA principal do modelo anterior em várias, apresentando uma RNA para cada ECT. Com esta divisão os dados de entrada de cada ECT são separados dos demais, facilitando o treinamento das RNAs. Embora tenha apresentado melhores resultados, 70 % em média, os mesmos foram ainda considerados insuficientes. O fato principal que prejudicou os resultados deste modelo foi a semelhança da dispersão dos valores de cada tensão em relação às saídas referentes aos eventos Não Manobrar / Não Elevar (eventos Classe 0) e Desligar / Reduzir (eventos Classe -1).

Para a solução deste segundo problema foi realizada a divisão de cada RNA referente a um ECT em duas, criando um terceiro modelo, RNA DUPLA. Com esta segunda divisão os dados de entrada de cada ECT referentes aos eventos Não Manobrar / Não Elevar (eventos Classe 0) e Desligar / Reduzir (eventos Classe -1) são separados.

Das três modelagens apresentadas para o SADECT e testadas neste capítulo, a terceira apresentou os melhores resultados, com RNAs apresentando mais de 90 % de acerto.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi apresentada a tarefa do controle de tensão realizado pelos operadores de tempo real dos Centros de Operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), o Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro. Esta tarefa tem como principal objetivo manter os níveis de tensão dos diversos barramentos do SIN dentro dos limites pré-estabelecidos, garantindo energia elétrica de qualidade aos consumidores.

O controle de tensão em tempo real é uma tarefa complexa. O que o torna complexo, principalmente, é a quantidade de variáveis não lineares relacionadas ao problema, como por exemplo valores de tensão e de potência reativa. Não bastando a quantidade, tais variáveis têm seus valores alterados continuamente. Em virtude do exposto, um operador iniciante só inicia a sua realização após, em média, dois anos de experiência.

Com o objetivo de diminuir o tempo de treinamento de novos operadores e auxiliar o processo decisório dos operadores de tempo real, neste trabalho se desenvolveu um sistema de apoio à decisão no controle de tensão, o SADECT. Este sistema se baseia na técnica de Redes Neurais, uma vez que esta é muito utilizada na solução de problemas não lineares e complexos.

Para verificar a viabilidade do SADECT foi escolhida uma região do SIN, a Interligação Sul/Sudeste. Esta região é bastante importante, pois interliga dois grandes SEPs do SIN, além de transmitir, em 765 kV, a energia elétrica gerada na usina hidroelétrica (UHE) Itaipu. Esta interligação possui diversos equipamentos de controle de tensão (ECTs) que são utilizados continuamente pelos operadores durante o controle de tensão dos SEPs Sul e Sudeste, tais como:

- ✓ 10 unidades geradoras - **(10 x UG)** da UHE Itaipu;
- ✓ 1 compensador síncrono **(CS)** da subestação Tijuco Preto (STTP);

- ✓ 9 bancos de capacitores (**9 x BC**) da STTP;
- ✓ bancos de reatores de barra (**BR3 e BR4**) das subestações Ivaiporã (STIV) e Itaberá (STIA);
- ✓ 6 bancos de reatores (**3 x BR1 e 3 x BR2**) da STIV;
- ✓ bancos de reatores (**2 x BR5**) da STTP;
- ✓ 23 tapes (**T1**) da STIV;
- ✓ 23 tapes (**T2**) da STTP; e
- ✓ 30 tapes (**T3**) da STTP.

Dos valores de tensão disponíveis nos barramentos desta interligação foram considerados como mais importantes:

- ✓ STIV 765 kV – VT (medida nos capacitores série com saída para STFI);
- ✓ STIV 765 kV – VI (medida nos capacitores série com saída para STIA);
- ✓ STIA 765 kV;
- ✓ ITAIPU 500 kV;
- ✓ STIV 500 kV;
- ✓ STTP 500 kV; e
- ✓ STTP 345 kV;

Através de um processo de mineração de dados foram retiradas, de um histórico de sete meses, as informações utilizadas pelos operadores no momento em que os mesmos realizaram as manobras dos ECTs para o controle de tensão. Nestas informações foram encontrados os valores das tensões dos barramentos da interligação, a condição operativa dos ECTs e o horário em que foi realizada a manobra.

Desta forma, o treinamento do SADECT foi realizado utilizando-se dados reais de um sistema real.

Por falta de dados, não foi possível incluir no SADECT as ações realizadas nos seguintes ECTs: unidades geradores da UHE Itaipu, compensador síncrono da STTP e bancos de reatores de barra da STIA. O valor da tensão ITAIPU 500 kV também não foi utilizado como variável de entrada, pois para todos os eventos não apresentou distinção nos seus valores.

Retirados esses dados, montou-se o banco de dados com o total de 14 variáveis de entrada para o SADECT, que apoiará na decisão da realização de manobras de 5 ECTs do SEP do estudo de caso

Este banco de dados foi criticado e pré-processado para viabilizar o seu uso no treinamento das Redes Neurais. A crítica garantiu que os dados inválidos não fossem utilizados e o pré-processamento os normalizou e classificou.

Em busca da melhor metodologia para a confecção do SADECT, foram criados três modelos: RNA CENTRAL, RNA ÚNICA e RNA DUPLA. A ordem em que os modelos foram apresentados indica a evolução da modelagem do SADECT.

O primeiro modelo, por utilizar todos os dados concentrados em uma RNA principal, apresentou baixo rendimento, acertando em média 40 % dos eventos. Com a separação dessa RNA principal em cinco RNAs, uma para cada ECT, criou-se o modelo RNA ÚNICA e o acerto da modelagem aumentou para 70 %. Com o objetivo de elevar ainda mais o percentual de acerto, foi criado o terceiro modelo, RNA DUPLA, que utilizou duas RNA para cada ECT. Este último modelo apresentou acerto superior a 90 % para algumas RNAs, e 82 % para todo o SADECT.

A condição de que os dados obtidos representem as ações de diversos operadores é um fator importante que deve ser levado em conta quando se analisam os resultados deste último modelo. Em virtude da complexidade do problema, os operadores não realizam o controle de tensão de forma idêntica, uma vez que os mesmos não possuem exatamente a mesma experiência. Essa diferença resulta em regras um pouco diferentes de operador para operador, porém sempre como o mesmo objetivo: o controle das tensões dos barramentos.

Face ao exposto conclui-se que foram encontrados bons resultados com o terceiro modelo. A mostra um resumo desta modelagem para cada ECT e a próxima seção introduz possíveis trabalhos futuros para a melhoria dos resultados.

Tabela 41 – Resumo das RNAs do modelo RNA DUPLA

ECT: T3 da STTP			
RNA	Quantidade de entradas	Classifica entre os eventos	Acerto
RNA-1	11	Não Elevar E Elevar	90 %
RNA-2	11	Reduzir E Não manobrar	77 %

ECT: T2 da STTP			
RNA	Quantidade de entradas	Classifica entre os eventos	Acerto
RNA-1	11	Não Elevar E Elevar	88 %
RNA-2	11	Reduzir E Não manobrar	87 %

ECT: BC da STTP			
RNA	Quantidade de entradas	Classifica entre os eventos	Acerto
RNA-1	11	Não Ligar E Ligar	88 %
RNA-2	11	Desligar E Não manobrar	86 %

ECT: BR(5) da STTP			
RNA	Quantidade de entradas	Classifica entre os eventos	Acerto
RNA-1	11	Não Ligar E Ligar	93 %
RNA-2	11	Desligar E Não manobrar	89 %

ECT: BR(1 e 2) da STIV			
RNA	Quantidade de entradas	Classifica entre os eventos	Acerto
RNA-1	11	Não Ligar E Ligar	87 %
RNA-2	11	Desligar E Não manobrar	77 %

5.2. Trabalhos Futuros

Embora a modelagem obtida tenha apresentado bons resultados, alterações nos dados de entrada e até na própria modelagem do SADECT podem trazer melhorias.

A impossibilidade de usar as ações de controle de tensão, realizadas pelos operadores de tempo real, utilizando a potência reativa do Compensador síncrono da subestação Tijuco Preto e das Unidades geradoras da UHE Itaipu, pode ter trazido prejuízos aos resultados. Desta forma, sugere-se a inclusão destas informações nos próximos modelos.

Neste trabalho foi testada a implementação do SADECT na Interligação Sul/Sudeste. Vislumbra-se a implementação do SADECT em Sistemas Elétricos de Potência ainda mais complexos, com maior número de barramentos e equipamentos de controle de tensão.

Para o SADECT não foram criados critérios que priorizassem a saída de uma ou outra Rede Neural. Tais critérios, importantes no processo de decisão, impediriam que mais de uma Rede Neural indicasse a necessidade de realizar manobra de controle de tensão. Para a inclusão desses critérios pode-se utilizar outras técnicas de Inteligência Computacional (IC) em conjunto com Redes Neurais, criando, por exemplo, um modelo *Neuro-Fuzzy*.

Além das citadas, outras técnicas de IC podem ser utilizadas, como: Algoritmos Genéticos (para a otimização das manobras de controle de tensão) e Máquinas de Vetor Suporte (muito utilizadas na solução de problemas de classificação).

A utilização no SADECT de uma Rede Neural para cada período de carga (leve/mínima, média ou pesada) pode trazer melhoria nos resultados, pois os procedimentos dos operadores são diferentes em cada um destes períodos.

A utilização do SADECT em tempo real constituirá um passo importante para a criação de um Controle Coordenado de Tensão para o SIN.

Referências bibliográficas

AGGOURE, M., El-Sharkawi e outros (1991). *Preliminary Results on Using Artificial Neural Networks for Security Assessment*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, N. 2, B, pp. 890-896.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2001). *RESOLUÇÃO Nº 505, Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente*, Novembro, 14p.

AQUINO, R. R. B., M. A. Carvalho e B. A. Souza (1999). *Redes Neurais de Hopfield como Ferramenta de Otimização Aplicado ao Despacho Hidrotérmico*, IV Congresso Brasileiro de Redes Neurais, ITA, São José dos Campos – SP, Julho, pp. 170-175.

CIGRE Task Force 38.06.06 (1995). *Artificial Neural Networks for Power Systems*, ELECTRA, Abril, N. 159.

ELETRONBRAS – Centrais Elétricas brasileiras S.A. (1990). *Controle de Tensão em Regime Permanente*, Operação de Sistemas de Potência, Vol. 8, 70p.

STEVENSON W. D. (1975) – *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGraw-Hill.

GUBINA, A.F., Gubina, F. (1999). *ANN in local secondary voltage control concept Neural Networks*. IJCNN '99. International Joint Conference, Vol. 5, Julho, pp. 3414 – 3418.

HAQUE, M. T. e A. M. Kashtiban (2005). *Application of Neural Networks in Power Systems; A Review*. Transactions on Engineering, Computing And Technology, Vol. 6, Junho, pp. 1305-5313.

HAYKIN, S. (1999). *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*. Mcmillan College Publishing Co.

HECKE, J. V. , N. Janssens, J. Deuse, and F. Promel (2000). *Coordinated Voltage Control, Experience in Belgium*, Paris, France: CIGRÉ Session, Setembro, pp. 38–111.

HORNIK, K., Stinchcombe, M, White, H. (1989). *Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators*, Neural Networks, Vol. 2, pp. 359-366.

KUMAR, A. B., A. Ipakchi e outros (1991). *Neural Networks for Dynamic Security Assessment of Large-Scale Power Systems: Requirements Overview*. “Proceedings of the First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems”, Seattle, Julho, pp. 65-71.

MITCHELL, T.M. (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill.

MOMOH, J. A. e Mohamed E. E. (2000). *Electric Systems, Dynamics, and Stability with Artificial Intelligence Applications*. Marcel Dekker, Inc.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico (2007). *Procedimentos de Rede*, disponível em www.ons.org.br.

RAMOS, M. A. F., M. M. B. R. Vellasco e M. A. C. Pacheco (2003). *Sistemas de Identificação e Localização de Falhas em Linhas de Transmissão baseado em Redes Neurais*, SNPTEE: XVII –Grupo V - Proteção, Medição e Controle em Sistemas de Potência, Uberlândia – MG, 6p.

TARANTO, G. N., N. Martins, D. M. Falcão, A.C.B. Martins, & M.G. Santos (2000). *Benefits of applying secondary voltage control schemes to the Brazilian system*, Proc. of the IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, USA, Julho, pp. 937-941.

TARANTO, G. N., A. B. Marques e D. M. Falcão (2002). *Coordinated Voltage Control Using Fuzzy Logic*, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 3, pp. 1314-1317.

VELLASCO, M. M. B. R., M. A. C. Pacheco e outros (2004). *Electric Load Forecasting: Evaluating the Novel Hierarchical Neuro-Fuzzy BSP Model*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, (ISSN 0142-0615), Vol. 26, No. 2, pp. 131-142.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)