

### 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.

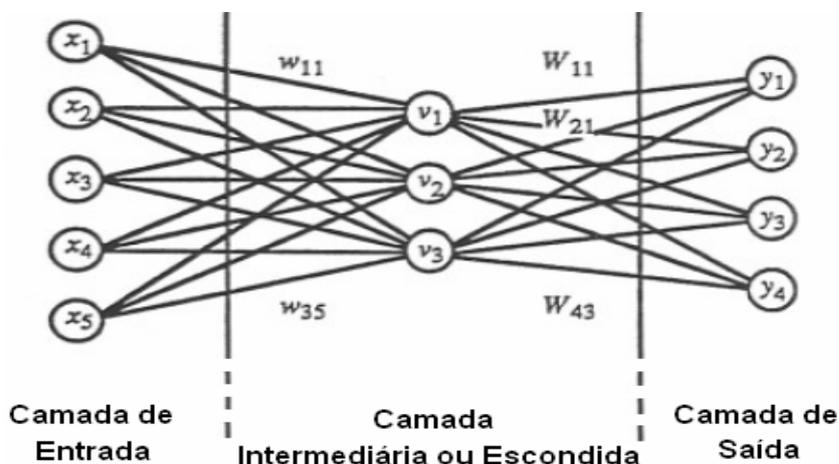


Figura 15– Exemplo de RNA

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*.

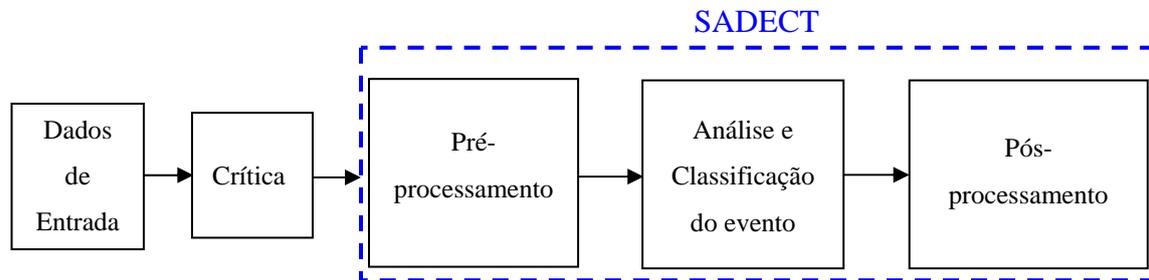


Figura 16– Módulos do SADECT

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).

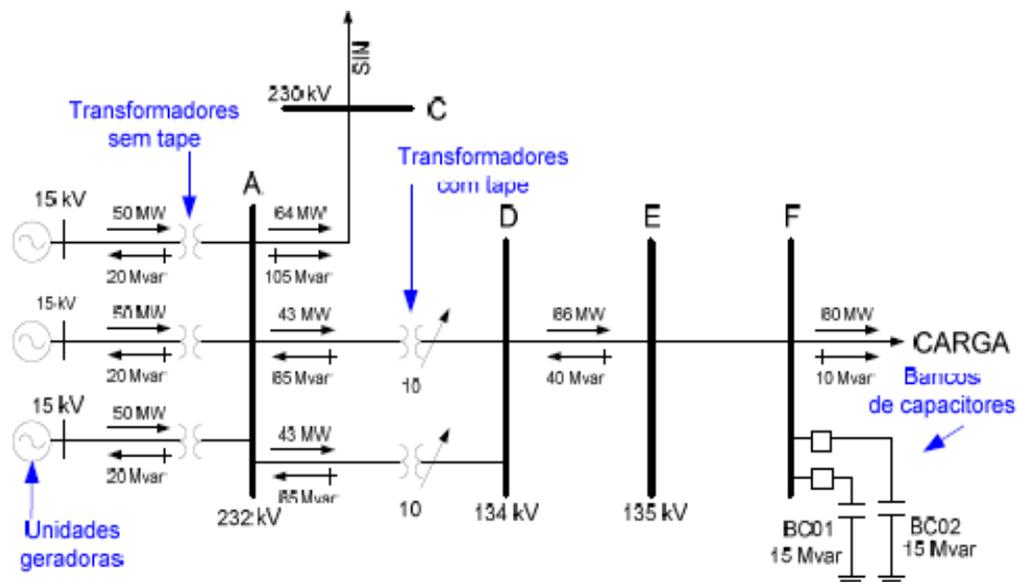


Figura 17– SEP exemplo

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

<b>Hora</b>	<b>Tensão barramento D (kV)</b>	<b>Tensão barramento F (kV)</b>	<b>Potência reativa das unidades geradoras</b>	<b>Posição dos tapes</b>	<b>Estado do BC01</b>	<b>Estado do BC02</b>
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.

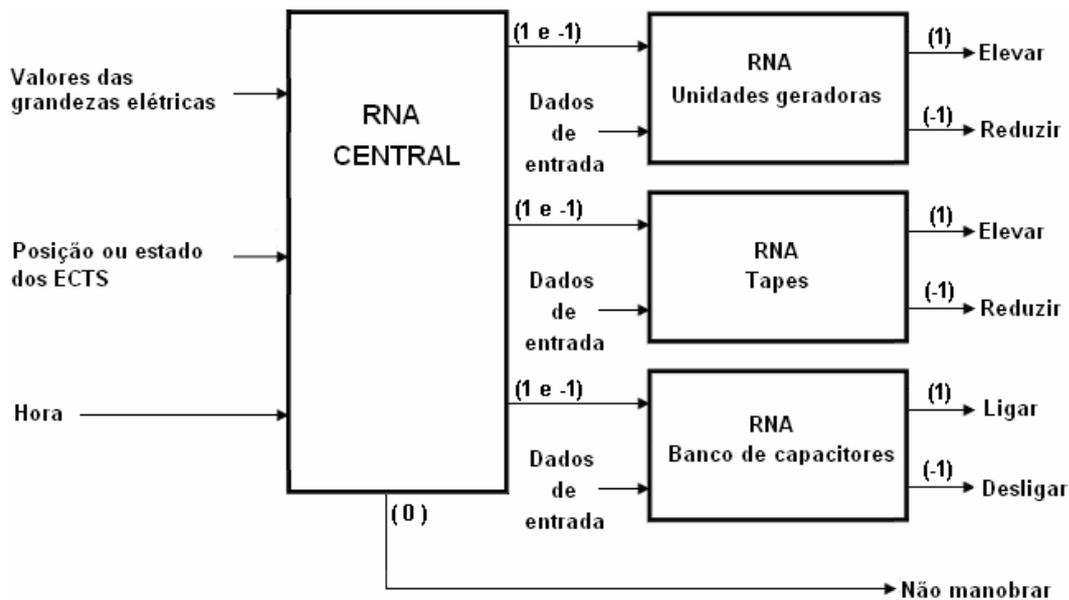


Figura 18 – Modelo RNA CENTRAL para os ECT do SEP exemplo

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.

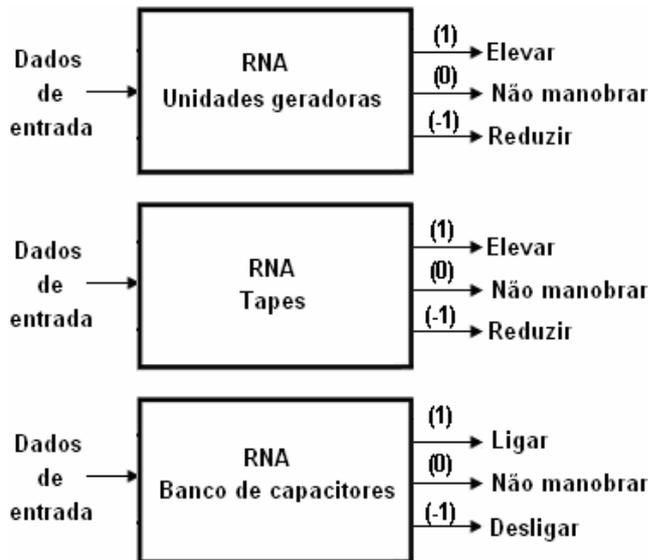


Figura 19 – Modelo RNA ÚNICA para os ECT do SEP exemplo

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.

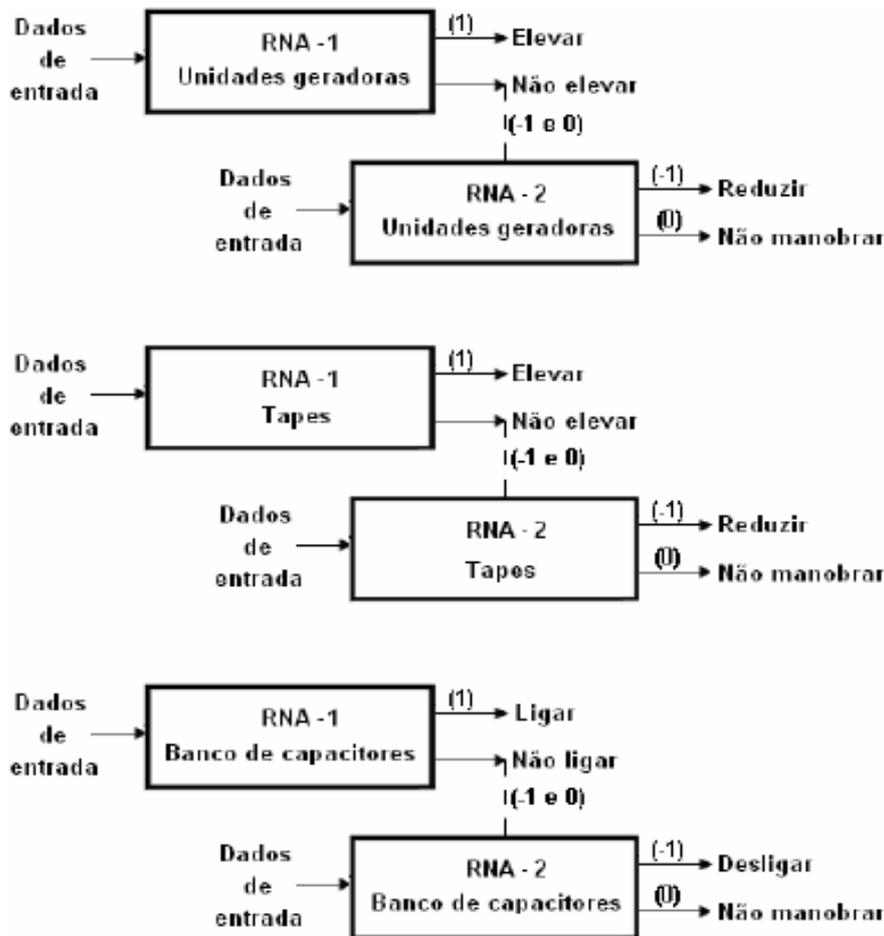


Figura 20 – Modelo RNA DUPLA para os ECTs do SEP exemplo

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.

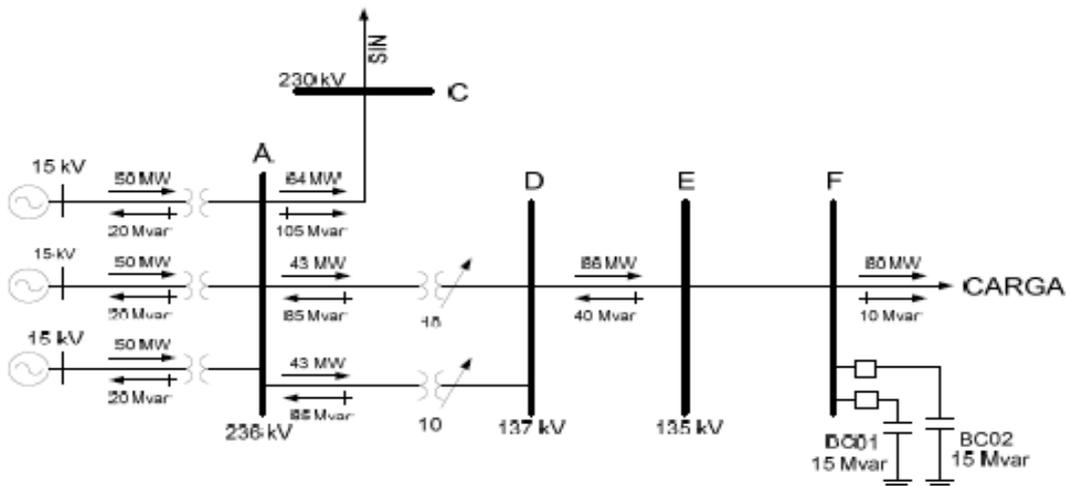


Figura 21 – SEP exemplo após a entrada de 20 MW de carga

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	<b>0,7</b>
Sim	0	0	0	<b>1</b>

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

Tabela 10 – Exemplos de saídas para o modelo RNA ÚNICA

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

Tabela 11 – Exemplos de saídas para o modelo RNA DUPLA

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

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.