



MÉTODO PARA IDENTIFICAÇÃO EM TEMPO REAL DA QUEDA
INVOLUNTÁRIA DE BARRAS DE CONTROLE EM REATORES PWR

Thiago Juncal de Souza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Alessandro da Cruz Gonçalves
Daniel Artur Pinheiro Palma

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013

MÉTODO PARA IDENTIFICAÇÃO EM TEMPO REAL DA QUEDA
INVOLUNTÁRIA DE BARRAS DE CONTROLE EM REATORES PWR

Thiago Juncal de Souza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Alessandro da Cruz Gonçalves, D.Sc.

Dr. Daniel Artur Pinheiro Palma, D.Sc.

Prof. Aquilino Senra Martinez, D.Sc.

Prof. Hermes Alves Filho, D.Sc..

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2013

Souza, Thiago Juncal

Método para Identificação em Tempo Real da Queda Involuntária de Barras de Controle em Reatores PWR/
Thiago Juncal de Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XII, 83 p.: il; 29,7 cm.

Orientador: Alessandro da Cruz Gonçalves

Daniel Artur Pinheiro Palma

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 71-73.

1. Sistema de Identificação de Barra de Controle. 2. Equação da Difusão de Nêutrons. 3. Método Nodal. I. Gonçalves, Alessandro da Cruz *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

DEDICATÓRIA

A Minha avó

Stella F.M. Juncal (in memorian)

Eu sempre soube que deveria ser algo perto do que ela foi.

Por que raros foram tão bons quanto ela.

Raríssimas foram mães como ela.

Rarésimas foram tão boas avós como ela.

Raríssimas foram tão boas pessoas como ela.

E não existe outra palavra inventada para falar quão rara e cara ela me foi.

A ausência dela não tem nome.

Mas a presença dela iluminou de um modo que eu jamais vou saber descrever.

Como jamais saberei escrever o que ela significou para mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial a minha mãe, Regina Célia F. M. Juncal, a mulher que com muita luta, trabalho e principalmente amor foi a grande responsável por tudo isso.

Agradeço a Deise Pimenta, namorada e companheira que me apoiou nos momentos difíceis com paciência e compreensão ao longo deste trabalho.

Aos meus familiares que me deram suporte em minhas iniciativas e a meu pai que mesmo distante contribuiu para que isso fosse possível.

Agradeço ao professor Alessandro da Cruz Gonçalves pela orientação, amizade e dedicação, sem os quais a realização deste trabalho não teria sido possível.

Agradeço ao Daniel Arthur Pinheiro Palma pela orientação, amizade e contribuição no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço desde já aos professores, Aquilino Senra Martinez pelos conselhos, idéias e sugestões no decorrer do trabalho, ao professor Canedo pelas contribuições no MATLAB e ao professor Fernando Carvalho pelos ensinamentos transmitidos.

Faço um agradecimento também a todos os funcionários da secretaria do Programa de Engenharia Nuclear que sempre me foram muito atenciosos em especial a Liliane (Lili), Josevalda (Jô) e Washington.

Aos colegas do LMP (Laboratório de Monitoração de Processos) do Programa de Engenharia Nuclear COPPE/UFRJ.

Agradeço também ao grande amigo de toda hora, Edson Henrice que esteve junto comigo durante toda essa jornada

A todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, na realização desse trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MÉTODO PARA IDENTIFICAÇÃO EM TEMPO REAL DA QUEDA
INVOLUNTÁRIA DE BARRAS DE CONTROLE EM REATORES PWR

Thiago Juncal de Souza

Fevereiro/2013

Orientadores: Alessandro da Cruz Gonçalves
Daniel Artur Pinheiro Palma

Programa: Engenharia Nuclear

O acidente de queda de uma barra de controle em um reator do tipo PWR em operação produz um desequilíbrio na distribuição de potência nuclear. Este tipo de acidente pode levar a usina a uma operação insegura. Logo, é de suma importância identificar rapidamente a barra caída, de forma a minimizar os efeitos indesejáveis.

Os detectores externos que auxiliam na operação do reator, respondem não só a variação do nível de potência mas também as variações na distribuição de potência no núcleo.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para a identificação em tempo real da queda involuntária de barras de controles em reatores PWR. O método consiste na utilização de ferramentas de reconhecimento de padrão, que permitam a identificação da queda inadvertida da barra de controle a partir das respostas dos detectores externos.

As respostas do método, assim como o comportamento das respostas dos detectores externos demonstram a sua viabilidade, contribuindo para condições de operação menos limitantes e o funcionamento mais seguro de reatores do tipo PWR.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

METHOD TO IDENTIFICATION OF CONTROL ROD DROPS IN PWR REACTOR

Thiago Juncal de Souza

February/2013

Advisors: Alessandro da Cruz Gonçalves

Daniel Artur Pinheiro Palma

Department: Nuclear Engineering

The control rod drop event in a PWR reactor produces a distortion in the distribution of nuclear power. This kind of event induces a nuclear reactor unsafe operation condition. Therefore, it is important to quickly identify the control rod dropped, in order to minimize undesirable effects. Ex-Core detector responds not only the variation of power level, but also core power distribution. Thus, provide information about core operation.

The objective of this study is to develop a method to identify on-line the control rod drop in PWR core. The method consists of using pattern recognition to identify the control rod drop based on the ex-core detector responses.

Responses from the method, as well as the behavior of the responses of the ex-core detectors demonstrate the feasibility of the method, contributing to less limiting operating conditions and safer operation of the PWR reactors.

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	01
Capítulo 2 – Evento de Queda de uma Barra de Controle.....	04
2.1 Circuito Primário.....	05
2.2 Sistema de Controle do Reator.....	09
2.3 Mecanismo de Acionamento de Barras de Controle.....	12
2.4 Sistema de Proteção.....	13
2.5 Detectores Externos.....	14
2.6 Cálculo das Respostas nos Detectores Utilizando os Fatores Pesos.....	16
2.7 O Acidente da Queda de uma Barra de Controle.....	21
Capítulo 3 – Formulação de Cálculo da distribuição de Potência pelo método NEM.....	23
3.1 CNFR (Código Nacional de Física de Reatores).....	23
3.2 Método de Expansão Nodal (NEM).....	24
3.2.1 Equação de Balanço Nodal.....	26
3.2.2 Equações de Acoplamento Nodal.....	28
3.2.3 Coeficientes Primários.....	30
3.2.4 Coeficientes da Fuga Transversal e do Termo de Diferença.....	32
3.2.5 Coeficientes Secundários.....	32
3.2.6 Correntes Parciais de Saída e Fluxo Médio Nodal.....	32
3.3 Cálculo da Distribuição de Potência.....	34
Capítulo 4 – Método Proposto.....	36
4.1 Redes Neurais Artificiais - RNA.....	38
4.1.1 Rede Neural de Multicamadas.....	38
4.1.2 Rede Neural de Base Radial.....	41
4.2 Sistema Especialista.....	43

4.2.1	Representação do Conhecimento.....	44
4.2.2	Motor de Inferência.....	45
Capítulo 5 – Metodologia e Implementação.....		47
5.1	Simulações das Respostas dos Detectores Externos.....	47
5.2	Implementação do Método utilizando Rede Neural de Base Radial.....	52
5.3	Implementação do Método utilizando Sistema Especialista.....	54
Capítulo 6 – Resultados.....		57
6.1	Resultados Obtidos Utilizando Redes Neurais de Base Radial.....	58
6.1.1	Fase de Treinamento.....	58
6.1.2	Fase de Testes.....	61
6.2	Resultados Obtidos Utilizando o Sistema Especialista.....	64
Capítulo 7 – Conclusões.....		68
Referências Bibliográficas.....		71
Anexo 1.....		74
Anexo 2.....		75
Anexo 3.....		82

FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de uma usina PWR.....	04
Figura 2.2	Elemento Combustível com um feixe de barras de controle inserido.....	06
Figura 2.3	Posicionamento das Barras de Controle.....	10
Figura 2.4	Eixo de Acionamento de Barra de Controle.....	13
Figura 2.5	Posicionamento dos detectores.....	15
Figura 3.1	Representação de um Nodo.....	26
Figura 4.1	Relação das respostas dos 4 detectores com a barra de controle caída.....	37
Figura 4.2	Neurônio Artificial.....	39
Figura 4.3	Esquema de uma Rede Neural de Multicamadas.....	41
Figura 4.4	Comparação entre as classificações de padrões das redes MLP e RBF.....	43
Figura 4.5	Diagrama do Sistema Especialista.....	44
Figura 4.6	Motor de Inferência no Encadeamento para frente.....	46
Figura 5.1	Representação dos elementos combustíveis periféricos.....	48
Figura 5.2	Mapeamento da rede.....	53
Figura 5.3	Resposta dos detectores em cenários de queda de barra em alguns instantes de queima.....	55
Figura 5.4	Mapeamento do Sistema Especialista.....	56
Figura 6.1	Resposta da Rede para o Treinamento no 1º instante de queima.....	59
Figura 6.2	Resposta da Rede para o Treinamento no 4º instante de queima.....	59
Figura 6.3	Resposta da Rede para o Treinamento no 9º instante de queima.....	60
Figura 6.4	Resposta da Rede para o Treinamento no 16º instante de queima.....	60
Figura 6.5	Resposta da Rede para o conjunto de dados de teste.....	62
Figura 6.6	Erros da Rede para o conjunto de dados de teste.....	63
Figura 6.7	Resposta do Sistema Especialista aos Testes.....	65
Figura 6.8	Erro de Diagnóstico do Sistema Especialista.....	66
Figura 6.9	Comportamento dos detectores em cenários de queda de barra de controle	67
Figura A1	Resposta dos detectores em cenários de queda de barra de controle para os instantes de queima simulados.....	83

TABELAS

Tabela 5.1 Dados Referentes ao 14º instante de queima.....	50
Tabela 5.2 Representação Numérica das Barras de Controle.....	51
Tabela 6.1 Instantes de Queima Simulados.....	58
Tabela 6.2 Barras de Controle não identificadas corretamente.....	63
Tabela A1 Bancos de Barras de Controle.....	82

NOMENCLATURA

APA:	ALPHA Phoenix ANC System – Westinghouse
CNFR:	Código Nacional de Física de Reatores
DNB:	Departure from Nucleate Boiling
FSAR:	Final Safety Analysis Report
MATLAB:	Matrix Laboratory
MLP:	feed-forward Multilayer Perception / Rede Perception de Multicamadas
NEM:	Nodal Expansion Method
PWR:	Pressurized Water Reactor
RBF:	Radial Basis Function / Funções de Base Radial
RNA:	Redes Neurais Artificiais
SIC:	Sistema de Instrumentação e Controle
SE:	Sistema Especialista
GEDAN:	Sistema de Geração de Dados Nucleares
GEDAR:	Sistema Geração de Dados do Reator

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A geração nuclear de energia possui alguns méritos por substituir o consumo de combustíveis fósseis, constituindo-se uma das principais fontes de energia que não emitem dióxido de carbono durante a sua operação. Porém, em contrapartida, seu processo de produção possui riscos específicos que assim como qualquer outro tipo de geração de energia, seja nas hidrelétricas ou termoeletricas, necessitam ser controlados.

Para a maior segurança e bom funcionamento de um reator nuclear é necessário analisar e mitigar eventos com relativa probabilidade de ocorrência, com o intuito de evitar que se excedam os limites operacionais seguros de uma usina nuclear. A tomada dessas medidas justificam os estudos para tornar o funcionamento de um reator nuclear mais seguro, identificando e priorizando riscos a ele associados.

O evento estudado neste trabalho é o acidente de queda involuntária de uma barra de controle no núcleo de um reator à água leve pressurizada PWR (Pressurized Water Reactor). Este evento é considerado crítico em uma usina nuclear e uma falha de frequência moderada [1].

Os reatores do tipo PWR operam com o auxílio de instrumentação nuclear que possui a finalidade de monitorar o fluxo neutrônico, fornecendo sinais para indicar o estado da operação, controle e proteção do reator. O objetivo desta dissertação consiste no desenvolvimento de um método de identificação em tempo real da queda involuntária de uma barra de controle em reatores do tipo PWR. O método é desenvolvido através das simulações das respostas dos detectores externos durante a operação de um reator nuclear do tipo PWR.

A relevância deste estudo se dá através da rapidez com que se identifica a barra caída de forma a minimizar os danos provocados por este tipo de evento. A queda de uma barra de controle produz uma perturbação na distribuição de potência do reator, que pode exceder limites relacionados à segurança da usina nuclear. Este evento pode comprometer seu funcionamento e, inclusive, tornar necessário o seu desligamento, interrompendo assim a geração de energia.

Neste trabalho, desenvolve-se uma metodologia para simular as respostas dos detectores. Após obtidas estas respostas em diferentes instantes de queima, utiliza-se de sistemas inteligentes que permitem reconhecer padrões. A identificação da barra de controle caída é feita baseada no mapeamento feito pelo método, de forma a possibilitar a sua identificação em qualquer instante de queima. Os parâmetros nucleares e as distribuições de potências do núcleo foram geradas e calculadas utilizando o Código Nacional de Física de Reatores (CNFR) [2]. O código utiliza a equação de difusão de nêutrons tridimensional, em geometria cartesiana, para dois grupos de energia e também faz uso do Método de Expansão Nodal (NEM) [2,3].

No Capítulo 2 é feita uma análise mais profunda sobre o acidente de queda de uma barra de controle assim como suas causas, consequências e os mecanismos de acionamento das barras. Também é descrito uma justificativa para validar a utilização dos elementos combustíveis periféricos e próximos aos detectores.

Já no Capítulo 3 é apresentada uma fundamentação teórica para o cálculo das distribuições de potência do reator utilizando o Método de Expansão Nodal (NEM), a metodologia utilizada pelo CNFR para calcular as distribuições de potência dos elementos combustíveis e algumas especificações técnicas relativas ao código.

O Capítulo 4 apresenta uma pequena revisão metodológica de aspectos à compreensão das ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do método.

No Capítulo 5 é descrito a metodologia para o cálculo das respostas dos detectores assim como a implementação do método através de ferramentas de reconhecimento e classificação de padrões. Nesta dissertação foram consideradas as técnicas baseadas em redes neurais artificiais e sistemas especialistas.

Os resultados, assim como discussões acerca do método são apresentados no Capítulo 6.

As conclusões e propostas de trabalhos futuros ficam a cargo do último capítulo.

CAPÍTULO 2

EVENTO DE QUEDA DE UMA BARRA DE CONTROLE

As plantas dos reatores a água leve pressurizada (PWR) possuem três circuitos principais de água: o circuito primário, o secundário e de água de circulação. Este sistema está representado esquematicamente na Figura 2.1. Os circuitos são independentes, ou seja, a água de cada um deles não entra em contato direto com a água do outro circuito. No sistema secundário é formado vapor saturado que alimenta as turbinas, movimentando-as para em seguida direcionar esse vapor para o condensador onde retorna ao seu estado líquido dirigindo-se ao gerador de vapor por meio de bombas de alimentação.

O objetivo desta dissertação se concentra principalmente no funcionamento seguro do circuito primário, que é composto por diferentes componentes, sendo o principal deles o núcleo do reator de potência.

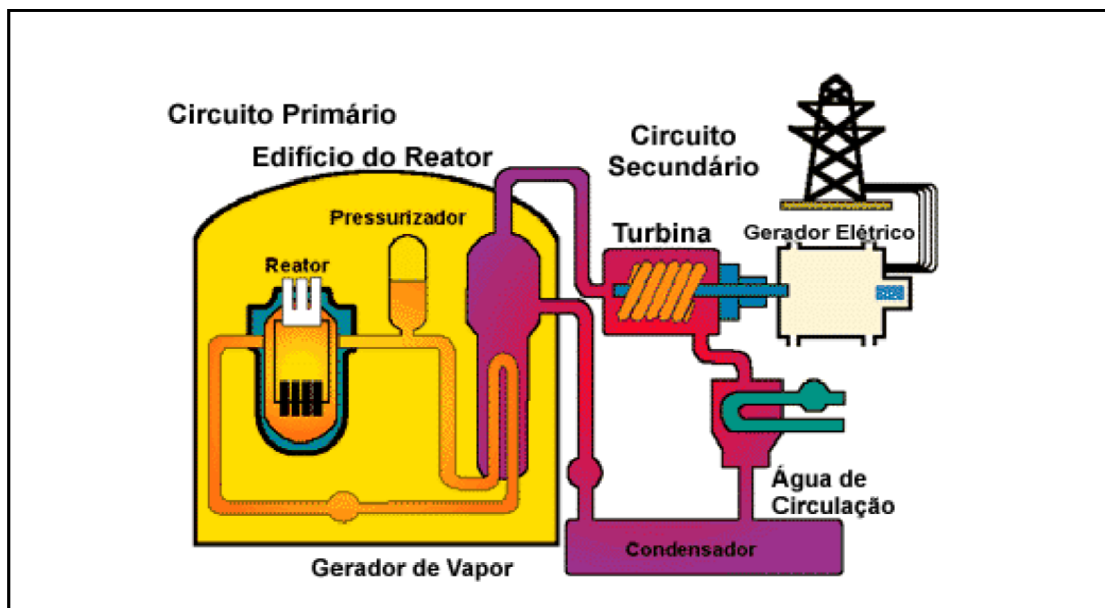


Figura 2.1 Esquema de uma usina PWR

2.1 Circuito Primário

O circuito primário de uma usina nuclear é composto principalmente pelo reator, o pressurizador e o gerador de vapor, que troca calor com o circuito secundário. A função do circuito primário é extrair o calor produzido no núcleo do reator pelas reações de fissão nuclear em cadeia, papel este que fica a cargo do refrigerante que extrai o calor continuamente do núcleo. O refrigerante é impulsionado por bombas para o interior do núcleo pela perna fria e passa pelo núcleo do reator retirando assim o calor gerado pelo mesmo. Logo após, o refrigerante é transportado para o gerador de vapor pela perna quente onde troca calor com o sistema secundário e retorna para o núcleo novamente completando o ciclo. O vapor gerado no sistema secundário é direcionado para as turbinas e conseqüentemente é gerada energia elétrica. A água no circuito primário, que nos reatores PWR agrega as funções de refrigerante e de moderador de nêutrons, é mantida a altíssima pressão pelos pressurizadores de modo a obter elevada temperatura ainda no estado líquido e evitar a geração de vapor no circuito primário.

O reator é o principal elemento do circuito primário. Ele é composto pelo núcleo onde é gerado o calor, estruturas internas que dão sustentação ao núcleo e pelo vaso de pressão, que contém esses componentes e os mecanismos de atuação das barras de controle adaptadas ao vaso [4]. Além disso, as estruturas internas dão orientação ao refrigerante durante seu percurso no interior do reator.

O núcleo dos reatores PWR é composto por elementos combustíveis que são reticulados de seção transversal quadrada que se constitui, no caso de Angra 1 por exemplo, um conjunto de 16x16 varetas. Em cada elemento combustível, como mostra a Figura 2.2 pode existir varetas de combustível, tubos guias de barras de controle e outros componentes tais como veneno queimável e fontes de nêutrons.

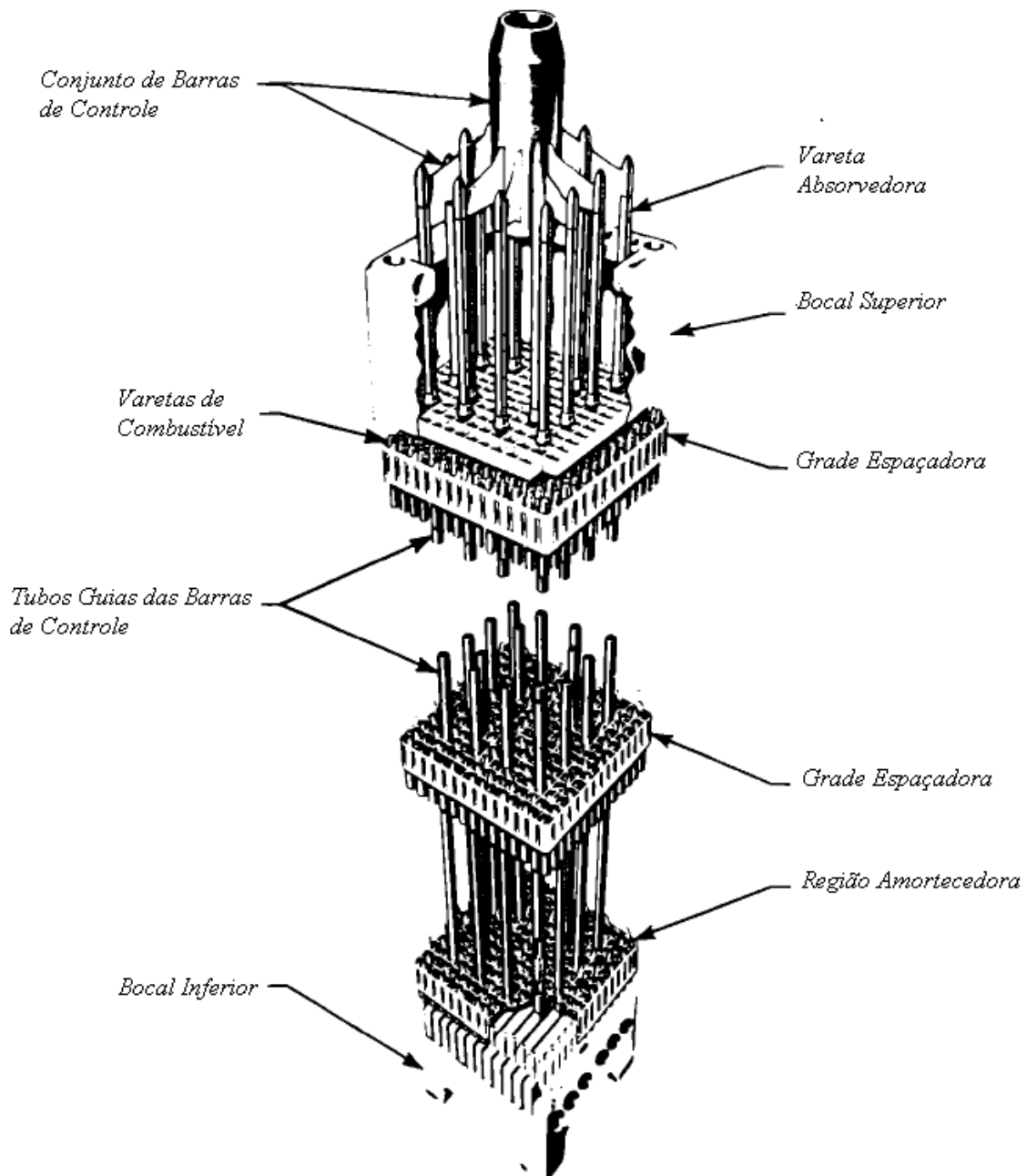


Figura 2.2: Elemento Combustível com um feixe de barras de controle inserido

Fonte: Todreas, N.E., Kazimi, M.S., 1976

Os elementos combustíveis possuem um bocal superior e inferior, onde no bocal inferior transfere-se o peso para a placa de suporte inferior, placa esta que posiciona os elementos combustíveis e dirige o refrigerante para os seus canais de refrigeração. Já o bocal superior tem a função estrutural de reunir e fixar os tubos guias e dirigir o refrigerante aquecido para os furos de escoamento da placa suporte superior do reator.

Além disso, o bocal superior possui o formato de uma caixa e consiste de uma placa inferior, superior e paredes laterais. A placa inferior é perfurada permitindo a passagem do refrigerante e nela são soldados os tubos guias das barras de controle. A placa superior possui forma quadrada com um furo central de forma a permitir a passagem do conjunto de barras de controle e do refrigerante. As paredes laterais são soldadas nas periferias das placas inferior e superior formando uma caixa onde o refrigerante é misturado.

Os tubos guias, que são feitos de Zircaloy-4, além de serem responsáveis por formar os canais para o deslocamento das barras de controle, também são responsáveis por fixarem as grades espaçadoras em suas respectivas posições atuando como elementos estruturais. As grades espaçadoras formam um reticulado quadrado onde cada célula comporta uma vareta de combustível ou um tubo guia de forma a enfeixar o elemento combustível. Para uma rápida inserção das barras de controle no caso de desligamento do reator, por exemplo, a parte superior dos tubos guias possui maior diâmetro facilitando assim o deslocamento das barras.

As varetas de combustível que compõem os elementos combustíveis são compostas por pastilhas de dióxido de urânio (UO_2) que são inseridas em tubos de Zircaloy-4, pressurizados com hélio e tamponadas nas duas extremidades. As pastilhas de UO_2 , que constituem um dos componentes básicos do núcleo, são empilhadas e comprimidas por uma mola helicoidal de aço-carbono de modo a impedir o movimento das pastilhas durante a operação de transporte e manuseio. Tais molas também fornecem espaço adicional para acomodar os gases de fissão liberados pelas pastilhas durante a operação do reator. Ligeiramente enriquecidas em torno de 3%, as pastilhas possuem aproximadamente 1 cm de diâmetro e 1 cm de altura sendo produzidas a partir do pó de dióxido de urânio e sintetizadas em condições apropriadas para tal, a fim de

obter a densidade desejada. Além disso, com o intuito de permitir a expansão axial, a base das pastilhas é feita de forma côncava.

Os elementos combustíveis dos reatores PWR possuem diferentes configurações que variam desde a presença das barras de controle, quantidade de barras de veneno queimável, células de buracos d'água e do tipo de enriquecimento. Para evitar picos de potência é distribuído veneno queimável no núcleo do reator. O veneno queimável é geralmente constituído por tubos de vidro de silicato de boro envoltos por aço inoxidável-304, tamponados em suas extremidades. As varetas de veneno queimável são inseridas nos tubos guias de elementos combustíveis que não possuem barras de controle e a quantidade de barras de veneno queimável varia entre 8, 12 ou 16 dependendo do tipo de elemento combustível.

O núcleo constituído de Angra 1, que é o núcleo de referência para o nosso estudo possui um diâmetro equivalente de 246,1 cm e uma altura de 365,76 cm, constituído por 121 elementos combustíveis, distribuídos de tal forma que se possa obter uma adequada distribuição de potência, dados os diferentes tipos de elementos combustíveis.

Com o intuito de que tal sistema descrito acima opere com devida maleabilidade e de forma segura, são necessários vários circuitos auxiliares e de controle, assim como a instrumentação para as medidas dos principais parâmetros. Dentre os sistemas diretamente ligados ao circuito primário é de maior relevância para este estudo o Sistema de Instrumentação e Controle (SIC) [4], que incorpora os sistemas de controle e proteção do reator, o sistema de instrumentação nuclear, de abastecimento de água do gerador de vapor e instrumentação interna do núcleo do reator.

2.1 Sistema de Controle do Reator

O sistema de controle da usina é constituído de vários subsistemas que se relacionam com os componentes mais importantes da usina nuclear.

O Sistema de Controle do Reator utiliza sinais de fluxo de nêutrons, temperatura do refrigerante, pressão do refrigerante e carga da turbina para o controle do reator. O controle da reatividade do núcleo do reator é realizado pela combinação dos seguintes mecanismos:

- Conjunto de Barras de Controles;
- Ácido bórico diluído no refrigerante do reator.

O ajuste grosso da reatividade é feito pela diluição de quantidades variáveis de ácido bórico no refrigerante do circuito primário, sendo adicionado ou removido do refrigerante provendo uma regulação a longo prazo de reatividade, caracterizando-se um sistema de controle químico.

As barras de controle são compostas por material absorvedor de nêutrons cuja seção de choque de absorção é relativamente alta, como carbeto de boro ou ligas de Índio-Cádmio-Prata. As barras de Cádmio (5%), Índio (15%) e Prata (80%) além de possuírem uma vida útil maior que as de carbeto de boro, não apresentam o inconveniente da produção de trítio. Revestidas de aço inoxidável- 304, as barras no reator de Angra 1 são no total 33, divididas em grupos ou bancos que são os bancos de controle e bancos de desligamento como mostra o esquema na Figura 2.3, onde é ilustrado o posicionamento das barras no núcleo e os bancos a que pertencem. As barras de desligamento são as barras correspondentes aos bancos SA e SB, os demais subgrupos A, B, C, D são responsáveis pelo controle. O acionamento das barras de controle se faz para todo um subgrupo por vez. A posição das barras em relação à inserção no núcleo do reator de Angra 1 é medida por passos retirados.

Guiadas na direção vertical, as barras de controle são ajustadas de modo que as suas profundidades de inserção no núcleo do reator modifiquem a área exposta à absorção de nêutrons, conseguindo assim reduzir ou elevar a potência do reator como se queira. As barras de controle geralmente possuem o mesmo comprimento do núcleo, de modo a que possa atuar por toda a sua extensão e colocar-se totalmente para fora do mesmo. As barras podem ser operadas manualmente ou automaticamente. O mecanismo de inserção ou retirada das barras de controle além de ser responsável pelo controle dos desvios de reatividade, também é responsável por prover o desligamento do reator. Além disso, o sistema de barras de controle é equipado com corta-circuito, que para a melhor segurança do reator em caso de perda de energia ou pane no sistema soltam-se as barras imediatamente desligando o reator pela simples ação da gravidade.

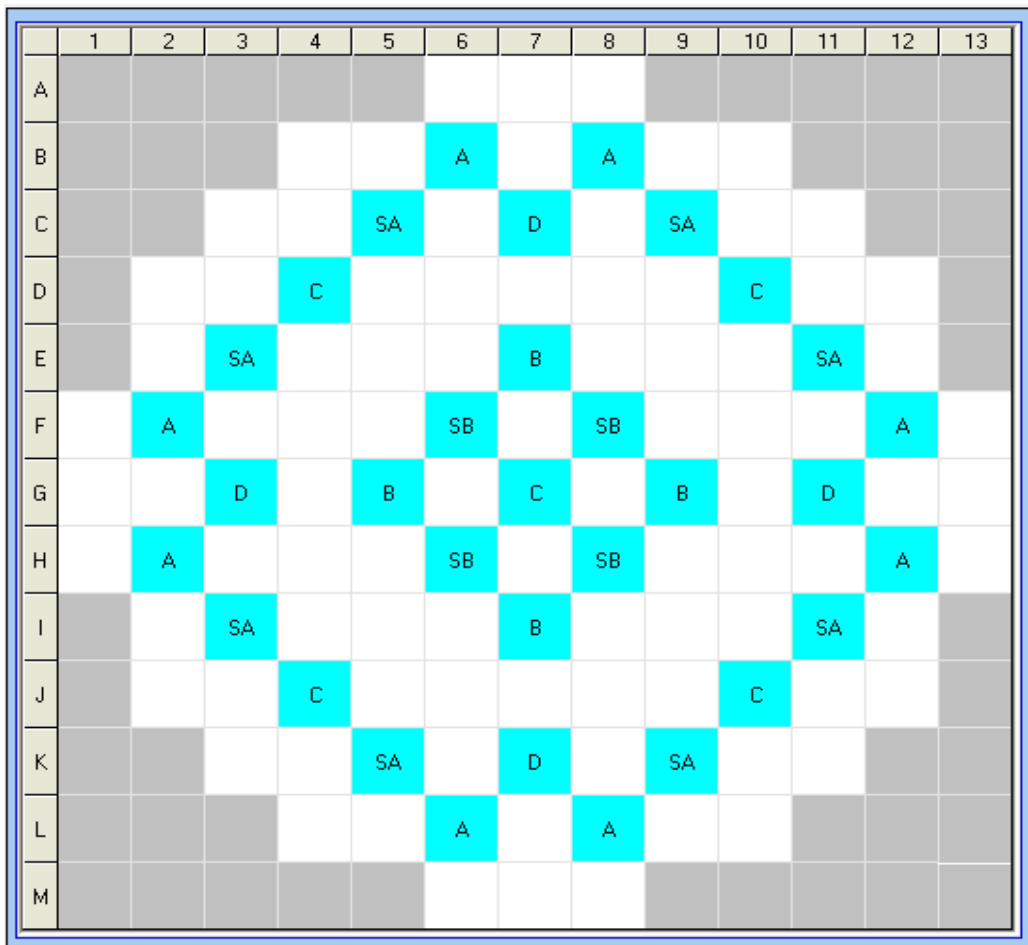


Figura 2.3: Posicionamento das Barras de Controle

As barras de controle são capazes de realizar o desligamento do reator em qualquer condição de operação, condição esta que deve ser satisfeita respeitando-se o limite de inserção das barras de controle. O limite de inserção das barras possibilitam ao operador manter as barras de controle numa posição adequada dentro do núcleo. O sistema calcula continuamente e para cada banco, um limite de inserção que é variável com a potência do reator. Assim, compara esses limites com as posições reais dos bancos, fornecendo alarmes quando os limites estão próximos de serem alcançados ou são efetivamente alcançados. Neste caso, o operador deve adicionar boro ao refrigerante e subir convenientemente o conjunto de barras de controle.

O sistema de controle equipara a temperatura média do refrigerante com a temperatura programada. A temperatura média do refrigerante varia com a carga [4]. A temperatura programada T_{ref} é obtida a partir de sinal de pressão do estágio de alta pressão da turbina, uma vez que essa pressão é proporcional à carga da turbina [4].

Outro sinal que entra no sistema de controle para o acionamento do mecanismo de barras de controle é o valor da discrepância entre as taxas de variação de carga do reator e da turbina. Um leiloador alto de potência nuclear seleciona o mais alto entre os quatro sinais da faixa de potência. Este sinal é comparado com o sinal de pressão da câmara de impulso. O sinal de saída gerado é proporcional à diferença entre as taxas de variação de potência da turbina e do reator. Logo, as discrepâncias entre $T_{méd}$ e T_{ref} e entre as taxas de variação de potência do reator e da turbina se combinam para determinar a velocidade e o sentido de movimentação das barras de controle.

Desta forma, o sistema de controle do reator envia um sinal ao mecanismo de acionamento das barras para movimentá-las, de forma a obter uma diferença entre a temperatura média do refrigerante e a temperatura programada igual a zero e casando a potência do reator com a potência do gerador.

Acionado sequencialmente e com velocidade variável, o grupo de barras de controle é capaz de prover o ajuste fino necessário à operação em regime estacionário, como é o caso da análise deste trabalho. Além disso, fornece variações rápidas de reatividade necessárias durante alguns transientes de carga.

2.3 Mecanismo de Acionamento de Barras de Controle

O Sistema de Controle de Movimentação das Barras tem a função de controlar a movimentação das barras de controle, de modo a promover as variações de reatividade necessárias a curto prazo. Este sistema de controle eletrônico mantém ou movimenta as barras de controle, de acordo com os sinais de atuação enviados pelo Sistema de Controle do Reator.

O mecanismo recebe o sinal do sistema de controle do reator e transmite comandos digitais na sequência apropriada. O sistema supre energia para que as bobinas do eixo de acionamento das barras realizem o movimento. O deslocamento de um passo é determinado pela distância entre duas ranhuras sucessivas na haste de acionamento da barra como é mostrado na Figura 2.4.

O mecanismo de acionamento das barras de controle é composto de 3 bobinas: móvel, estacionária e de içamento como mostra a Figura 2.4. O sistema pode realizar um passo de retirada ou inserção de barras de controle, alimentando as bobinas de acionamento. Para reter as barras em uma posição é provido uma alimentação para as bobinas estacionárias, onde é suprida uma tensão às bobinas das garras estacionárias do grupo de barras.

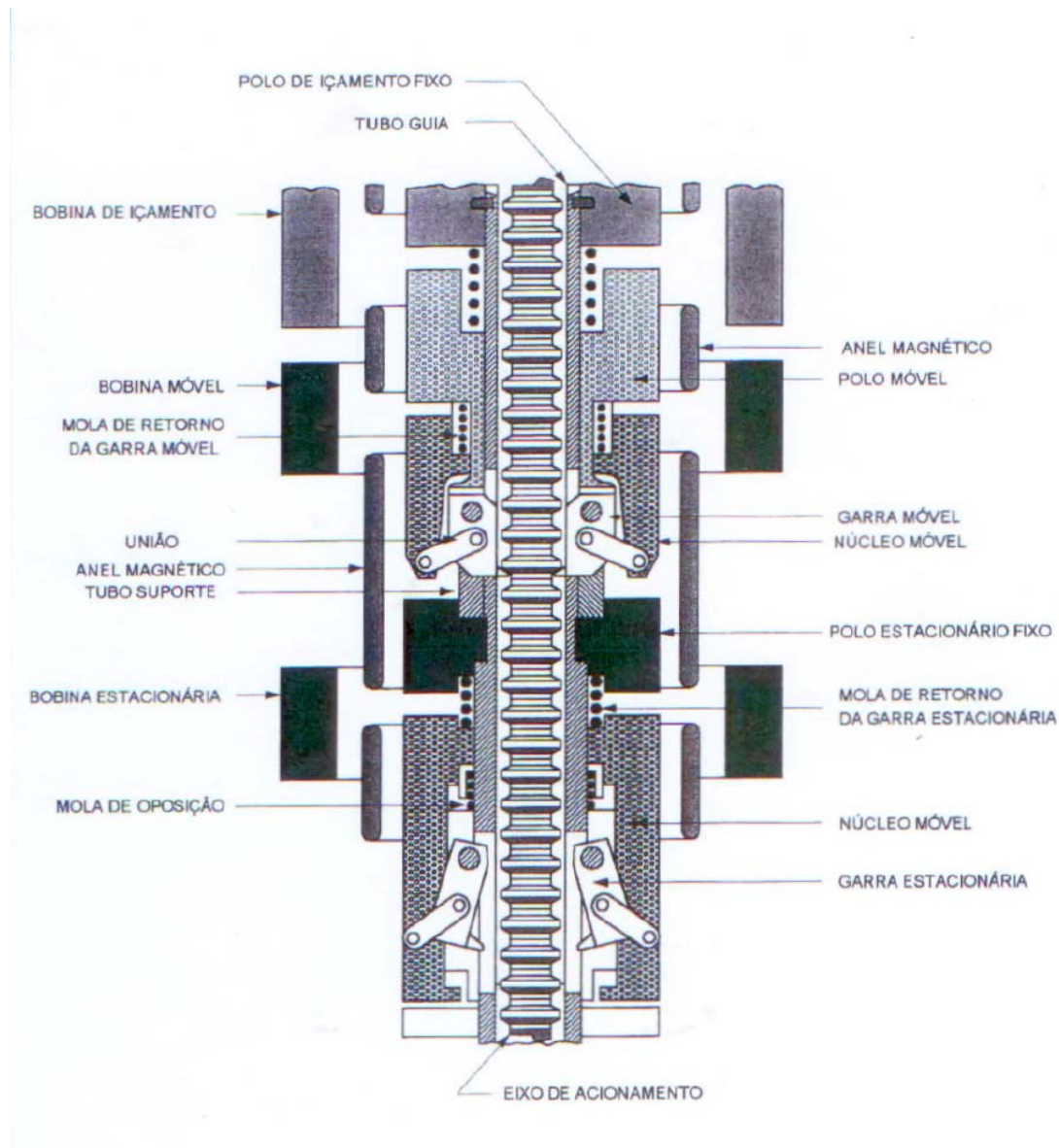


Figura 2.4: Eixo de Acionamento de Barra de Controle

2.4 Sistema de Proteção

A unidade dispõe de um Sistema de Proteção [4] do reator que é completamente independente do sistema de controle das barras. O sistema de proteção tem como objetivo evitar que danos sejam causados a usina nuclear em operação. A instrumentação indica a condição de anormalidade ao sistema de proteção que atua através de alarmes, impede a retirada de barras de controle, inicia a redução de carga do gerador, dependendo do tipo de anormalidade.

Algumas das condições e sinais que causam o bloqueio da retirada das barras de controle, redução da potência ou um possível desligamento do reator em operação pelo sistema de controle são:

- Queda de barras de controle,
- Alta taxa de aumento de potência,
- Alto fluxo de nêutrons.

Sendo que o nível de atuação do travamento da retirada das barras de controle é fixado abaixo do que provoca o seu desligamento.

A redução automática da carga da turbina pelo sistema de proteção protege o núcleo contra condições que poderiam causar um DNB menor que 1.30 [4]. Ela pode ser indicada por um sinal de queda de barras de controle ou aproximação de uma condição de sobrepotência ou sobretemperatura.

2.5 Detectores Externos

Para o bom funcionamento dos sistemas há necessidade de instrumentos de precisão que inspirem confiança para medidas do fluxo de nêutrons e para o controle do reator. Na operação de reatores tipo PWR utiliza-se o auxílio de sistemas de instrumentação nuclear que fornecem sinais para indicar o estado da operação para os sistemas de controle e de proteção do reator.

Os reatores PWR operam com o auxílio de quatro canais de potência que monitoram o fluxo neutrônico desde o nível de fonte até 120% da potência nominal. Esses quatro detectores externos de nêutrons na faixa de potência são: NE-41, NE-42, NE-43, NE-44. Os detectores externos são dispositivos desenvolvidos para detectar

nêutrons e são cobertos por boro em câmaras de ionização longas da metade para cima e da metade para baixo do núcleo e são calibrados a plena potência.

Sensíveis a nêutrons térmicos, os detectores produzem um sinal como resposta possível de ser medido e analisado. Esses detectores localizados fora do núcleo do reator estão colocados em quatro posições radiais na proteção de concreto que circunda o vaso do reator como mostrado na Figura 2.5.

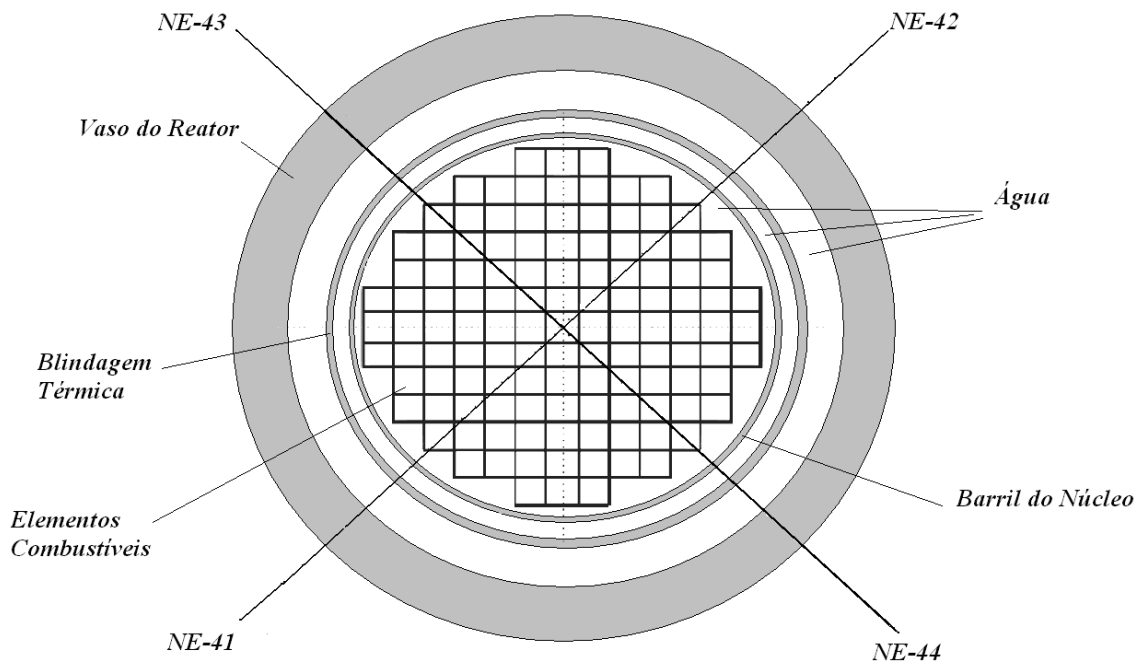


Figura 2.5: Posicionamento dos detectores

O fato dos nêutrons não possuírem carga elétrica, por conseguinte, não ionizarem os átomos do meio, torna necessária a introdução de um estágio intermediário na sequência dos acontecimentos que produzem correntes elétricas. Um modo é encher uma câmara de ionização com gás de trifluoreto de boro BF_3 . Os nêutrons térmicos são absorvidos pelo boro, especialmente pelo B^{10} , dando início a uma reação como é descrita na Equação (2.1).



O gás no interior do detector é ionizado pela radiação. Os íons produzidos são atraídos por uma diferença de potencial para as paredes do detector, gerando um pulso de corrente elétrica. Esses pulsos são contados e o seu número é proporcional à radiação que se pretende medir. A eficiência de tal detector para nêutrons térmicos é razoavelmente boa, devido à grande seção de choque de absorção do Boro [5].

Mesmo que a potência do núcleo seja constante, os detectores ainda sim são sensíveis quando há uma variação na distribuição da potência.

O ciclo de operações de um reator consiste em três estágios. O primeiro estágio constitui do reator se aproximando da criticalidade, onde se caracteriza por um baixo fluxo de nêutrons e uma elevação muito lenta do nível de potência até atingir a criticalidade. O acompanhamento é feito em função da retirada lenta dos bancos das barras de controle através do sistema automático ou manual. Esse acompanhamento é feito com o auxílio de detectores externos e nesse momento faz-se necessário também o uso de fontes para estabilizar a operação dos detectores, já que o fluxo neutrônico é muito baixo. A elevação segura e lenta deve ser garantida pela limitação da velocidade da retirada da barra de controle ou por meio de circuitos de alarme e segurança. A segunda etapa é onde se eleva a potência até o nível de operação e a terceira caracteriza-se pela operação do reator em regime estacionário. Neste trabalho, considera-se o reator operando em seu estado estacionário a plena potência, ou seja, com o fator de carga igual à unidade.

2.6 Cálculo das Respostas nos Detectores Utilizando os Fatores Pesos

Neste capítulo apresentaremos um modelo matemático para o cálculo das respostas dos detectores para uma dada distribuição de potência de um reator do tipo

PWR. Este modelo utilizado em trabalhos anteriores [6,7] faz uso da equação de transporte de nêutrons por meio da solução direta ou adjunta e os fatores pesos para o cálculo das respostas dos detectores externos. A utilização da Teoria de Transporte de Nêutrons faz-se necessário devido ao alto grau de anisotropia nas colisões de espalhamento fora do núcleo ativo do reator.

No método dos fatores peso é estabelecida uma relação direta entre a distribuição de potência do núcleo e a resposta do detector:

$$R = \int_V S(\vec{r})W(\vec{r})d\vec{r} . \quad (2.2)$$

Onde $S(\vec{r})$ é a distribuição de potência ou distribuição da fonte de fissão para todo o volume V do núcleo e $W(\vec{r})$ é o fator peso para os detectores externos.

A utilidade da Equação (2.2) é advinda de uma característica importante para a avaliação da resposta nos detectores que é a separabilidade da distribuição de fonte e das propriedades geométricas e materiais, as quais são representadas pela função peso $W(\vec{r})$. Esta suposição implica que $W(\vec{r})$ é invariante [6] para perturbações na distribuição da fonte, dentro da faixa de operação, para dado núcleo de reator e portanto, a Equação (2.2) pode ser usada para prever as variações resultantes no sinal do detector.

A seguir, será mostrado o método de cálculo das respostas dos detectores externos utilizando os fatores pesos calculados através da solução da equação de transporte de nêutrons direta [6].

A equação é representada da seguinte forma:

$$L\varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) = S(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) , \quad (2.3)$$

onde L é o operador da teoria de transporte no estado estacionário, $\varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega})$ é o fluxo angular de nêutrons e $S(\vec{r}, E, \hat{\Omega})$ é a fonte de nêutrons, todos dependentes do espaço, energia e ângulo.

O operador L atuando em $\varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega})$ é definido por:

$$L\varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) \equiv \hat{\Omega} \cdot \vec{\nabla} \varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) + \Sigma_t(\vec{r}, E) \varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) - \int_0^\infty \int_{4\pi} \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega} \rightarrow \hat{\Omega}') \varphi(\vec{r}, E, \hat{\Omega}') d\hat{\Omega}' dE' \quad (2.4)$$

sendo $\Sigma_t(\vec{r}, E)$ e $\Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \hat{\Omega} \rightarrow \hat{\Omega}')$ a seção de choque macroscópica total e de espalhamento respectivamente. O termo de fonte $S(\vec{r}, E, \hat{\Omega})$ da Equação (2.3) é escrito como:

$$S(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \chi(E) \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) . \quad (2.5)$$

Onde $\chi(E)$ é o espectro de fissão do U^{235} e $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$ a função Delta de Dirac onde \vec{r}_i é uma posição arbitrária de fonte pontual do núcleo. A Equação (2.3) apresenta a seguinte forma:

$$L\varphi_i(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) = \frac{1}{4\pi} \chi(E) \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) . \quad (2.6)$$

Com uma dada configuração do núcleo, a solução da Equação (2.6) é o fluxo angular de nêutrons $\varphi_i(\vec{r}, E, \hat{\Omega})$ devido a uma fonte localizada na posição \vec{r}_i do núcleo.

A resposta dos detectores externos também pode ser escrita em termos de uma equação geral representando a taxa de absorção de nêutrons no detector, na qual é assim definida:

$$R = (S^+, \phi) . \quad (2.7)$$

O produto interno acima define uma integral no espaço, energia e ângulo onde S^+ indica a sensibilidade do detector sendo definida por:

$$S^+(\vec{r}, E, \hat{\Omega}) = \Sigma_D \delta(\vec{r} - \vec{r}_0) \delta(E - E_{th}) . \quad (2.8)$$

Sendo Σ_D definido como a seção de choque macroscópica de absorção do material que compõe o detector (B^{10} principalmente), \vec{r}_0 um ponto qualquer localizado na posição dos detectores e E_{th} a energia térmica dos nêutrons.

Logo, utilizando a Equação (2.7), o valor da resposta R pode ser obtido por:

$$R_i(\vec{r}_0) = \Sigma_D \phi_i(\vec{r}_0, E_{th}) , \quad (2.9)$$

onde $\phi_i(\vec{r}_0, E_{th})$ é o fluxo escalar de nêutrons térmicos no ponto \vec{r}_0 do detector devido a uma fonte de fissão pontual localizada em \vec{r}_i do núcleo.

Considerando novamente que a resposta também pode ser dada em função da Equação (2.2) se substituirmos a Equação (2.5) em (2.2), já que ela se caracteriza por ser uma função delta, teremos:

$$R_i(\vec{r}_0) = W(\vec{r}_i) . \quad (2.10)$$

A função peso $W(\vec{r}_i)$ definida na Equação (2.2) é, portanto, igual a $R_i(\vec{r}_0)$ e é proporcional ao fluxo escalar de nêutrons $\phi_i(\vec{r}_0, E_{th})$ resultante da fonte de fissão pontual localizada em \vec{r}_i .

Escrevendo as funções peso em uma forma normalizada como é conveniente, obtemos:

$$W(\vec{r}_i) = \frac{R_i(\vec{r}_0)}{\int_V R_i(\vec{r}_0) d\vec{r}_i} = \frac{\phi_i(\vec{r}_0, E_{th})}{\int_V \phi_i(\vec{r}_0, E_{th}) d\vec{r}_i} . \quad (2.11)$$

Discretizando o núcleo inteiro por N elementos de volumes ΔV_i nos pontos \vec{r}_i , a equação (2.2) pode ser escrita como:

$$R = \sum_{i=1}^N \int_{\Delta V_i} S(\vec{r}) W(\vec{r}) d\vec{r} . \quad (2.12)$$

Além disso, podemos aproximar o termo fonte $S(\vec{r})$ por seu valor médio para cada elemento de volume,

$$S_i = \frac{1}{\Delta V_i} \int_{\Delta V_i} S(\vec{r}) d\vec{r} , \quad (2.13)$$

e definir a função peso volumétrica W_i por:

$$W_i = \int_{\Delta V_i} W(\vec{r}) d\vec{r} . \quad (2.14)$$

Para finalmente obtermos:

$$W_i = \frac{\phi_i(\vec{r}_0, E_{th})}{\sum_{i=1}^N \phi_i(\vec{r}_0, E_{th}) \Delta V_i} . \quad (2.15)$$

Sendo então a resposta do detector definida aproximadamente pela seguinte forma:

$$R = \sum_{i=1}^N S_i W_i , \quad (2.16)$$

onde, neste caso, o número N de elementos de volume corresponde ao número de elementos combustíveis.

Para calcularmos a distribuição de W_i e conseqüentemente a resposta R do detector, necessita-se resolver a equação de transporte de nêutrons direta N vezes.

Os resultados e conclusões deste trabalho mostram que os fatores pesos dos elementos combustíveis são invariantes para perturbações na distribuição de potência para um dado núcleo PWR. Eles por sua vez dependem apenas da posição do elemento combustível e, portanto, pode-se utilizá-los para prever as variações resultantes nas respostas dos detectores externos. Além disso, os resultados do cálculo dos fatores pesos indicam que a resposta dos detectores externos é basicamente determinada pelos cinco elementos combustíveis mais periféricos e próximos ao detector [6][7], ou seja,

eles contribuem de forma significativa para a leitura dos canais de potência. Com isso, quando se utiliza outros fatores peso relativos aos elementos combustíveis mais internos, além dos periféricos, não há alteração significativa nas respostas dos detectores.

2.7 Acidente de queda involuntária de uma barra de controle

Em um reator operando normalmente o acidente de queda involuntária de uma barra de controle leva a uma condição de operação insegura. Segundo o Relatório de Análise de Segurança de Angra I (FSAR) [1] este evento em um reator em operação é tido como um acidente de falha moderada. O acidente é considerado como crítico e pode ser causado por falha ou mau funcionamento do controle automático de acionamento das barras de controle, o que anula a capacidade de mover as barras ou de mantê-las em uma posição determinada.

Como consequência da queda indevida de uma barra de controle no núcleo tem-se uma inserção negativa de reatividade que diminui a potência e provoca uma distorção na distribuição de potência do núcleo. Esta distorção na distribuição de potência nuclear pode exceder limites termo-hidráulicos, o que comprometeriam o desempenho das varetas de combustível.

Uma das causas de ocorrência de DNB no núcleo é ter um fator de canal quente com seu limite excedido. O fator de canal quente é influenciado pela distribuição de fluxo radial e, portanto, pela posição relativa dos bancos de controle. Essa distorção causa maior geração de potência nos elementos onde as barras não estão inseridas e diminui a geração de potência nos elementos onde as barras estão inseridas.

Baseado no Relatório Final de Análise de Segurança de Angra 1 (FSAR) se indicadores da posição da barra estiverem fora de serviço e ocorrer falha do

acionamento das barras de controle, o operador deve seguir detalhadas especificações técnicas. Estas instruções operacionais requerem o monitoramento de detectores de temperatura em uma sequência prescrita de instantes. Caracterizando-se por uma impossibilidade de identificação em tempo real pelos procedimentos operacionais para que as medidas sejam tomadas o mais rápido possível.

Para evitar que se excedam certos limites operacionais e o limite DNB não seja violado e conseqüentemente causar o desligamento do reator em um cenário de queda de barras de controle, é necessário a limitação da geração de energia pela usina. O que é problemático em termos financeiros e energéticos. A fim de que algumas especificações técnicas sejam eliminadas ou substituídas por uma menos limitante, faz-se necessário um estudo para que se minimizem os efeitos causados por esse tipo de evento.

No caso de um cenário de acidente de queda de uma barra de controle onde ocorre uma variação na distribuição de potência do núcleo do reator, as respostas dos detectores externos que eram muito parecidas mudam consideravelmente, o que caracteriza uma assimetria na distribuição de potência.

Sendo assim, o objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um método que permita identificar em tempo real a barra de controle caída em qualquer instante de queima. O intuito do método é o estabelecimento de uma relação entre as respostas dos detectores com a barra de controle caída. Pretende-se com esse método contribuir para um melhor funcionamento de um reator PWR, de modo a minimizar possíveis prejuízos na produção de energia.

Capítulo 3

FORMULAÇÃO PARA O CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA

Na metodologia para simular as respostas dos detectores externos foi necessário o cálculo da distribuição de potência do reator. Neste trabalho, o cálculo das distribuições de potência nos elementos combustíveis do núcleo em diferentes instantes de queima foi feito utilizando o Código Nacional de Física de Reatores (CNFR) [2,8]. Através da solução da equação de difusão de nêutrons com dois grupos de energia, o código gera os fluxos médios e conseqüentemente a densidade de potência média dos elementos combustíveis.

3.1 CNFR

O CNFR consiste em um código de Física de Reatores onde é possível obter uma análise precisa dos núcleos dos reatores a água leve pressurizada de Angra 1 e Angra-2. O código é capaz de simular o comportamento desses reatores em estado estacionário, resolvendo os modelos de fenômenos neutrônicos, termo-hidráulicos e de decaimento isotópicos, característicos destes tipos de reatores nucleares.

O código apresenta uma estrutura onde é dividido em dois grandes sistemas, que são:

- Sistema de Geração de Dados Nucleares (GEDAN);
- Sistema de Geração de Dados do Reator (GEDAR).

O GEDAN [8] possui a finalidade de gerar automaticamente uma biblioteca de dados nucleares na estrutura de macrogrupos para uso no sistema GEDAR [8], o qual resolve numericamente a equação da difusão de nêutrons através de um método nodal

para a obtenção do fluxo de nêutrons e conseqüentemente a densidade de potência. Além do cálculo da população neutrônica, no GEDAR também é calculado os parâmetros necessários para a análise do núcleo do reator, logo, o Código Nacional de Física de Reatores calcula:

- As seções de choque microscópicas e macroscópicas homogeneizadas para cada tipo de elemento combustível;
- Fatores de descontinuidade para cada tipo de elemento combustível;
- Funções forma para cada tipo de elemento combustível;
- Fluxos de nêutrons térmicos e rápido nos pinos dos elementos combustíveis;
- Variação espacial da queima nos elementos combustíveis;
- Concentrações isotrópicas nos elementos combustíveis nos intervalos de queima especificados pelo usuário;
- Realimentação termohidráulica devida à densidade do moderador e às temperaturas do combustível e do moderador;
- Pesquisa de criticalidade para concentrações de Boro, posição dos bancos de barras de controle ou do nível da potência nuclear.

Além de disponibilizar uma interface gráfica para o usuário, de forma a tornar a utilização do CNFR a mais amigável possível.

3.2 Método de Expansão Nodal

O CNFR gera a distribuição do fluxo médio de nêutrons no núcleo do reator de Angra 1 resolvendo a equação de difusão de nêutrons tridimensional em geometria cartesiana para 2 grupos de energia, utilizando o método de expansão nodal (NEM) [3] que permite o uso da malha grossa e exige nodos homogêneos.

O método nodal utilizado pelo CNFR faz uso da equação de difusão de nêutrons integrada transversalmente, gerando um conjunto de três equações 'unidimensionais' acopladas pelos termos de fuga transversal. Por ser um método de correntes de interfaces, também faz uso da equação da continuidade de nêutrons e da Lei de Fick em geometria cartesiana com dois grupos de energia.

A resolução da equação de difusão de nêutrons tridimensional em geometria cartesiana pelo método NEM tem seu ponto de partida na equação da continuidade de nêutrons e na Lei de Fick que para seu estado estacionário são respectivamente [9]:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_g(x, y, z) + \Sigma_{Rg}(x, y, z)\phi_g(x, y, z) = \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^G \Sigma_{gg'}(x, y, z)\phi_{g'}(x, y, z) + \frac{1}{K_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^G \nu \Sigma_{fg'}(x, y, z)\phi_{g'}(x, y, z) \quad (3.1)$$

e

$$\vec{J}_g(x, y, z) = -D_g(x, y, z)\vec{\nabla}\phi_g(x, y, z) , \quad (3.2)$$

onde

$\vec{J}_g(x, y, z)$: Corrente Líquida de nêutrons do grupo g;

$D_g(x, y, z)$: Coeficiente de Difusão do grupo g;

$\Sigma_{Rg}(x, y, z)$: Seção de Choque de Remoção do grupo g;

$\phi_g(x, y, z)$: Fluxo de nêutrons do grupo g;

$\Sigma_{gg'}(x, y, z)$: Seção de Choque Macroscópica de espalhamento do grupo g' para o grupo g de energia;

K_{eff} : Fator de Multiplicação Efetivo;

χ_g : Espectro de fissão de Nêutrons do grupo g;

$\nu\Sigma_{fg'}(x, y, z)$: o produto entre o número esperado médio de nêutrons oriundos da fissão com a seção de Choque macroscópica de fissão do grupo g' .

A corrente líquida do grupo g de energia pode ser expressa em função das correntes parciais [9], ou seja,

$$J_{gu}(x, y, z) = J_{gu}^+(x, y, z) - J_{gu}^-(x, y, z) \quad (3.3)$$

Onde o índice u representa a direção da corrente sendo $u = x, y, z$.

3.2.1 Equação de Balanço Nodal

Nos métodos nodais de malha grossa como o NEM, o núcleo do reator é dividido em paralelepípedos contíguos chamados nodos, onde os parâmetros nucleares são homogeneizados. O cálculo dos fluxos médios de nêutrons nos nodos é resultado da integração da Equação (3.1) no volume $V_n = a_x^n a_y^n a_z^n$ de um nodo n qualquer como visto pela Figura 3.1.

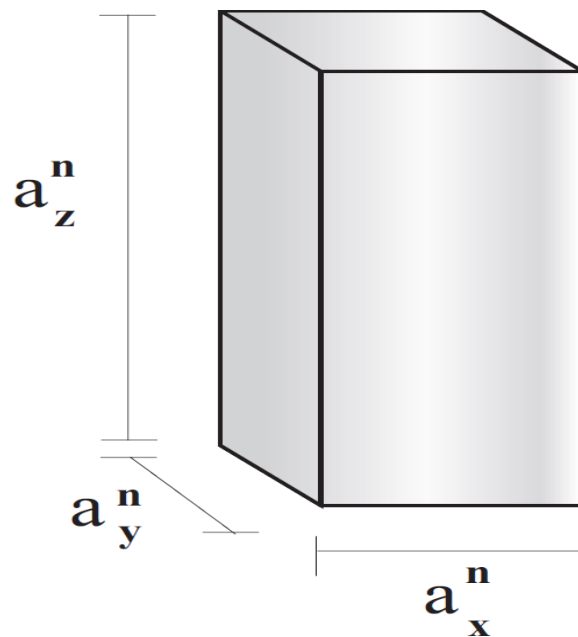


Figura 3.1: Representação de um nodo

Sendo então a equação de balanço nodal da seguinte forma:

$$\sum_{u=x,y,z} \frac{1}{a_x^n} \{ \bar{J}_{gur}^n - \bar{J}_{gul}^n \} + \sum_{Rg} \bar{\phi}_g^n = \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^2 \bar{\Sigma}_{gg'}^n \bar{\phi}_{g'}^n + \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 \nu \bar{\Sigma}_{fg'} \bar{\phi}_{g'}^n, \quad (3.4)$$

onde o fluxo médio na equação acima e as correntes líquidas médias na face s do nodo são assim definidas:

$$\bar{\phi}_g^n = \frac{1}{V_n} \int_{V_n} \phi_g(x, y, z) dV, \quad (3.5)$$

$$\bar{J}_{gus}^n \equiv \frac{1}{a_v^n a_w^n} \int_0^{a_v^n} \int_0^{a_w^n} J_{gu}(u_s^n, v, w) dv dw. \quad (3.6)$$

Onde u indica a direção x, y, z e s indica em qual face do nodo está sendo realizada a média. Logo, $s = r, l$ sendo que l representa uma face do nodo e r a face oposta na mesma direção u .

Podemos escrever então:

$$u = \begin{cases} 0 & \text{se } s = l \\ a_u^n & \text{se } s = r \end{cases}.$$

Os parâmetros nucleares multigrupo são uniformes dentro do nodo, então são definidos por:

$$\bar{D}_g^n \equiv \frac{1}{V_n} \int_{V_n} D_g(x, y, z) dV \quad (3.7)$$

e

$$\bar{\Sigma}_{gg'}^n \equiv \frac{1}{V_n} \int_{V_n} \Sigma_{gg'}^n(x, y, z) dV. \quad (3.8)$$

Para obter as seções de choque macroscópicas médias de captura e fissão é necessário ponderá-las no fluxo, devido ao gradiente de queima que variam espacialmente no interior do nodo. Então

$$\Sigma_{\chi_g}^n \equiv \frac{1}{V_n \bar{\phi}_g^n} \int_{V_n} \Sigma_{\chi_g}^n(x, y, z) \phi_g(x, y, z) dV, \quad (3.9)$$

sendo que $\Sigma_{\chi_g}^n$ representa a seção de choque macroscópica de fissão e absorção.

3.2.2 Equações de Acoplamento Nodal

Para a resolução da Equação (3.4) pelo método nodal torna-se necessário relacionar o fluxo médio $\bar{\phi}_g^n$ com as correntes líquidas nas faces do nodo \bar{J}_{gus}^n . Este acoplamento é feito através da integração da Equação (3.1), após a aplicação da Lei de Fick, na área $A_n = a_v^n a_w^n$, transversal à direção u , resultando em:

$$-\bar{D}_g^n \frac{d^2}{du^2} \bar{\psi}_{gu}^n(u) + \Sigma_{Rgu}^n(u) \bar{\psi}_{gu}^n(u) = \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^2 \bar{\Sigma}_{gg'}^n \bar{\psi}_{g'u}^n(u) + \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 \nu \Sigma_{fg'}(u) \bar{\psi}_{g'u}^n(u) - L_{gu}^n(u) \quad (3.10)$$

O fluxo unidimensional $\bar{\psi}_{gu}^n$ do grupo de energia g do nodo n na direção u é expresso por

$$\bar{\psi}_{gu}^n(u) \equiv \frac{1}{a_v^n a_w^n} \int_0^{a_v^n} \int_0^{a_w^n} \phi_g(u, v, w) dv dw, \quad (3.11)$$

e a Lei de Fick na face do nodo é assim definida:

$$\bar{J}_{gus}^n = -\bar{D}_g^n \frac{d}{du} \bar{\psi}_{gu}^n(u). \quad (3.12)$$

O termo de fuga transversal de nêutrons à direção u do nodo n $L_{gu}^n(u)$ é definido como:

$$L_{gu}^n(u) \equiv \frac{1}{a_v^n a_w^n} \int_0^{a_v^n} \int_0^{a_w^n} \sum_{\xi=v,w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ -D_g(x, y, z) \frac{\partial}{\partial \xi} \phi_g(u, v, w) \right\} dv dw. \quad (3.13)$$

As seções de choque macroscópicas de fissão e remoção integradas transversalmente são definidas como:

$$\Sigma_{\chi_{gu}}^n(u) \equiv \frac{1}{A_u^n \bar{\psi}_{gu}^n(u)} \int_{A_u^n} \Sigma_{\chi_g}^n(u, v, w) \phi_g(u, v, w) dA \quad (3.14)$$

Podemos reescrever a Equação (3.10) em termos da seção de choque média no volume do nodo, para isso somamos os seguintes termos na Equação (3.10):

$$\Sigma_{ag}^n \bar{\psi}_{gu}^n(u) - \Sigma_{ag}^n \bar{\psi}_{gu}^n(u) \quad (3.15)$$

e

$$\frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 \nu \Sigma_{fg'}^n \bar{\psi}_{g'u}^n(u) - \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 \nu \Sigma_{fg'}^n \bar{\psi}_{g'u}^n(u). \quad (3.16)$$

Assim podemos reescrever a Equação (3.10) da seguinte forma:

$$\begin{aligned} -\bar{D}_g^n \frac{d^2}{du^2} \bar{\psi}_{gu}^n(u) + \Sigma_{Rgu}^n \bar{\psi}_{gu}^n(u) = \\ \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^2 \bar{\Sigma}_{gg'}^n \bar{\psi}_{g'u}^n(u) + \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 \nu \Sigma_{fg'}^n \bar{\psi}_{g'u}^n(u) - L_{gu}^n(u) - d_{gu}^n(u) \end{aligned} \quad (3.17)$$

onde o termo $d_{gu}^n(u)$ representa a diferença entre as seções de choque e é definido por:

$$d_{gu}^n(u) \equiv (\Sigma_{agu}^n(u) - \Sigma_{ag}^n) \bar{\psi}_{gu}^n(u) - \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 (\nu \Sigma_{fg'u}^n(u) - \nu \Sigma_{fg'}^n) \bar{\psi}_{g'u}^n(u) \quad (3.18)$$

No método NEM os fluxos unidimensionais são expressos por funções polinomiais de quarto grau dado pela seguinte forma:

$$\bar{\psi}_{gu}^n(u) = \sum_{k=0}^4 c_{kgu}^n h_k \left(\frac{u}{a_u^n} \right). \quad (3.19)$$

Além disso, tanto o termo de fuga transversal quanto a função $d_{gu}^n(u)$ podem ser representados por expansões polinomiais do segundo grau da seguinte forma:

$$L_{gu}^n(u) = \sum_{k=0}^2 a_{kgu}^n h_k \left(\frac{u}{a_u^n} \right), \quad (3.20)$$

$$d_{gu}^n(u) = \sum_{k=0}^2 b_{kgu}^n h_k \left(\frac{u}{a_u^n} \right). \quad (3.21)$$

Onde as funções de base $h_k(\xi)$, para $\xi = \frac{u}{a_u^n}$ são assim definidas:

$$h_0(\xi) = 1$$

$$h_1(\xi) = 2\xi - 1$$

$$h_2(\xi) = 6\xi(1-\xi) - 1$$

$$h_3(\xi) = 6\xi(1-\xi)(2\xi - 1)$$

$$h_4(\xi) = 6\xi(1-\xi)(5\xi^2 - 5\xi + 1)$$

As propriedades das funções de base se encontram no Anexo 1.

3.2.3 Cálculos dos Coeficientes Primários

As funções base que expandem o fluxo médio unidimensional possuem as seguintes propriedades:

$$1- \int_0^1 h_k(\xi) d\xi = 0 \quad ; \quad \forall k \geq 1$$

$$2- h_k(1) = h_k(0) = 0 \quad ; \quad \forall k \geq 3.$$

Baseado nestas propriedades podemos definir os coeficientes c_{0gu}^n , c_{1gu}^n e c_{2gu}^n que são os coeficientes primários da Equação (3.19) do fluxo unidimensional.

Para o cálculo do coeficiente de grau zero c_{0gu}^n é usada a condição de consistência qual seja:

$$\bar{\phi}_g^n = \frac{1}{a_u^n} \int_0^{a_u^n} \bar{\psi}_{gu}^n(u) du. \quad (3.22)$$

Substituindo a Equação (3.19) na Equação (3.22) e utilizando a propriedade 1 das funções de base $h_k(\xi)$ obtém-se que:

$$\bar{\phi}_g^n = c_{0gu}^n . \quad (3.23)$$

O cálculo dos coeficientes c_{1gu}^n e c_{2gu}^n podem ser obtidos através das condições nas superfícies do nodo impostas a Equação (3.19).

$$\bar{\psi}_{gu}^n(u) = c_{0gu}^n h_0\left(\frac{u}{a_u^n}\right) + \sum_{k=1}^4 c_{kgu}^n h_k\left(\frac{u}{a_u^n}\right). \quad (3.24)$$

Utilizando-se da Equação (3.24), das definições, da segunda propriedade das funções de base $h_k(\xi)$ e aplicando a condição de contorno para os dois lados do nodo a expansão se torna:

$$\bar{\psi}_{gul}^n \equiv \bar{\psi}_{gu}^n(0) = \bar{\phi}_g^n - c_{1gu}^n - c_{2gu}^n , \quad (3.25)$$

$$\bar{\psi}_{gur}^n \equiv \bar{\psi}_{gu}^n(a_s^n) = \bar{\phi}_g^n + c_{1gu}^n - c_{2gu}^n , \quad (3.26)$$

A partir da Equação (3.25) e (3.26) podemos escrever os valores dos coeficientes restantes que são:

$$c_{1gu}^n = \frac{1}{2} \{ \bar{\psi}_{gur}^n - \bar{\psi}_{gul}^n \} , \quad (3.27)$$

$$c_{2gu}^n = \bar{\phi}_g^n - \frac{1}{2} \{ \bar{\psi}_{gur}^n + \bar{\psi}_{gul}^n \} . \quad (3.28)$$

Através da aproximação de difusão podemos ainda escrever os fluxos médios unidimensionais em termos das corrente parciais e conseqüentemente, escrever os coeficientes c_{1gu}^n e c_{2gu}^n em termos das correntes parciais nas faces dos nodos,

$$\bar{\psi}_{gus}^n \equiv 2(\bar{J}_{gus}^{+n} + \bar{J}_{gus}^{-n}) \quad (3.29)$$

onde $u = x, y, z$ e $s = r, l$.

3.2.4 Coeficientes da Fuga Transversal e do Termo de Diferença

Na expansão nodal o termo de fuga transversal $L_{gu}^n(u)$ e o termo de diferença $d_{gu}^n(u)$ também são expandidos pelos polinômios da função de base $h_k(\xi)$ até o grau dois. O resultado dos seus coeficientes é obtido através de aplicação de condições de coexistência e condições de contorno e utilizando as propriedades das funções de base.

3.2.5 Coeficientes Secundários

Para determinar os coeficientes do terceiro e quarto graus c_{3gu}^n e c_{4gu}^n é utilizada a técnica de resíduos ponderados [2,3] à equação da difusão integrada na área $A_n = a_v^n a_w^n$ à direção u , sendo os pesos do tipo momento escritos em função das funções base $h_1\left(\frac{u}{a_u^n}\right)$ e $h_2\left(\frac{u}{a_u^n}\right)$ para o cálculo de c_{3gu}^n e c_{4gu}^n respectivamente. Assim, a partir dos valores expandidos dos termos já conhecidos das Equações (3.19), (3.20), (3.21) e utilizando algumas propriedades das funções de base h_k é possível se chegar a um sistema de equações a partir dos quais os coeficientes secundários são calculados.

3.2.6 Correntes Parciais de Saída e Fluxo Médio Nodal

O método de expansão nodal caracteriza-se por ser um método de corrente parciais nas interfaces dos nodos. Obtidos todos os coeficientes da expansão de $\bar{\psi}_{gu}^n(u)$ é possível obter as correntes parciais de saída do nodo e completar o acoplamento nodal. Isto é possível substituindo o fluxo unidimensional $\bar{\psi}_{gu}^n(u)$ pela expressão expandida da Equação (3.19) na equação da Lei de Fick (3.12) para os dois valores de u_s^n e fazendo uso da definição de corrente parcial.

$$\bar{J}_{gus}^n = \bar{J}_{gus}^{+n} - \bar{J}_{gus}^{-n}, \quad s = l, r, \quad (3.30)$$

$$\bar{J}_{gul}^n = \bar{J}_{gul}^{+n} - \bar{J}_{gul}^{-n} = -\bar{D}_g^n \sum_{k=0}^4 c_{kgu}^n \frac{d}{du} h_k \left(\frac{u}{a_u^n} \right) \Big|_{u=0}, \quad (3.31)$$

$$\bar{J}_{gur}^n = \bar{J}_{gur}^{+n} - \bar{J}_{gur}^{-n} = -\bar{D}_g^n \sum_{k=0}^4 c_{kgu}^n \frac{d}{du} h_k \left(\frac{u}{a_u^n} \right) \Big|_{u=a_u^n}, \quad (3.32)$$

Logo, fazendo uso dos coeficientes primários e secundários e das funções de base, obtemos as correntes parciais de saída do nodo em função das correntes de entradas nas duas faces, ou seja, temos:

$$\bar{J}_{gul}^{-n} = A_{0gu}^n \{ \bar{\phi}_g^n + c_{4gu}^n \} + A_{1gu}^n \bar{J}_{gul}^{+n} + A_{2gu}^n \bar{J}_{gur}^{-n} - A_{3gu}^n c_{3gu}^n, \quad (3.33)$$

$$\bar{J}_{gur}^{+n} = A_{0gu}^n \{ \bar{\phi}_g^n + c_{4gu}^n \} + A_{2gu}^n \bar{J}_{gul}^{+n} + A_{1gu}^n \bar{J}_{gur}^{-n} + A_{3gu}^n c_{3gu}^n, \quad (3.34)$$

onde os coeficientes são assim definidos:

$$A_{0gu}^n \equiv \frac{6(\bar{D}_g^n / a_u^n)}{1 + 12(\bar{D}_g^n / a_u^n)}, \quad (3.35)$$

$$A_{1gu}^n \equiv \frac{1 - 48(\bar{D}_g^n / a_u^n)^2}{(1 + 12(\bar{D}_g^n / a_u^n))(1 + 4(\bar{D}_g^n / a_u^n))}, \quad (3.36)$$

$$A_{2gu}^n \equiv \frac{-8(\bar{D}_g^n / a_u^n)}{(1 + 12(\bar{D}_g^n / a_u^n))(1 + 4(\bar{D}_g^n / a_u^n))}, \quad (3.37)$$

$$A_{3gu}^n \equiv \frac{6(\bar{D}_g^n / a_u^n)}{(1 + 4(\bar{D}_g^n / a_u^n))}, \quad (3.38)$$

Substituindo os termos de correntes parciais médias nas faces do nodo das Equações (3.33) e (3.34) na Equação (3.4), obtemos o conjunto de equações dependendo apenas das correntes parciais de entrada nas duas faces do qual é possível calcular o fluxo médio nodal $\bar{\phi}_g^n$ utilizando as condições de contorno e de interface nos nodos.

$$\left(\sum_{u=x,y,z} \frac{2A_{0gul}^n}{a_x^n} + \Sigma_{Rg}^n \right) \bar{\phi}_g^n = \sum_{\substack{g'=1 \\ g' \neq g}}^2 \bar{\Sigma}_{gg'}^n \bar{\phi}_{g'}^n + \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^2 \nu \Sigma_{fg'} \bar{\phi}_{g'}^n +$$

$$+ \sum_{u=x,y,z} \frac{2A_{0gul}^n}{a_x^n} (2(\bar{J}_{gur}^{-n} + \bar{J}_{gul}^{+n}) - c_{4gu}^n) \quad (3.39)$$

3.3 Cálculo da distribuição de Potência

Para o cálculo da distribuição da densidade de potência o CNFR parte da definição onde seus valores são calculados com base no fluxo de nêutrons:

$$p(x, y, z) \equiv \sum_{g=1}^2 w \Sigma_{fg}^n(x, y, z) \phi_g(x, y, z). \quad (3.40)$$

Sendo w é a energia liberada na fissão e $\Sigma_{fg}^n(x, y, z)$ a seção de choque macroscópica de fissão para o grupo g de energia.

O cálculo da densidade de potência média do nodo é feita através da integração da distribuição de densidade de potência no volume $V_n = a_x^n a_y^n a_z^n$ de um nodo qualquer resultando em:

$$\bar{p}^n \equiv \sum_{g=1}^2 w \Sigma_{fg}^n \bar{\phi}_g^n, \quad (3.41)$$

onde novamente os valores médios podem ser definidos como:

$$\bar{\phi}_g^n \equiv \frac{1}{V_n} \int_{V_n} \phi_g(x, y, z) dV \quad (3.42)$$

e

$$w \Sigma_{fg}^n \equiv \frac{1}{V_n} \int_{V_n} w \Sigma_{fg}^n(x, y, z) \phi_g(x, y, z) dV. \quad (3.43)$$

A constante de normalização do fluxo neutrônico é calculada impondo-se que:

$$C_N \sum_n \bar{p}^n V_n = f_{carga} P_{Nominal}. \quad (3.44)$$

Onde C é a constante de normalização, f_{carga} é o fator de carga, ou seja, o nível de potência de operação do reator e $P_{Nominal}$ é a potencia nominal deste reator. Sendo então a Potência Térmica Nodal definida como:

$$P_{Norm}^n = C_N \bar{P}^n V_n . \quad (3.45)$$

No cálculo da densidade de potência média no nodo será adotado um modelo para levar em conta a possibilidade de ter barras de controle total ou parcialmente inseridas nos nodos e outro modelo para tratar o gradiente de queima [2,8], que implicam na variação espacial das seções de choque de fissão no interior do nodo. O modelo para as barras de controle fará uso de diferenças de seções de choque, com e sem barras de controle, em cada região axial do nodo onde houver pelo menos uma das diferentes partes que compõem as barras de controle (ponta, absorvedor ou seguidor). Já o modelo para tratar o gradiente de queima fará uso de uma expansão das seções de choque, da região do combustível, em polinômios da função h_k até segundo grau.

CAPÍTULO 4

MÉTODO PROPOSTO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método para a identificação em tempo real da queda involuntária de barras de controles em reatores PWR em qualquer instante de queima. O fato da queda de uma barra de controle ser um evento não observável diretamente, nos leva a utilizar de mecanismos mais elaborados que possibilitem identificar corretamente este tipo de evento.

Simulações computacionais foram feitas a fim de obter as distribuições de potência no núcleo em diferentes instantes de queima que posteriormente foram utilizadas para o cálculo das respostas dos detectores.

As respostas dos detectores externos nos reatores PWR em operação não dependem somente do nível de potência nuclear, mas também da distribuição de potência do núcleo do reator. Logo, pode-se constatar que a resposta dos detectores também varia quando a distribuição de potência nuclear varia. Para um evento como de queda de barras, os detectores externos respondem a variação na distribuição de potência devida à assimetria do fluxo neutrônico causado pela barra. Com isso, as respostas dos detectores, que antes da queda eram aproximadamente iguais, tornam-se totalmente diferentes.

A proposta do trabalho consiste então, em um método que viabilize relacionar de forma unívoca as leituras dos quatro detectores externos com uma suposta queda involuntária de barra de controle como ilustra a Figura 4.1.

Logo, o método constitui-se na identificação da barra caída indevidamente no núcleo com base nas leituras dos quatro canais de potência e como resposta do método

tem-se uma possível identificação correta da barra de controle caída em qualquer instante de queima. Em um cenário de queda de uma barra de controle, aumenta-se o grau de incerteza do reconhecimento de padrões e classificação dos valores das respostas dos detectores, logo a capacidade de descrição de um modelo diminui. Propõe-se para tanto, a utilização de ferramentas inteligentes que possibilitem o reconhecimento de padrões das respostas dos detectores para a implementação do método.

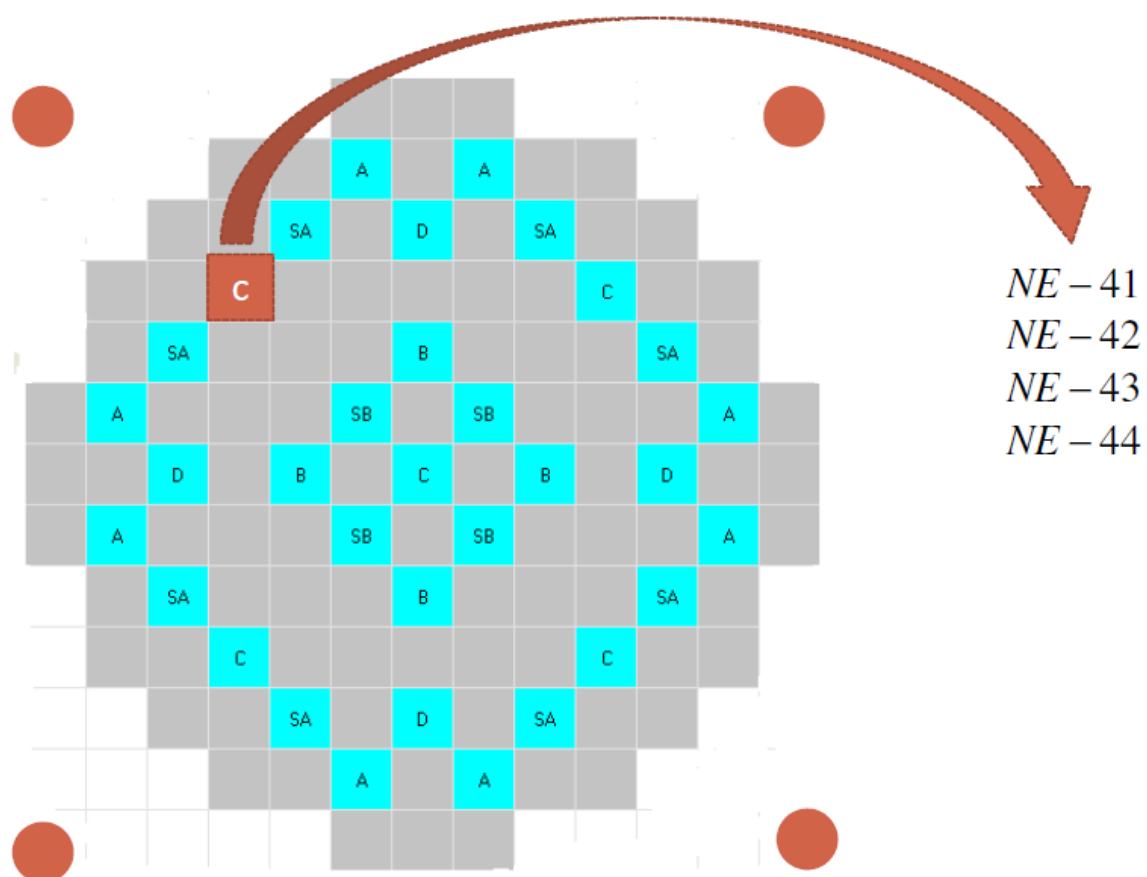


Figura 4.1: Relação das respostas dos 4 detectores com a barra de controle caída

No item que segue é apresentado uma pequena revisão de aspectos importantes à compreensão que envolvem inteligência artificial utilizada neste trabalho. As redes neurais artificiais e o sistema especialista são alguns exemplos de ferramentas para resolução de problemas complexos.

4.1 Redes Neurais Artificiais – RNA

As redes neurais são uma analogia ao funcionamento do cérebro humano. Parte-se da hipótese de que um sistema com alguma estrutura similar ao cérebro apresentaria inteligência. Uma das principais características das Redes Neurais é a capacidade de aprendizagem a partir de um conjunto finito de dados, identificando padrões. Logo, a rede é capaz de generalizar o conhecimento adquirido, tornando-a capaz de responder a adequadamente baseado no mapeamento feito pela mesma.

4.1.1 Rede Neural de Multicamadas

O neurônio artificial é uma unidade fundamental de uma rede neural artificial e onde são processados os sinais que chegam à rede. Este neurônio matemático recebe os sinais de entrada e devolve um sinal de saída, que pode ser o sinal de saída da rede ou entrada para outra camada de neurônios. Os valores de entrada chegam simultaneamente nos neurônios, caracterizando-se então por seu caráter de processamento em paralelo. Um modelo de neurônio artificial simplificado é ilustrado na Figura 4.2. O neurônio matemático pode ser representado da seguinte forma:

$$v_k = \sum_{i=0}^n w_i x_i + b_k, \quad (4.1)$$

$$y_k = \varphi(v_k). \quad (4.2)$$

Onde x_i que são os vetores de entrada, w_i são os pesos sinápticos correspondentes a serem processadas pelo neurônio, b_k as entradas externas chamadas bias e φ a função de ativação que é responsável pelo sinal a ser transmitido. O índice k se refere ao

neurônio, o índice i se refere à sinapse de entrada, e y_k é a saída correspondente do neurônio k . Um neurônio aplica um peso w_i a cada entrada x_i do vetor de entrada. As

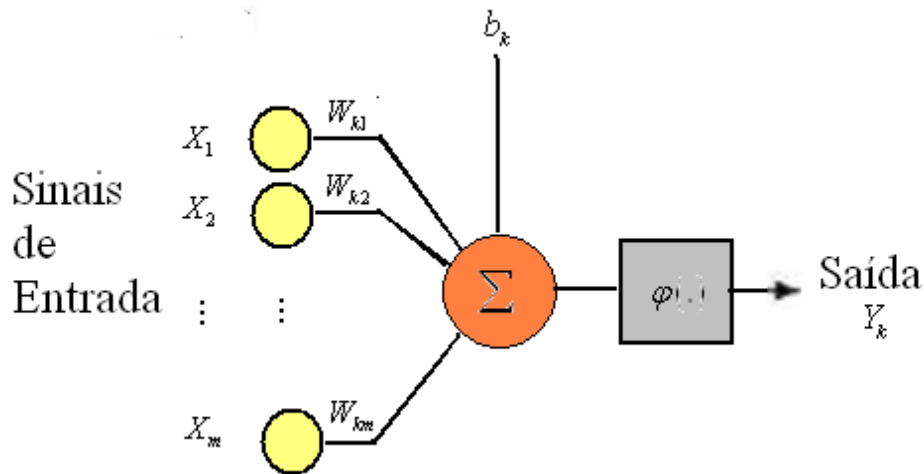


Figura 4.2: Neurônio Artificial

entradas do neurônio, são somadas constituindo assim o argumento v_k de entrada de função de ativação que produz a saída y_k do neurônio.

A função produz em sua saída um valor resultante da aplicação de uma função de transferência ao argumento v_k recebido como entrada. A seguir, são exemplificados alguns tipos de funções de transferência utilizadas:

- Função Limiar

$$\varphi(v_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } v \geq 0 \\ 0 & \text{se } v < 0 \end{cases}$$

- Função Linear

$$\varphi(v_k) = mv_k$$

- Função Sigmoide

$$\varphi(v_k) = \frac{1}{1 + e^{-av}}$$

- Função Gaussiana

$$\varphi(v_k) = e^{-v^2}$$

- Função Tangente hiperbólica

$$\varphi(v_k) = \tanh(v)$$

As redes neurais artificiais de multicamadas, do inglês feed-forward Multilayer Perception (MLP), são formadas por um conjunto de neurônios artificiais interligados pelas sinapses e estruturadas em camadas a fim de permitir que uma camada de neurônios se comunique com a camada seguinte. Assim, a saída de uma camada constitui a entrada da próxima camada.

As redes neurais possuem uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída como mostram a Figura 4.3. Na camada de entrada os sinais são introduzidos e o número de nós é equivalente ao número de sinais de entrada da rede. As camadas ocultas possibilitam a rede obter soluções para problema linearmente não separáveis. Por fim, a camada de saída possui uma quantidade de neurônios igual à quantidade de sinais de saída.

As redes MLP são consideradas aproximadores universais de funções, pois permitem mapear funções lineares ou não lineares, sendo o seu nível de precisão dependente principalmente da escolha eficiente do conjunto de dados de treinamento.

O treinamento da rede é feito por meio de processos de ajustes aplicados aos parâmetros livres (pesos sinápticos e nível de bias) gerando uma aprendizagem da rede acerca de seu ambiente. O processo de aprendizagem dá-se de duas maneiras: supervisionado (com professor) ou não supervisionado (apenas pela experiência).

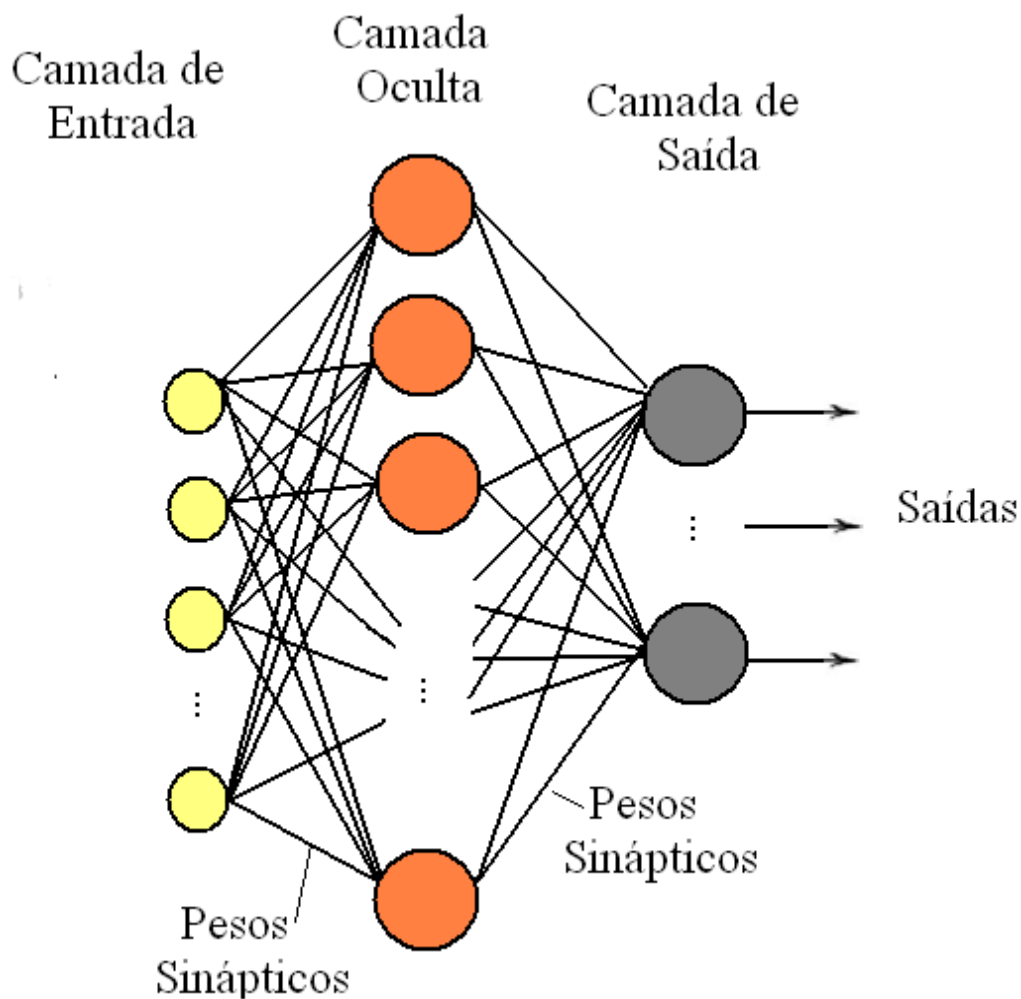


Figura 4.3: Esquema de uma Rede Neural de Multicamadas

4.1.2 Redes Neurais de Base Radial

As redes de funções de base radial são uma alternativa para as redes Perceptrons de Multicamadas. O método utilizado para redes de base radial consiste na interpolação estrita [12] em um espaço multidimensional.

As redes de base radial constituem-se de uma arquitetura de três camadas sendo uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída. A camada de entrada é constituída por nós que conectam os vetores de entrada ao ambiente da rede. A camada oculta é responsável pela transformação não linear do espaço de entrada para o espaço oculto, ou seja, mapeia os vetores do espaço de entrada em um novo espaço.

Finalmente, a camada de saída fornece a resposta da rede para dado vetor através de um mapeamento linear.

Os neurônios da camada oculta possuem um conjunto de funções de ativação $\varphi(\|x_i - x_j\|)$ que se constituem bases arbitrárias para os vetores de entrada, sendo estes então expandidos no espaço por essas funções de base radial. A variável $x_i \in R^n$ são os vetores de entrada, $x_j \in R^n$ são os centros do conjunto de N funções de base radial arbitrárias $\varphi(\|x_i - x_j\|)$ e $\|x_i - x_j\|$ representa a norma que geralmente é euclidiana.

A função gaussiana possui boas aproximações para a interpolação, além de possuírem algumas propriedades que permitem a matriz de interpolação ser não singular [12]. Dentre as propriedades podemos citar a simetria radial e o fato das funções serem localizadas, no sentido que quando a norma $r = \|x_j - x_i\| \rightarrow \infty$ a função $\varphi(r) \rightarrow 0$. Este tipo de função de base radial é definida como:

$$\varphi(\|x_j - x_i\|) = e^{-\left(\frac{\|x_j - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Onde σ representa a largura da função.

A superfície interpolada é obrigada a passar por todos os pontos de treinamento da rede. O ajuste dos parâmetros das funções e dos pesos da camada linear é feito baseado no conjunto de dados de treinamento.

As Funções de Base Radial refletem regiões em que os vetores de entrada se agrupam em regiões permitindo a formação de aglomerados distinguíveis que não são evidentes a priori. A resposta máxima do neurônio ocorrerá quando $x_i = x_j$ e quando mais distante o vetor x_i for do centro, menor será a sua resposta.

Apesar de em ambos os casos as Redes de Funções de Base Radial (RBF) e as Redes Perceções de Multicamadas (MLP) resolverem problemas não linearmente

separáveis e serem aproximadores universais, elas reconhecem e classificam os padrões de forma diferente como mostra a ilustração qualitativa da Figura 4.4.

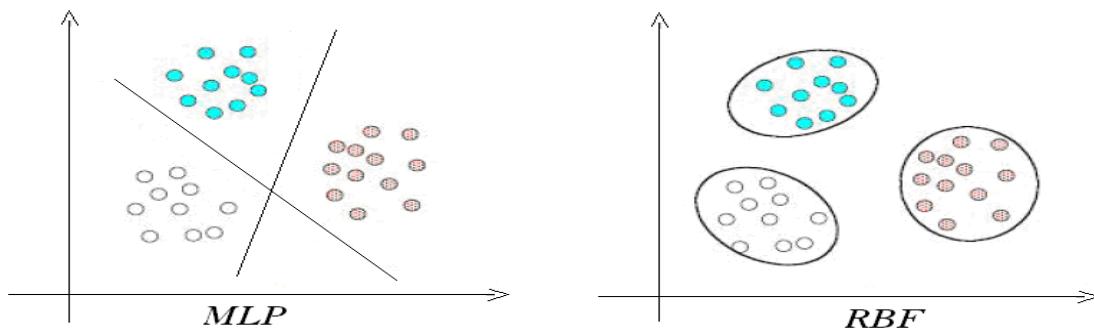


Figura 4.4: Comparação entre as classificações padrões das redes MLP e RBF.

4.2 Sistema Especialista

Os Sistemas Especialistas podem ser considerados como sistemas computacionais que utilizam conhecimento acerca de um domínio específico para extrair soluções de problemas que se encontram neste mesmo domínio. Diferenciando-se dos sistemas convencionais, o sistema especialista se distingue por não utilizar de modelos puramente algorítmicos e sim por utilizar estruturas de conhecimento e heurísticas para representar o conhecimento que é traduzido da estrutura de pensamento dos especialistas humanos.

Dado um determinado problema, é necessário estabelecimento de critérios que envolvam dois componentes: o Conhecimento e o Motor de Inferência[10].

A Base de Conhecimento e sua representação constituem aspectos importantes dessa estrutura. O Conhecimento é necessário, pois nele estão as informações relativas à solução do problema bem como as informações relevantes para a representação do conhecimento em si e para a estrutura utilizada pelo Motor de Inferência como mostra o esquema da Figura 4.5.

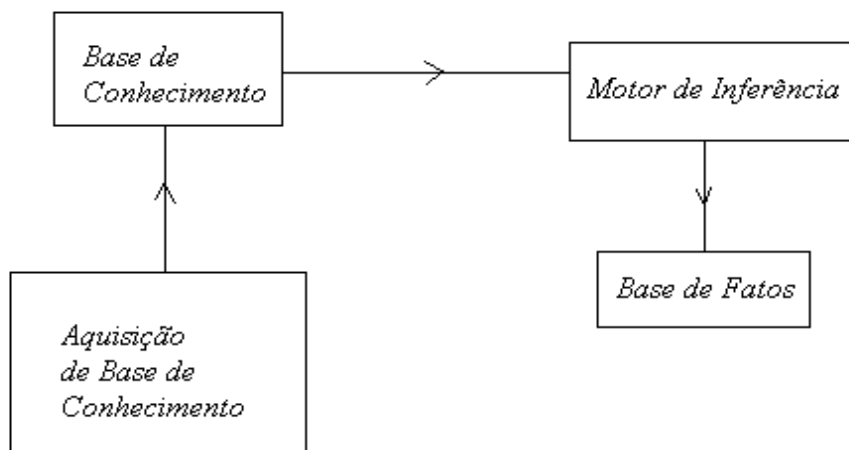


Figura 4.5: Diagrama do Sistema Especialista

4.2.1 Representação do Conhecimento

A Representação do Conhecimento é uma forma estruturada do conhecimento, fornecida de tal maneira que permita uma abstração do domínio ao sistema. Assim, manipula-se o conhecimento através desta representação. Os formalismos utilizados para representação do conhecimento podem ser Lógica de Predicado, Regras, Redes Semânticas, Frames e Orientações a Objetos.

O conhecimento, induz de forma natural um conceito de classe. Assim, é planejado um conjunto de classes para o modelo, onde uma configuração específica pode ser considerada e tratada como uma classe [11].

Nesta dissertação optou-se por um Sistema Especialista que represente o conhecimento através de regras, logo, nos preocuparemos com este tipo de representação de conhecimento.

O modo como refletem de forma adequada o conhecimento é representado por regras que possuem uma estrutura *if* \langle Antecedentes \rangle ...*then* \langle Consequentes \rangle . A parte dos antecedentes e o conectivo *if* de condição ou premissa de uma regra de fatos quando avaliados como verdadeiro, faz com que a parte consequente seja executada com uma

ação, originando um novo conjunto de fatos ou possíveis conclusões que estão relacionadas ao conectivo *then*.

4.2.2 Motor de Inferência

O motor de inferência por sua vez manipula a base de conhecimento a partir das verdades da base de fatos de modo a trabalhar com o conhecimento já estruturado de maneira satisfatória. O objetivo é identificar soluções do problema através de um espaço de soluções, a partir de um fato.

As inferências baseadas em regras possuem duas direções na busca da solução do problema que são o Encadeamento para Frente e o Encadeamento para Trás.

No Encadeamento para Frente inicia-se a partir de fatos iniciais e direciona-se no sentido da obtenção de uma solução. Todas as Regras são checadas com o intuito de verificar se os fatos iniciais satisfazem algumas delas. Cada regra satisfeita é então disparada gerando novos fatos que são utilizados para outras regras ou possíveis soluções. Este tipo de encadeamento é utilizado quando se tem um número de entradas limitado e um número grande de conclusões possíveis. O encadeamento é feito como mostra a Figura 4.6 seguindo os seguintes passos: Casamento, Resolução de Conflito e Execução [11].

No passo relativo ao casamento é feita a comparação dos antecedentes das regras com os fatos conhecidos. Se por ventura todos os antecedentes (*if*) de uma regra são verdadeiros, então a referida regra é uma candidata a ser executada.

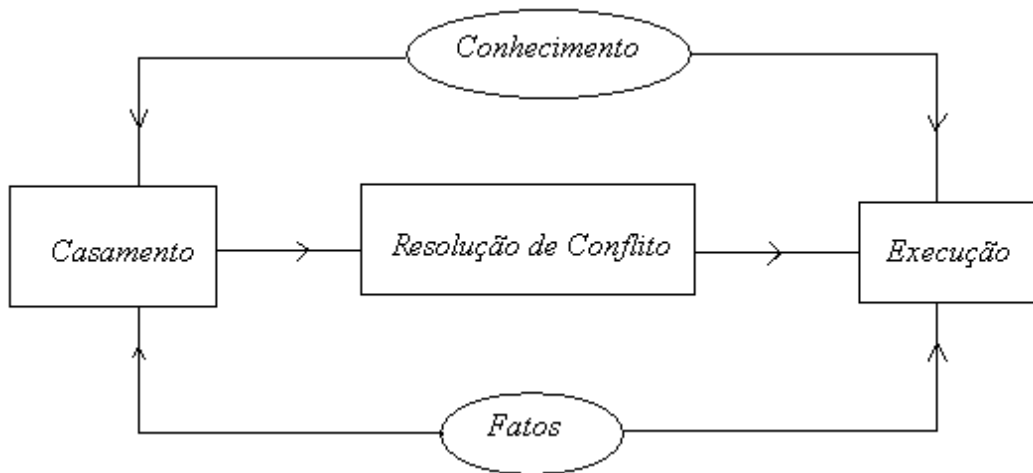


Figura 4.6: Motor de Inferência no Encadeamento para frente

A Resolução do Conflito é exigida quando existe mais de uma regra candidata, logo, como a inferência deve ser capaz de resolver os conflitos que possam eventualmente surgir do processo de raciocínio, este passo seleciona uma regra dentre as candidatas.

O último passo é a execução onde se obtêm uma resposta que pode ser um fato concreto ou novos fatos que serão utilizados em novas regras.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO

5.1 Simulações das Respostas dos Detectores Externos

Os quatro canais de potência que compõem o sistema de instrumentação do reator e que são responsáveis por prover informações sobre a distribuição e nível de potência do núcleo, nesta dissertação têm suas respostas calculadas através de simulações.

Utilizando-se o código CNFR foram feitas simulações onde se obteve as densidades de potência média dos elementos combustíveis como demonstrado no Capítulo 3. As distribuições de potência do reator foram obtidas para diversos instantes de queima de um ciclo fresco para um reator semelhante à Angra 1, mantendo-se o fator de carga igual a 1 e todas as barras retiradas até que o boro alcançasse 10 ppm.

Simulou-se um caso de referência, sem barras de controle inseridas e posteriormente, foram simuladas as distribuições de potência para os cenários de uma queda de barra de controle. Em cada um dos instantes de queima simulados foram feitas 33(número de barras) simulações gerando diferentes distribuições de potência sendo uma para cada barra de controle inserida.

Com intuito de demonstrar a viabilidade do método que identifique a queda de uma barra de controle em tempo real, o cálculo das respostas dos detectores externos foram realizados utilizando-se de um modelo alternativo ao apresentado no Capítulo 2, que utiliza a Teoria de Transporte de Nêutrons. Esta escolha se deve a princípio ao fato de que a presente proposta de simulação é similar a utilizada pelo método APA (Alpha/Phoenix/ANC System) [13] da Westinghouse. Além disso, pondera-se a esta decisão o alto gasto computacional para se obter as respostas dos detectores externos

através da Teoria de Transporte de Nêutrons nos diversos instantes de queima simulados.

A fim de obter as respostas dos detectores externos para a metodologia proposta é considerado também a relevância relatada em capítulos anteriores dos elementos combustíveis periféricos. Desta maneira, na metodologia utilizada foi considerado para o cálculo das respostas apenas as densidades de potências médias dos 5 elementos combustíveis mais periféricos, próximos aos detectores, como mostra a Figura 5.1 onde estes elementos combustíveis encontram-se destacados.

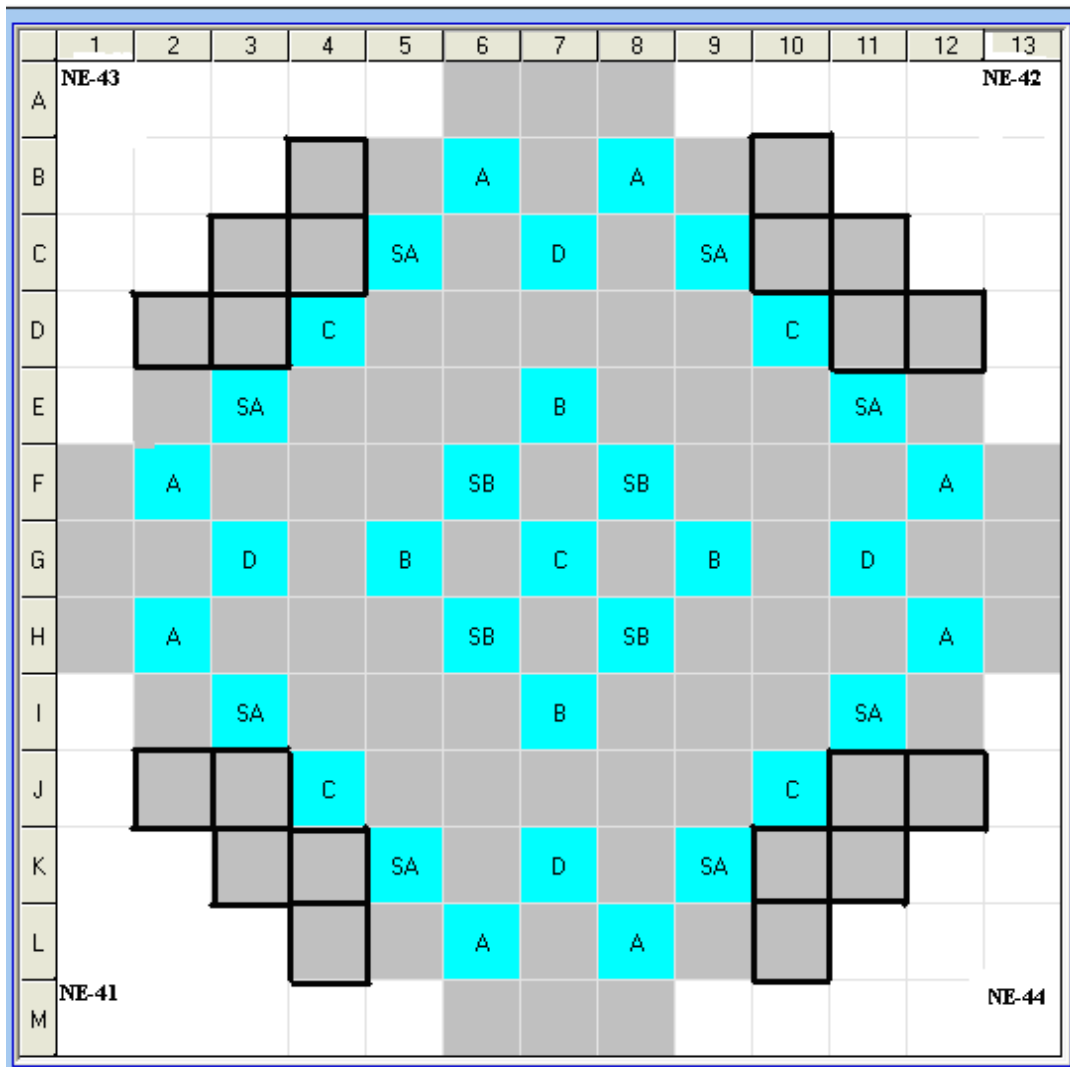


Figura 5.1: Representação dos elementos combustíveis periféricos

Assim como o código APA, na metodologia utilizada para gerar as respostas dos detectores externos, são calculadas as respostas fazendo uma relação da potência média dos 5 elementos combustíveis mais próximos dos detectores do caso de barra caída pela potência média dos elementos combustíveis de um caso de referência, em que todas as barra de controle estão retiradas [13].

O cálculo feito para se simular as respostas dos 4 detectores com uma barra caída em um instante de queima do reator é da seguinte forma:

$$NE - 42 = \frac{(\bar{P}_{D11} + \bar{P}_{D12} + \bar{P}_{C11} + \bar{P}_{C10} + \bar{P}_{B10})}{5} \quad (5.1)$$

$$NE - 43 = \frac{(\bar{P}_{D2} + \bar{P}_{D3} + \bar{P}_{C3} + \bar{P}_{C4} + \bar{P}_{B4})}{5} \quad (5.2)$$

$$NE - 41 = \frac{(\bar{P}_{J2} + \bar{P}_{J3} + \bar{P}_{K3} + \bar{P}_{K4} + \bar{P}_{L4})}{5} \quad (5.3)$$

$$NE - 44 = \frac{(\bar{P}_{J11} + \bar{P}_{J12} + \bar{P}_{K11} + \bar{P}_{K10} + \bar{P}_{L10})}{5} \quad (5.4)$$

Onde \bar{P}_{ij} é assim definido:

$$\bar{P}_{ij} = \frac{P_{ij}^{BC}}{P_{ij}}.$$

Sendo P_{ij}^{BC} e P_{ij} respectivamente a potência média do elemento combustível (i, j) para o caso de uma barra caída e a potência média do elemento combustível (i, j) para um caso de referência sem barra de controle. Os valores de i e j identificam o posicionamento dos elementos combustíveis periféricos no mapa do núcleo de um reator semelhante a Angra 1.

Na Tabela 5.1 é mostrado para o 14º instante de queima, que é o equivalente a 340 dias, os valores das respostas dos detectores externos NE-41, NE-42, NE-43, NE-44

para cada cenário de barra de controle caída. Na primeira coluna estão as barras de controle indicadas e nas colunas consecutivas as respostas dos detectores.

Tabela 5.1: Dados Referentes ao 14º instante de queima

BARRAS	NE-42	NE-43	NE-44	NE-42
B06	1.1042	0.9529	0.8446	1.122
B08	1.1212	0.8449	0.9524	1.1037
C05	1.1018	1.0032	0.6701	1.1613
C07	1.1589	0.8728	0.8728	1.159
C09	1.1614	0.6706	1.0032	1.1017
D04	1.0627	1.0633	0.5807	1.1761
D10	1.1767	0.5817	1.0626	1.0626
E03	1.003	1.1024	0.6703	1.161
E07	1.1507	0.9195	0.9193	1.1508
E11	1.1614	0.6707	1.102	1.0029
F02	0.9525	1.1044	0.8447	1.122
F06	1.0539	1.0547	0.8983	1.1529
F08	1.1525	0.8989	1.0538	1.054
F12	1.1212	0.8454	1.1044	0.9525
G03	0.8723	1.1594	0.8725	1.1586
G05	0.9193	1.1516	0.9195	1.1508
G07	1.0463	1.0468	1.0465	1.0461
G09	1.1507	0.9198	1.1509	0.9192
G11	1.1587	0.8736	1.1589	0.873
H02	0.8445	1.1227	0.9524	1.1037
H06	0.8981	1.1537	1.0541	1.054
H08	1.0536	1.0547	1.1527	0.8983
H12	1.1042	0.9532	1.1214	0.8448
I03	0.6702	1.1618	1.0032	1.1017
I07	0.9193	1.1516	1.1508	0.9188
I11	1.1018	1.0034	1.1616	0.6702
J04	0.5811	1.1769	1.0629	1.0629
J10	1.0624	1.0633	1.1769	0.5813
K05	0.6701	1.1621	1.1021	1.0027
K07	0.8726	1.1597	1.1586	0.8722
K09	1.003	1.1024	1.1616	0.6698
L06	0.8445	1.1227	1.1044	0.9525
L08	0.9522	1.1044	1.1214	0.8443

A fim de possibilitar que o método execute a sua função, foi necessário que atribuíssemos valores numérico de 1 a 33 para cada barra de controle existente no reator, como é mostrado na Tabela 5.2. Sendo assim, cada barra de controle possui uma representação numérica que representa um padrão possibilitando representações internas para o método.

Tabela 5.2: Representação Numérica das Barras de Controle

Barras de Controle	Representação Numérica	Tipo de Barra
B06	1	A
B08	2	A
C05	3	SA
C07	4	D
C09	5	SA
D04	6	C
D10	7	C
E03	8	SA
E07	9	B
E11	10	SA
F02	11	A
F06	12	SB
F08	13	SB
F12	14	A
G03	15	D
G05	16	B
G07	17	C
G09	18	B
G11	19	D
H02	20	A
H06	21	SB
H08	22	SB
H12	23	A
I03	24	SA
I07	25	B
I11	26	SA
J04	27	C
J10	28	C
K05	29	SA
K07	30	D
K09	31	SA
L06	32	A
L08	33	A

5.2 Implementação do Método Utilizando Rede Neural de Base Radial

Os dados foram divididos de forma a termos um conjunto de dados de treinamento e um conjunto de dados para a execução de testes.

Na implementação do método utilizando a rede neural de base radial a arquitetura da rede foi definida por uma camada de entrada com 4 nós e uma camada de saída de apenas 1 neurônio. O fato de utilizarmos um vetor de 4 dimensões de entrada é devido aos 4 valores dos sinais dos detectores. As funções de ativação escolhidas nos neurônios da camada oculta foram funções Gaussianas e na de saída foi a função Linear.

Inicialmente são definidos valores para parâmetros x_j e σ_j para o conjunto de funções gaussianas na camada oculta que são os centros das funções e a largura respectivamente. Posteriormente, são definidos os pesos das funções lineares w_i correspondentes a camada de saída que serão ajustados.

Os centros das funções Gaussianas normalmente podem ser escolhidos de forma a cada vetor de entrada do conjunto de treinamento ter um centro correspondente, de forma a permitir que se escolham centros apropriados para todo o domínio do conjunto de vetores de entrada. Porém, os vetores de treinamento podem possuir grupos de centro muito próximos uns dos outros, ou seja, mais vetores com centro de vizinhanças comuns resultando em mais Gaussianas do que necessário, logo, existem métodos mais elaborados para determinação dos centros [17].

As larguras das funções gaussianas são definidas dependendo do número de centros e da distância entre os mesmos.

O processo de aprendizagem consiste em achar uma superfície em um espaço multidimensional que gere o melhor ajuste do conjunto de dados de treinamento, ou seja, fazer com que a rede aproxime-se o máximo possível do mapeamento de entrada e saídas do conjunto de dados de treinamento. Esse processo de treinamento é feito

através da otimização em processos de ajustes para a superfície de interpolação, baseada em pontos conhecidos presentes na rede na forma de dados de entradas e saídas.

A rede neural de base radial foi implementada através da plataforma MATLAB onde foi utilizada a função NEWRB. Neste tipo de função, os ajustes não são interrompidos até que o erro entre as respostas desejadas e a resposta da rede seja igual a zero para todo o conjunto de vetores de treinamento da rede.

A idéia é possibilitar que os vetores do conjunto de treinamento, na medida em que representam uma amostra típica da coleção de dados com que se utilizará na rede, reflitam as regiões em que os vetores de entrada tenderão a se agrupar para cada categoria da faixa dos vetores de saída. Qualquer ponto de uma aglomeração específica deve estar a uma distância euclidiana menor que a do agrupamento do outro ponto.

A propagação do sinal na rede utilizada é feita através do sinal de entrada x_i que se propagam através da camada oculta sendo a rede amplamente conectada até a camada de saída onde se obtêm os sinais de resposta da rede.

A rede executa o seguinte mapeamento, como mostra a Figura 5.2.

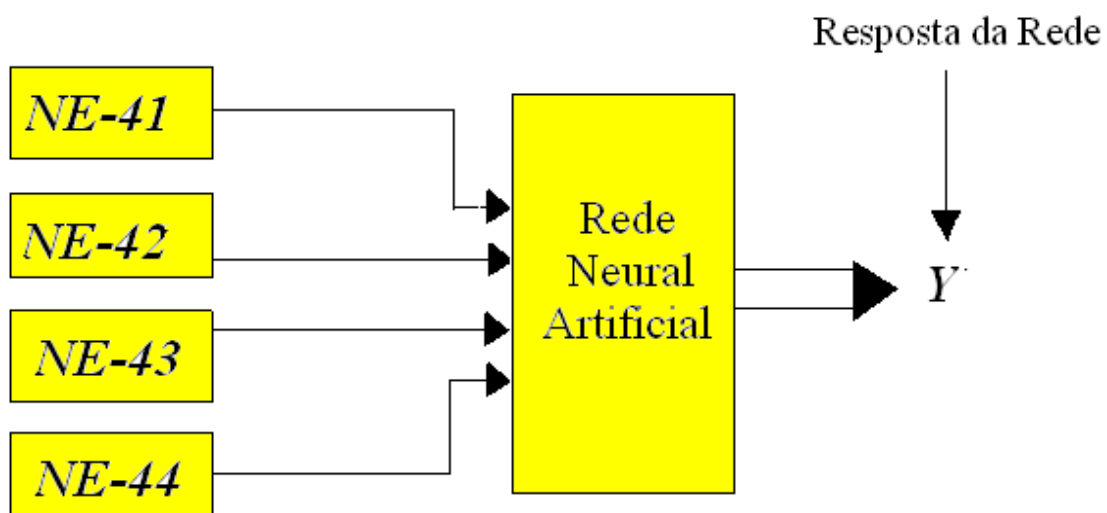


Figura 5.2: Mapeamento da rede

Sendo $x_i = [NE - 41, NE - 42, NE - 43, NE - 44]$ a entrada na rede em um instante qualquer e Y a resposta da rede com a representação numérica da barra de controle caída. Representação esta que é definida de acordo com a Tabela 5.2.

Os resultados da fase de treinamento assim como dos testes feitos para a rede já treinada são demonstrados no capítulo referente aos resultados.

5.3 Implementação do Método utilizando o Sistema Especialista

Um bom funcionamento do sistema especialista está inteiramente relacionado a uma melhor maneira e mais detalhada forma de representar o conhecimento, tornando os modelos mais específicos e poderosos.

O conhecimento por si só não permite inferência em relação a seu domínio, é necessário, portanto, representações internas de maneira que o mapeamento seja feito através dos fatos para as tais representações internas que serão de fato manipuladas pelo sistema. De maneira geral, deve-se descrever o conhecimento de forma a que seja ele mesmo de fato a entidade que representamos.

A mais imediata, porém não trivial forma de descrever o conhecimento de forma simbólica foi tentar abstraí-lo e escrevê-lo de forma onde os dados estabeleçam relações entre si. Desta forma procurou-se representar os fatos (respostas dos detectores) como um conjunto de relações do mesmo tipo. O objetivo foi estabelecer um conjunto de relações a fim de proporcionar informações que poderiam ser exigidas por regras gerais.

Estas relações foram identificadas quando através das simulações, analisou-se as respostas dos detectores externos em alguns instantes de queima. Nas Figuras 5.3, são mostradas os valores das respostas dos detectores quando em um cenário de queda de uma barra de controle para alguns instantes de queima. Os valores das respostas dos

detectores em instantes diferentes na Figura 5.3 são referentes às barras 1 e 10 respectivamente.

Estas relações entre os valores das respostas dos detectores nos instantes analisados para as barras fornecem informações necessárias para a construção de um conjunto de regras. A idéia é permitir que em instantes futuros mesmo que esse comportamento dos valores das respostas dos detectores varie, o sistema especialista consiga responder de forma satisfatória e identifique um determinado padrão das respostas dos detectores de forma lógica através de processos de inferência.

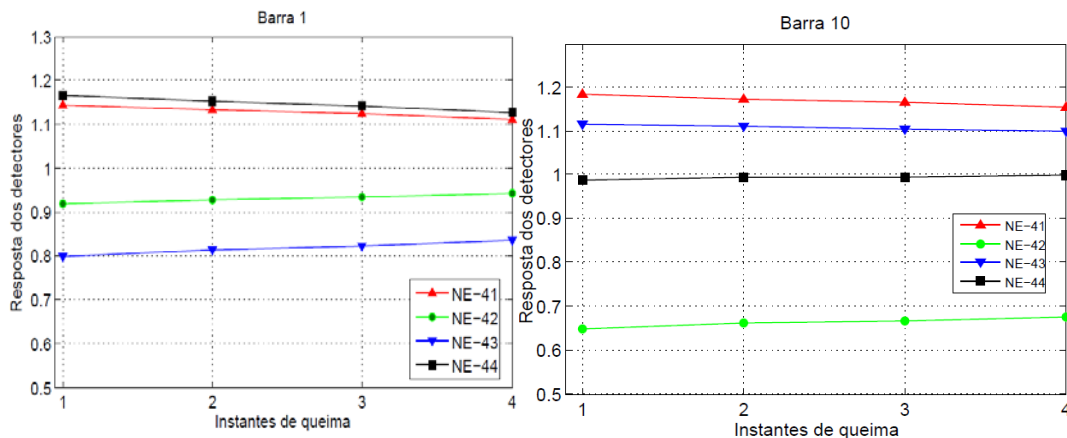


Figura 5.3: Resposta dos detectores em cenários de queda de barra em alguns instantes de queima

As variáveis que compõem os antecedentes (*if*) das regras correspondem a valores dos detectores e relações entre eles e a parte consequente (*then*) corresponde a um identificador de barra de controle a qual o tipo de configuração os antecedentes pertencem. Os indicadores das barras são representações numéricas como foi mostrado na Tabela 5.2.

Quando a condição é verdadeira, o sistema tem como solução do problema o indicador que seria a classe a que pertence àquela configuração de sinais de respostas dos detectores e a barra de controle que está caída no núcleo será identificada.

O número de regras geradas está diretamente relacionada ao número de padrões existentes no método, ou seja, foram geradas 33 regras que representam cada barra de controle do reator PWR. Cada uma das classes é responsável pela formação de uma regra.

A inferência neste tipo de arquitetura carrega a estrutura dos indicadores com suas respectivas relações e atributos através de um encadeamento para frente. O mapeamento feito pelo sistema especialista é mostrado na Figura 5.4.

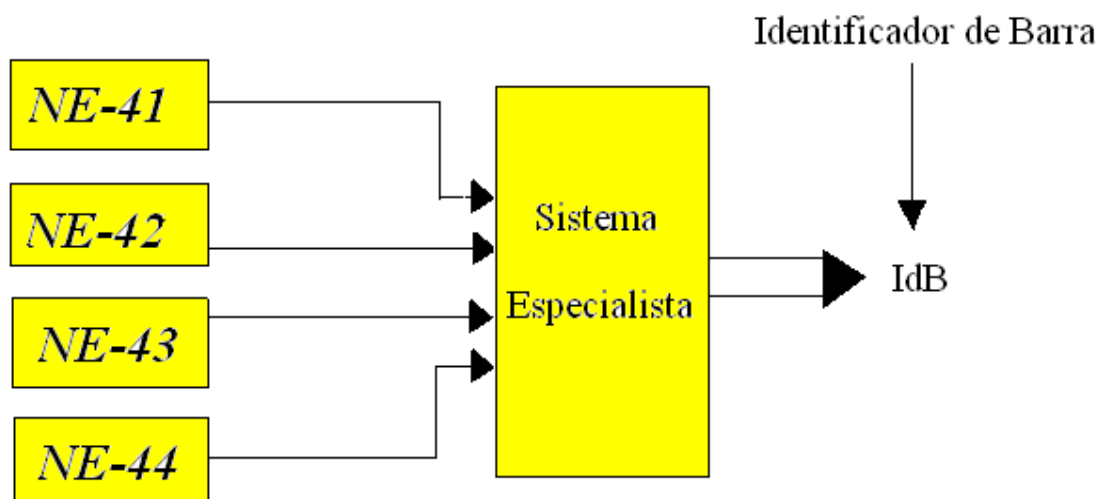


Figura 5.4: Mapeamento do Sistema Especialista

Ao sistema acessar um substancial conjunto de dados é realizado uma tarefa de diagnóstico a fim de verificar a eficácia do método que será apresentado no próximo capítulo na seção de resultados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Foram calculados as respostas dos detectores durante simulações de queda de barras de controle em um reator PWR. A inserção indevida de uma barra de controle produz uma distorção na distribuição de potência, o que resulta em uma variação das respostas dos detectores. Portanto, mostra-se apropriado ao método a utilização das resposta dos detectores.

Neste capítulo são apresentados os resultados do método feitos para a rede neural de base radial e o sistema especialista.

As simulações utilizando o CNFR foram feitas para um ciclo fresco de um reator PWR semelhante a Angra 1 com fator de carga mantido igual a 1.

As respostas dos detectores externos foram obtidas através da metodologia apresentada no Capítulo 5, que relaciona as potências médias dos elementos combustíveis mais periféricos, próximos aos detectores, estabelecendo uma relação entre as potências médias dos elementos combustíveis. Esta metodologia é similar a utilizada pelo sistema APA da Westinghouse.

Com o intuito de fornecer dados suficientes para o sistema inteligente foram feitas simulações em 18 instantes de queima abrangendo um total de 380 dias de operação do reator PWR, como mostra a Tabela 6.1. A idéia consiste em obter uma quantidade de dados grande suficiente e uma variedade de informações relevantes para garantir o funcionamento do método.

Os resultados para cada método são expressos para todo o conjunto de dados simulados.

Tabela 6.1: Instantes de Queima Simulados

Instantes de Queima Simulados	Equivalente a dias
1°	0
2°	3
3°	20
4°	60
5°	80
6°	120
7°	140
8°	180
9°	200
10°	240
11°	260
12°	280
13°	320
14°	340
15°	363
16°	368
17°	273
18°	380

6.1 Resultados Obtidos Utilizando a Rede Neural de Base Radial

6.1.1 Fase de Treinamento

O conjunto de dados de treinamento é composto por 4 instantes de queima sendo eles: 1°, 4°, 9°, 16°.

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 mostram os resultados da fase de treinamento da rede para cada um dos vetores do conjunto de dados de treinamento. Cada ponto consiste na resposta da rede para um vetor de um determinado instante de queima.

A escolha dos 4 instantes de queima referentes ao conjunto de dados de treinamento foi feita de maneira a abranger o domínio do problema e de forma a possibilitar o melhor resultado possível da rede. Podemos observar através dos gráficos da fase de treinamento que ao final do processo de aprendizagem, o erro E_1 entre a resposta da rede Y_1 e a resposta correta T_1 que é definido como $E_1 = Y_1 - T_1$, é igual a zero em todos os pontos, como esperado, já que foi definido anteriormente o uso da função NEWRBE da plataforma MATLAB. Onde neste tipo de função, os ajustes não

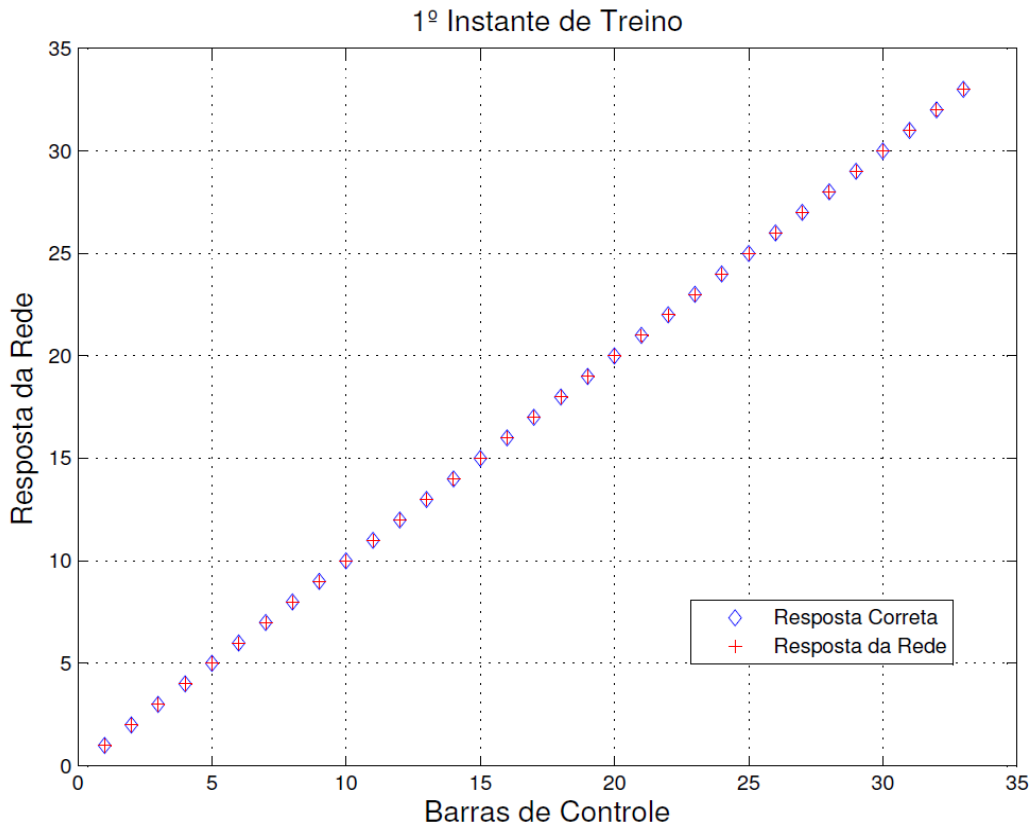


Figura 6.1: Resposta da Rede para o Treinamento no 1º instante de queima

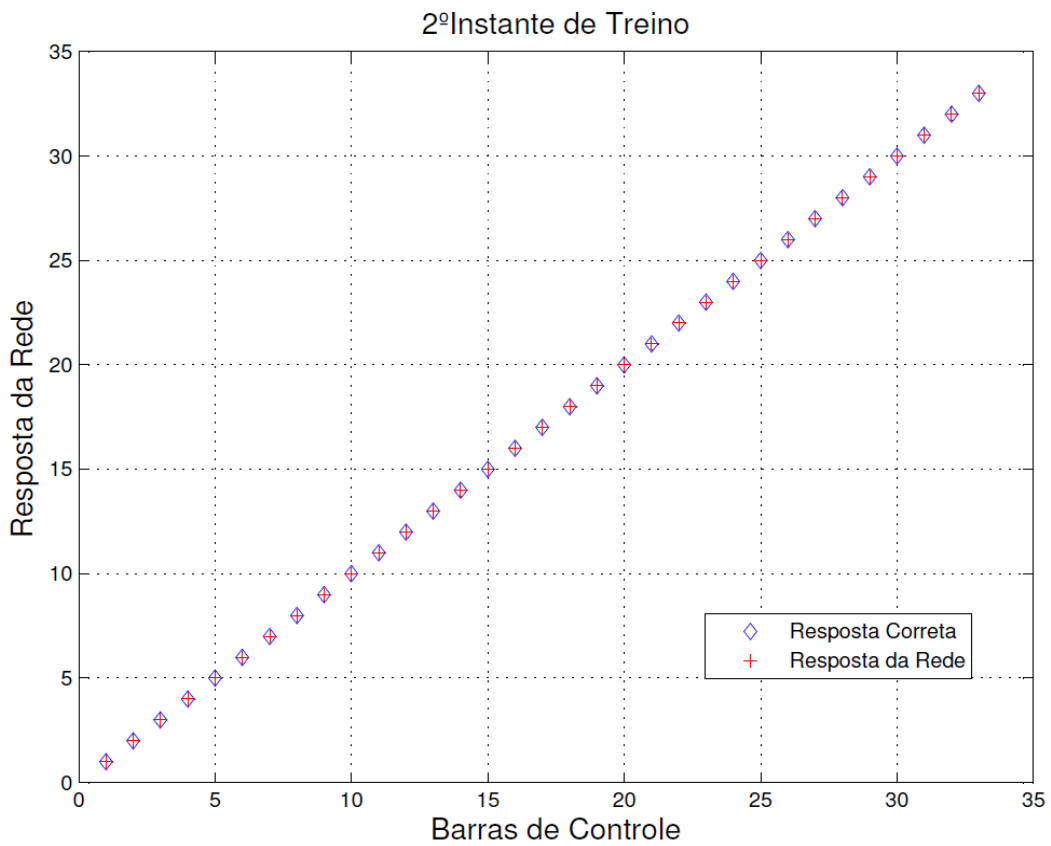


Figura 6.2: Resposta da Rede para o Treinamento do 4º instante de queima

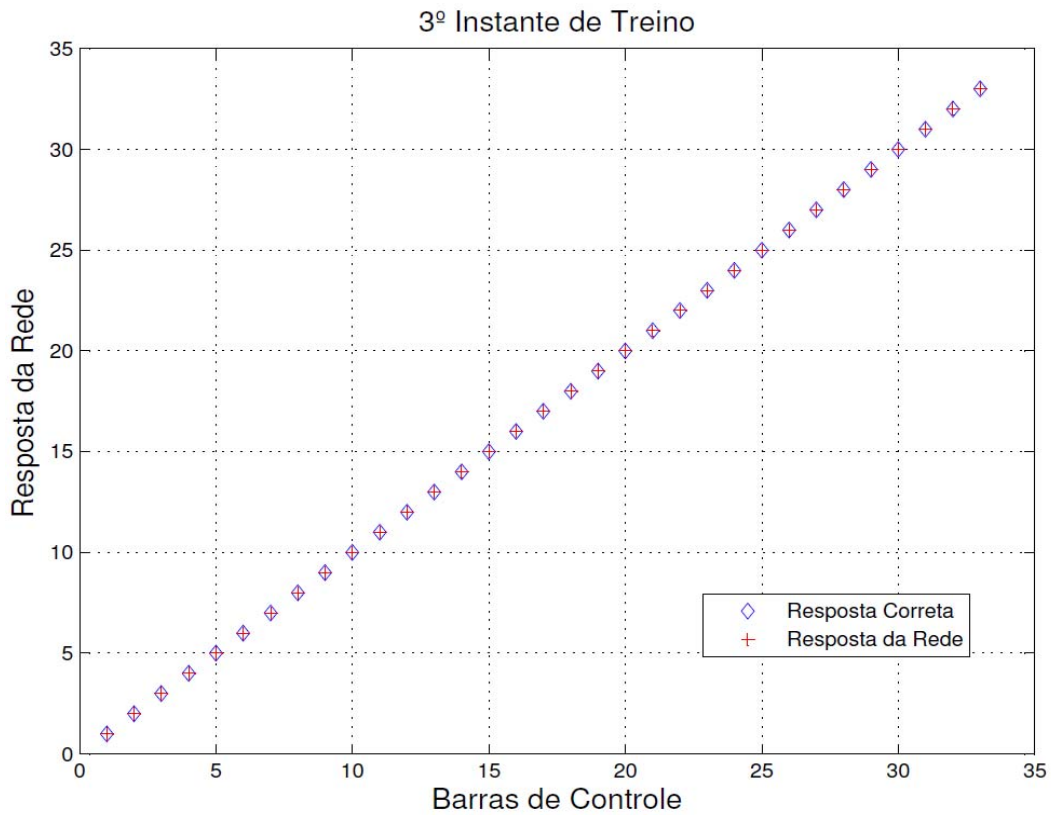


Figura 6.3: Resposta da Rede para o treinamento no 9º instante de queima

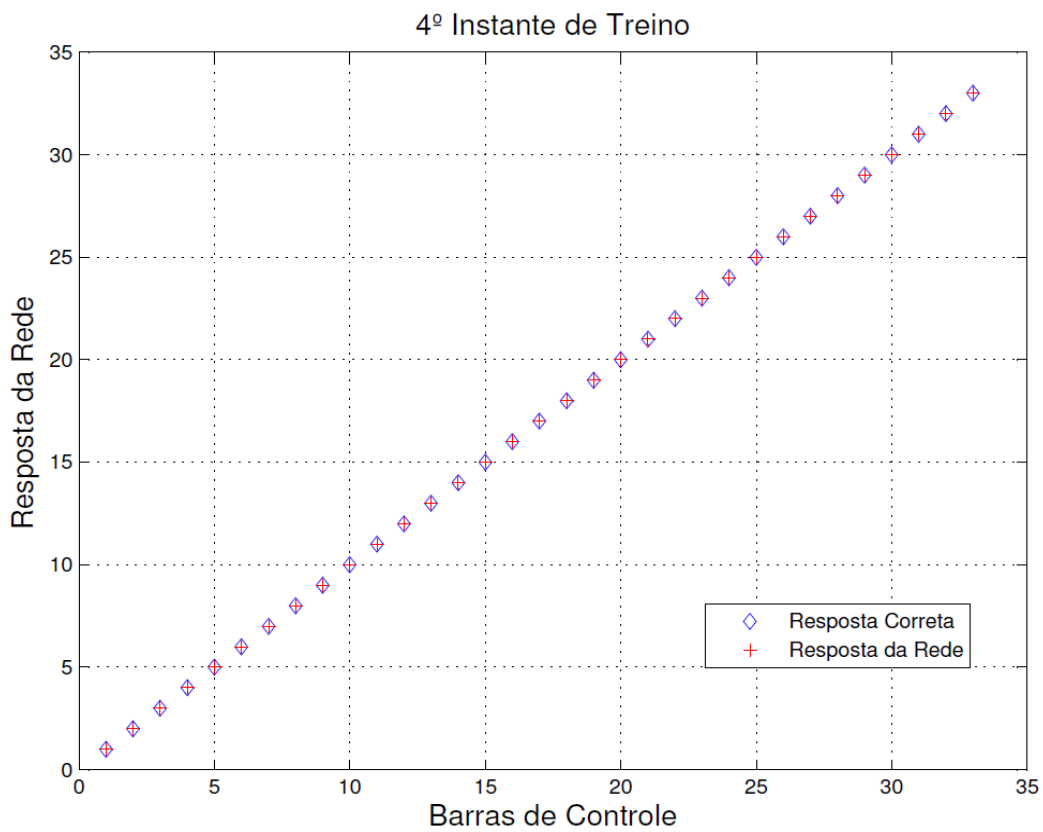


Figura 6.4: Resposta da Rede para o Treinamento no 16º instante de queima

são interrompidos até que o erro entre as respostas desejadas e a resposta da rede seja igual a zero para todo o conjunto de dados de treinamento.

6.2.2 Fase de Testes

O conjunto de dados utilizados para a execução dos testes é composto pelos instantes de queima: 2°, 3°, 5°, 6°, 7°, 8°, 10°, 11°, 12°, 13°, 14°, 15°, 17°, 18°.

A Figura 6.5 mostra as respostas da rede para todo o conjunto de dados utilizados na execução dos testes.

De forma a simplificar a leitura de dados, a Figura 6.6 exhibe o erro da rede para os dados de teste em cada instante de queima. A figura mostra se a rede consegue identificar corretamente ou não a barra de controle caída no núcleo. A verificação do método para a identificação correta da barra é feita comparando-se a resposta da rede com a resposta correta. Logo, o erro da rede E_2 nesta fase é definido por $E_2 = T_2 - Y_2$, onde T_2 é a resposta correta e Y_2 é a resposta da rede.

Os erros na figura 6.6 foram aproximados para o seu número inteiro mais próximo. Podemos garantir com certeza que a rede identifica de forma correta a barra de controle caída quando o módulo do erro $\|E_2\| < 0.5$. Logo, quando o módulo do erro é superior ou igual a 0.5, $\|E_2\| \geq 0.5$, significa que a rede não conseguiu identificar corretamente qual barra de controle está caída no núcleo. Quando o erro é menor que 0.5 o valor da resposta da rede se encontra mais próximo do valor correto da barra do que de uma barra anterior ou posterior a ela. Quando o erro é maior podemos dizer que a resposta da rede está mais próxima do valor numérico de outra barra de controle.

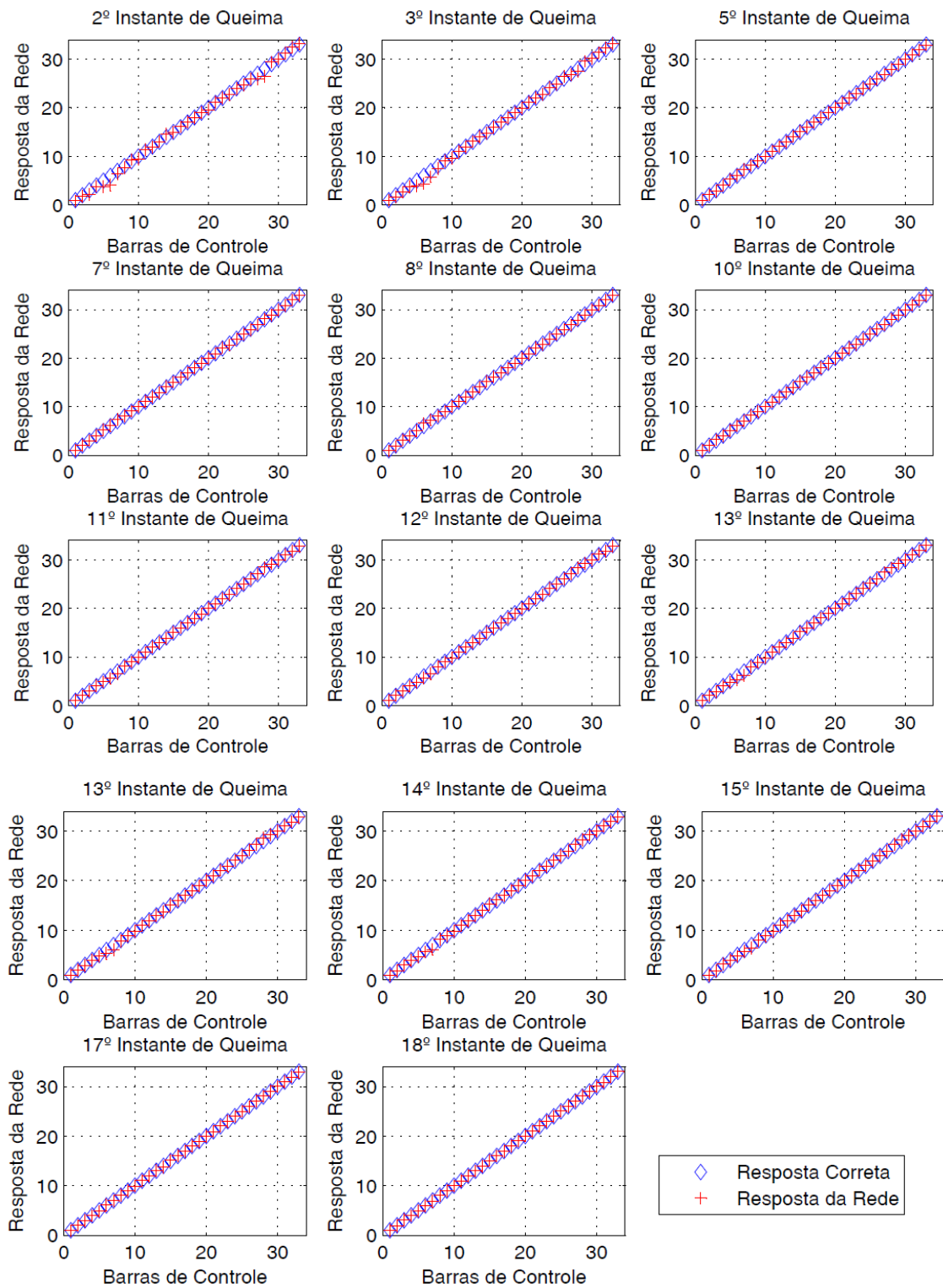


Figura 6.5: Resposta da Rede para o conjunto de dados de teste.

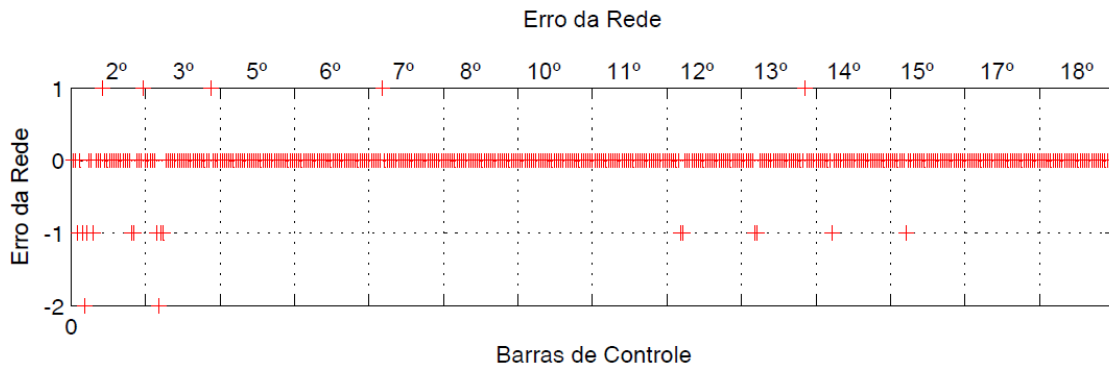


Figura 6.6: Erros da Rede para o conjunto de dados de teste

Na Tabela 6.1, é mostrado os pontos onde as barras de controle não foram identificadas corretamente. Assim como o erro da rede, tipo de barra e instante simulado onde o método não conseguiu identificar de forma correta a barra de controle.

Tabela 6.1: Barras de Controle não identificadas corretamente

Instantes de queima	Posição no núcleo	Tipo de Barra	Resposta Correta T2	Resposta da Rede Y2	Erro - $\ E_2\ $
2°	C05	SA	3.0	2.1819	0.8181
2°	C09	SA	5.0	3.7743	1.2257
2°	D05	C	6.0	4.1286	1.8714
2°	D10	C	7.0	6.4002	0.6998
2°	E11	SA	10.0	9.4045	0.5955
2°	F12	A	14.0	14.5652	0.5652
2°	J04	C	27.0	26.0011	0.9989
2°	J10	C	28.0	26.5041	1.4959
2°	L06	A	32.0	32.5082	0.5082
3°	C09	SA	5.0	3.9627	1.0373
3°	D04	C	6.0	4.3685	1.6315
3°	D10	C	7.0	5.7834	1.2166
3°	SA	SA	8.0	7.4596	0.5404
3°	SA	SA	29.0	29.5843	0.5843
7°	D04	C	6.0	6.5946	0.5946
12°	D04	C	6.0	5.3662	0.6338
12°	D10	C	7.0	6.1491	0.8509
13°	D04	C	6.0	5.3433	0.6567
13°	D10	C	7.0	6.0418	0.9582
13°	J10	C	28.0	28.6383	0.6383
14°	D10	C	7.0	6.1498	0.8502
15°	D10	C	7.0	6.3853	0.6147

6.2 Resultados Obtidos Utilizando o Sistema Especialista

O modelo apresentado de Sistema Especialista detalhado no Capítulo 5 definiu uma estrutura onde tem como parte principal a representação do conhecimento, a fim de possibilitar a classificação de um domínio específico de dados. A representação do conhecimento foi feita com a utilização de regras gerais de classes.

As condições antecedentes (*if*) foram escritas a partir do conhecimento representado no sistema baseado no comportamento das respostas dos detectores em alguns instantes de queima como descrito no Capítulo 5 e as condições consequentes (*then*) foram avaliadas.

A fim de demonstrar a funcionalidade e verificar a viabilidade do método baseado em um mapeamento feito pelas respostas dos detectores externos através do sistema especialista, na Figura 6.7, é mostrada a realização de uma tarefa de diagnóstico feito ao acessar a base de dados do problema.

A verificação do método para a identificação correta da barra é feita comparando-se a resposta do sistema especialista com a resposta correta da barra de controle. Logo, o erro do diagnóstico na Figura 6.8 é definido como $E_{SE} = idB - iB$, sendo *idB* o identificador da barra gerado como solução do sistema especialista ao problema e *iB* o valor correto da barra de controle. O diagnóstico do sistema especialista na figura 6.8 mostra que o erro do método E_{SE} para todas as barras em todos os instantes simulados é igualmente a zero. Logo, verifica-se que as regras foram disparadas e percebe-se que a inferência se ajusta perfeitamente com a representação do conhecimento utilizada, além de identificar corretamente todas as barras de controle caídas no núcleo.

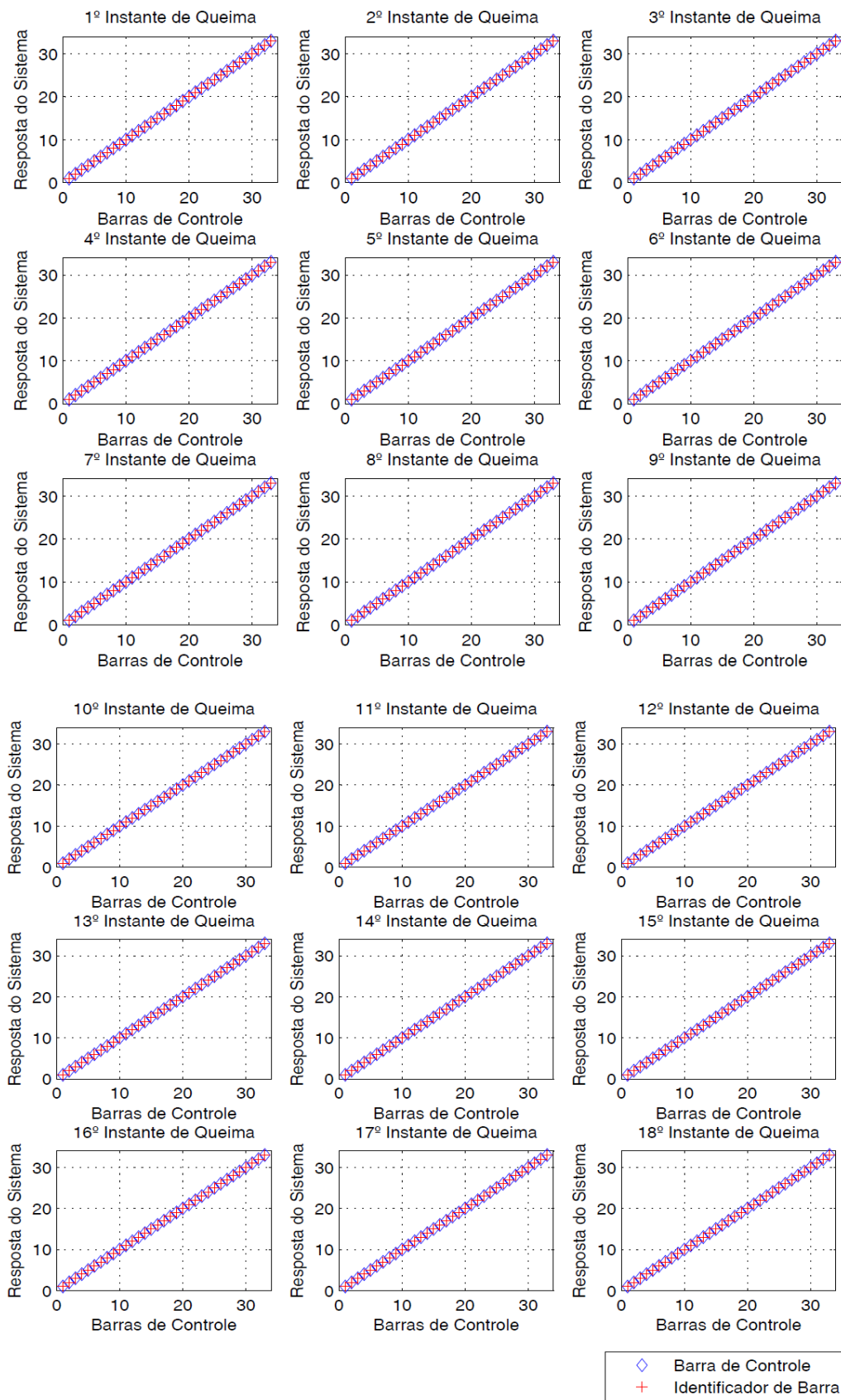


Figura 6.7: Resposta do sistema especialista aos testes

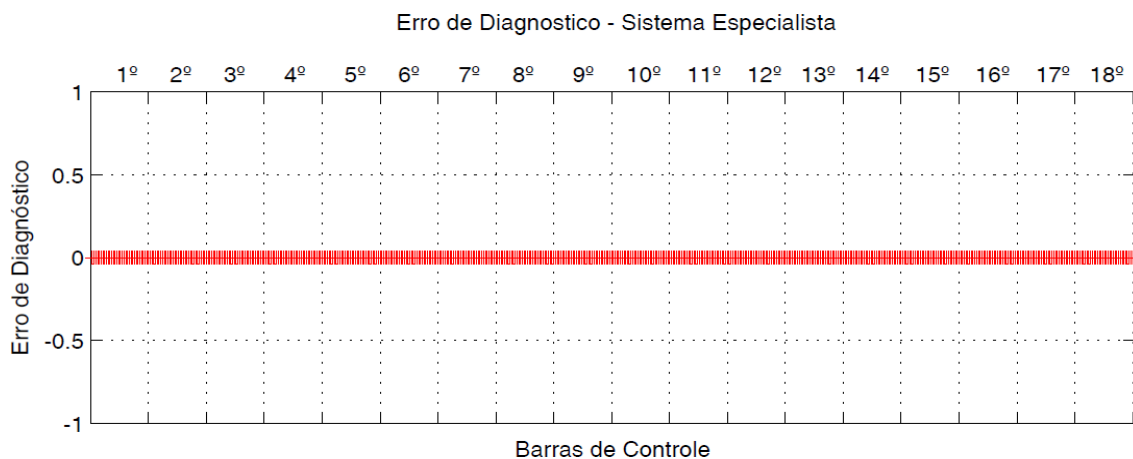


Figura 6.8: Erro de Diagnóstico do Sistema Especialista

Podemos ressaltar ainda, o fato de não ter sido necessária a resolução de conflito acerca da inferência feita. Fato este que poderia ter ocorrido se o sistema especialista se deparasse com situações na qual uma regra satisfizesse mais de uma condição. Mesmo em barras onde o comportamento das respostas dos detectores é bem parecido não verificou-se este fato.

Uma explicação para o ótimo resultado apresentado para o sistema especialista é a influência exercida pela forma como o conhecimento foi representado. A Representação do Conhecimento foi um ponto fundamental neste trabalho, visto que, expressou de modo natural a relação entre as variáveis e com isso tornou-as intrínseco a si na inferência do sistema especialista.

Além disso, o bom resultado do sistema especialista deve-se também ao comportamento dos detectores quando em um cenário de queda de barras de controle. Na Figura 6.9, observa-se o comportamento dos detectores em um cenário de queda de barra de controle em todos os instantes simulados. Verifica-se uma variação muito sutil no comportamento dos detectores nos instantes de queima, o que permitiu que a inferência fosse bem executada. Ainda na Figura 6.9, podemos observar também que as respostas dos detectores ensaiam uma certa simetria em relação ao comportamento.

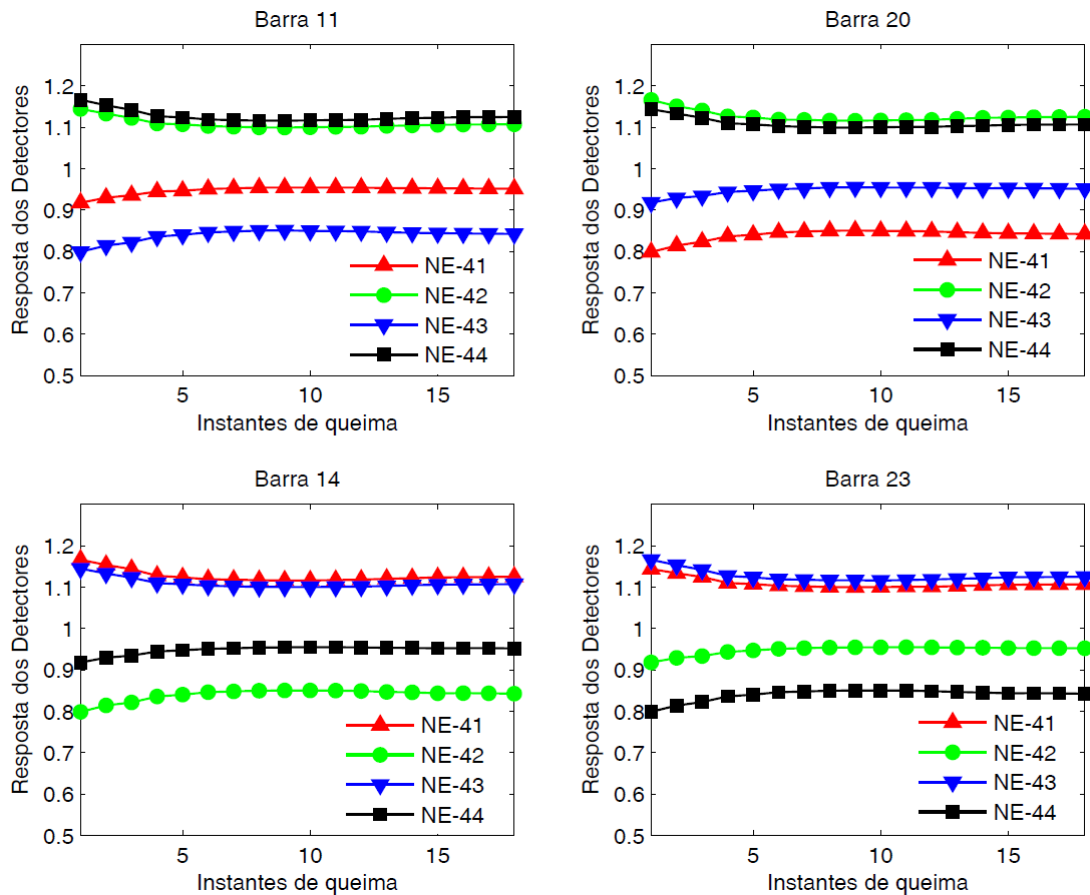


Figura 6.9: Comportamento dos detectores em cenários de queda de barra de controle

Esta simetria é observada quando as respostas são analisadas para cenários de queda de barras de controle do mesmo tipo, como mostrado na Figura 6.9, onde as barras 11, 14, 20 e 23 são do grupo de controle A. Isto é evidente, já que as barras do mesmo tipo se encontram em posições simétricas. Vale ressaltar que esta simetria é em relação ao comportamento das respostas sendo que os valores são diferentes para cada barra, ou seja, o comportamento das respostas é semelhante, porém a relação entre os sinais é diferente.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido nesta dissertação está relacionado com a necessidade de monitoramento das usinas nucleares assim como sua segurança. O objetivo foi desenvolvimento de um método que permita identificar em tempo real uma possível queda de barra de controle no núcleo de um reator do tipo PWR, através das respostas dos detectores externos.

Para um ciclo específico do reator de Angra 1 foi possível reconhecer padrões de respostas dos detectores externos através de um método que foi capaz de identificar a queda da barra de controle em tempo real.

Os resultados obtidos pelas respostas dos detectores externos foram calculados através de simulações que forneceram dados para testar o método. As simulações foram feitas para 18 instantes de queima abrangendo 380 dias do reator operando a plena potência.

Foram feitos testes utilizando redes neurais do tipo Perceptions de Multicamadas, redes neurais de Base Radial e um Sistema Especialista. A cargo de informação os resultados referentes à rede Perception de multicamadas não obtiveram um resultado satisfatório que permitisse ser utilizada no método.

Os resultados dos testes mostraram que a rede de Base Radial obteve um desempenho razoável, pois mostrou alguma dificuldade de reconhecer certas flutuações das respostas dos detectores. Já o Sistema Especialista mostrou-se absolutamente eficaz a resolução do problema de identificação de barra de controle, reconhecendo todos os padrões dos sinais emitidos pelos detectores e identificando as barras corretamente.

Os ótimos resultados apresentados pelo Sistema Especialista se mostram possíveis devido à forma como o conhecimento foi representado e obviamente à forma e o bom comportamento das respostas dos detectores externos em relação aos instantes de queima. Como foi demonstrado, as respostas dos detectores tiveram um comportamento muito bem definido para variações de potência devido à distorção provocada pelas barras. Este tipo de conhecimento permitiu que o motor de inferência demonstrasse total concordância nos resultados possibilitando tornar o sistema especialista uma ferramenta poderosa para identificar a barra de controle caída.

Estes resultados nos possibilitam concluir que a implementação de um método de identificação de barra de controle em tempo real baseado nas respostas dos detectores externos é viável. Além disso, podemos afirmar que os detectores externos respondem de forma satisfatória a variação da distribuição de potência no núcleo devido à queda de barras de controle para sistemas baseados em conhecimento.

Contudo, ainda não é possível inferir sobre a aplicabilidade do método através do sistema especialista para outros ciclos do reator, já que não se pode afirmar com certeza se o comportamento dos sinais dos detectores externos será similar ao observado neste trabalho que permitiu a utilização de regras para resolução do problema.

No entanto, uma questão crucial é responder se esse tipo de comportamento vale para outros ciclos, outros níveis de potência ou até mesmo outros núcleos a fim de possibilitar uma dedução independente das condições específicas do reator.

Em relação às redes neurais artificiais, acreditamos que é possível uma melhora dos resultados utilizando de ferramentas eficientes que possibilitem a melhor escolha do conjunto de dados de treinamento da rede de forma a permitir uma melhor generalização da mesma.

Como sugestão de continuidade do trabalho propõe-se a implementação de um sistema de identificação em tempo real de barra de controle feita com os dados oriundos diretamente da usina nuclear de Angra 1 em ciclos diferentes e níveis de potência diferentes, a fim de permitir a monitoração de eventos relacionados à queda de barras de controle. Porém fica a sugestão de desenvolver um sistema baseado em uma inferência nebulosa para garantir a eficácia do sistema independente de condições específicas do reator. Ainda como proposta de trabalhos futuros considera-se de importante o estudo dos Termopares para auxiliar no mecanismo de monitoração de queda de barras de controle e possibilitar uma operação mais segura dos reatores do tipo PWR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Final Safety Analysis Report (FSAR) - Central Almirante Álvaro Alberto - Unit I**, Vol.12, Capítulo 15, Item 15.2.3, Furnas Centrais Elétricas S.A., Rio de Janeiro.
- [2] **Especificação Funcional do Sistema de Geração de Dados do Reator (GEDAR) do Código Nacional de Física de Reatores CNFR**, Programa de Engenharia Nuclear-COPPE/UFRJ, 2006.
- [3] FINNEMANN, H., BENNEWITZ, F. AND WAGNER, M. R., “Interface Current Techniques for Multidimensional Reactor Calculations”, **Atomkernenergie-Kerntechnik**, vol. 300, pp. 123-127, 1977.
- [4] **Comissão Nacional de Energia Nuclear, Reatores a Água Leve Pressurizada: Visita a Centrais Nucleares e Fábricas de Componentes de Combustível**, vol. 1, 1972.
- [5] MURRAY, R. L., **Engenharia Nuclear**, 2º Ed., Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1963.
- [6] CRUMP, M. W. and LEE, J. C., “Calculation of Spatial Weighting Function for Ex-Core Neutron Detectors”, **Nuclear Technology**, vol. 41, pp. 87-96, January 1978.
- [7] SADDE, L., M., **Determinação da Resposta nos Detectores Externos de um Reator PWR para Diferentes Configurações de queda de Barras de Controle**. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- [8] **Especificação Técnica do Sistema de Geração de Dados do Reator (GEDAR) do Código Nacional de Física de Reatores CNFR**, Programa de Engenharia Nuclear-COPPE/UFRJ, 2006.
- [9] Duderstadt, J. J., Hamilton, L. J., **Nuclear Reactor Analysis**, 1º Ed, New York, John Wiley & Sons, inc., 1976.

- [10] Rich, E. E Knight, K., **Inteligência Artificial**: 2ªed., Markon Books, São Paulo, 1993.
- [11] SOUTO K. C., **Sistema Especialista com Lógica Nebulosa para Cálculo em Tempo Real de Indicadores de Desempenho Segurança na Monitoração de Usinas Nucleares**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005
- [12] HAYKIN, S., **Redes Neurais: Princípios e Práticas**, 2ed, Bookman, Porto Alegre 2001.
- [13] T.Q. NGUYEN and J.R. RATHKOPF, **APA-Alpha/Phoenix/ANC System: Phoenix-P Computer User's Manual and Auxiliary Code** - Westinghouse Electric Corporation; 7.6.2, 1994.
- [14] TOCHIHARA, H.; OCHIAI, E.; HASEGAWA, T., "Reevaluation of Spatial Weighting Factors for Ex-Core Neutron Detector", **Nuclear Industry** v. 58, pp. 310-317, August, 1982.
- [15] Garcia, V.S., **Determinação da Resposta nos Detectores Externos de um Reator PWR Usando a Equação Adjunta de Transporte de Nêutrons**. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [16] ALVIM, A. C. M., **Métodos Numéricos em Engenharia Nuclear**, 1 ed., Centauro, São Paulo, 2007.
- [17] S.CHEN, C. F. N. COWAN AND P. M. GRANT, "Orthogonal Least Square Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks", **IEEE Transactions on Neural Networks**, vol. 2, nº 2, March 1991.
- [18] O. Ludwig, E. M. M. Costa, **Redes Neurais: Fundamentos e Aplicações em C**, 1º Ed, Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2007.

[19] SILVA, F. C. E MARTINEZ, A. S., “Aceleração do Método Nodal NEM Usando Diferenças Finitas de Malha Grossa”, **VI Encontro de Modelagem Computacional**, Nova Friburgo, RJ, Brasil, 2003.

[20] KOVÁCS, Z. L., **Redes Neurais Artificiais: Fundamentos e Aplicações.**, 4º Ed., Livraria da Física, São Paulo, 2006.

ANEXOS 1

Neste anexo são mostradas as propriedades das Funções de Base do Método de Expansão Nodal utilizados para o cálculo do fluxo neutrônico.

$$1- \int_0^1 h_k(\xi) d\xi = 0 \quad ; \quad \forall k \geq 1,$$

$$2- h_k(1) = h_k(0) = 0 \quad ; \quad \forall k \leq 3,$$

$$3- \int_0^1 h_1(\xi) \frac{d^2 h_k(\xi)}{d\xi^2} d\xi = \begin{cases} -12 & \text{se } k = 3 \\ 0 & \text{se } k \neq 3 \end{cases},$$

$$4- \int_0^1 h_2(\xi) \frac{d^2 h_k(\xi)}{d\xi^2} d\xi = \begin{cases} 12 & \text{se } k = 4 \\ 0 & \text{se } k \neq 4 \end{cases},$$

$$5- \int_0^1 h_1(\xi) h_k(\xi) d\xi = \begin{cases} 1/3 & \text{se } k = 1 \\ 0 & \text{se } k = 2 \\ 1/5 & \text{se } k = 3 \\ 0 & \text{se } k = 4 \end{cases},$$

$$6- \int_0^1 h_2(\xi) h_k(\xi) d\xi = \begin{cases} 0 & \text{se } k = 1 \\ 1/5 & \text{se } k = 2 \\ 0 & \text{se } k = 3 \\ -3/35 & \text{se } k = 4 \end{cases},$$

Onde $\xi = \frac{u}{a_u^n}$.

ANEXOS 2

Neste anexo segue o conjunto de regras do Sistema Especialista utilizado no método. As regras gerais utilizadas seguem uma estrutura IF-THEN e são no total 33 que corresponde ao número de barras de controle de Angra 1. Cada barra de controle foi associada a padrão das respostas dos detectores. As regras quando avaliadas como verdadeiras tem como solução do problema um identificador de barra. As regras foram feitas baseado nas relações entre as respostas dos detectores.

```
%*****
% Method - Diag_Barra
%*****
function [idB] = Diag_Barra (Mer, Meg, Meb, Mek, iB)

    idB = 0;

%*****
%Distancias
*****
    drg = abs(Mer - Meg); drb = abs(Mer - Meb); drk = abs(Mer - Mek);
    dgb = abs(Meg - Meb); dgk = abs(Meg - Mek); dbk = abs(Meb - Mek);

    dP00 = 0.005; dP01 = 0.01; dP02 = 0.02; dP03 = 0.03;
    dP05 = 0.05; dP10 = 0.10; dP20 = 0.20; dP25 = 0.25;
    dP30 = 0.30; dP35 = 0.35; dP40 = 0.40; dP90 = 0.90;

%*****
% Barra - 1
%*****
    if (Mek > Meg && Mek > Meb && ...
        Mer > Meg && Mer > Meb && ...
        dbk > dgk && dgk > drk && ...
        drk > dP01 && drk < dP03)
        idB = 1;
    end

%*****
% Barra - 2
%*****
    %dgk > dP01 && dgk < dP03 && ... % Ver todos os iguais a este
    if (Mer > Meb && Mer > Meg && ...
        Mek > Meb && Mek > Meg && ...
        drg > drb && drb > drk && ...
```

```

        drk > dP01 && drk < dP03)
        idB = 2;
    end
%*****
% Barra - 3
%*****
        if (Mek > Meg && Mek > Meb && ...
            Mer > Meg && Mer > Meb && ...
            dbk > dgk && dgk > drk && ...
            drk > dP05 && drk < dP10)
            idB = 3;
        end
%*****
% Barra - 4
%*****
        if (Mer > Meg && Mer > Meb && ...
            Mek > Meg && Mek > Meb && ...
            drk < dP00 && dgb < dP00 && ...
            drb > dP25 && drb < dP35)
            idB = 4;
        end
%*****
% Barra - 5
%*****
        if (Mer > Meb && Mer > Meg && ...
            Mek > Meb && Mek > Meg && ...
            drg > drb && drb > drk && ...
            drk > dP05 && drk < dP10)
            idB = 5;
        end
%*****
% Barra - 6
%*****
        if (Mek > Mer && Mek > Meg && ...
            Mer > Meb && Meg > Meb && ...
            dbk > drk && dbk > dgk && ...
            drg < dP00 && dbk > dP40)
            idB = 6;
        end
%*****
% Barra - 7
%*****
        if (Mer > Meb && Mer > Mek && ...
            Meb > Meg && Mek > Meg && ...
            drg > drb && drg > drk && ...
            dbk < dP00 && drg > dP40)
            idB = 7;
        end
end

```



```

%*****
%Barra - 8
%*****
    if (Mek > Mer && Mek > Meb && ...
        Meg > Mer && Meg > Meb && ...
        dbk > drk && drk > dgk && ...
        dgk < dP10 && dgk > dP05)
        idB = 8;
    end
%*****
% Barra - 9
%*****
    if (Mer > Meb && Mer > Meg && ...
        Mek > Meg && Mek > Meb && ...
        drk < dP00 && dgb < dP00 && ...
        drb > dP20 && drb < dP25)
        idB = 9;
    end
%*****
% Barra - 10
%*****
    if (Mer > Mek && Mer > Meg && ...
        Meb > Mek && Meb > Meg && ...
        drg > drk && drg > drb && ...
        drb > dP05 && drb < dP10)
        idB = 10;
    end
%*****
% Barra - 11
%*****
    if (Meg > Mer && Meg > Meb && ...
        Mek > Mer && Mek > Meb && ...
        dgb > drg && drg > dgk && ...
        dgk > dP01 && dgk < dP03)
        idB = 11;
    end
%*****
% Barra - 12
%*****
    if (Mek > Mer && Mek > Meg && ...
        Mer > Meb && Meg > Meb && ...
        dbk > drk && dbk > dgk && ...
        drg < dP00 && dbk < dP30)
        idB = 12;
    end
%*****
% Barra - 13
%*****
    if (Mer > Meb && Mer > Mek && ...
        Meb > Meg && Mek > Meg && ...

```

```

        drg > drb && drg > drk && ...
        dbk < dP00 && drg < dP30)
        idB = 13;
    end
%*****
% Barra - 14
%*****
        if (Mer > Mek && Mer > Meg && ...
            Meb > Mek && Meb > Meg && ...
            drg > drk && drk > drb && ...
            drb > dP01 && drb < dP03)
            idB = 14;
        end
%*****
% Barra - 15
%*****
        if (Meg > Mer && Meg > Meb && ...
            Mek > Mer && Mek > Meb && ...
            dgk < dP00 && drb < dP00 && ...)
            drg > dP25 && drg < dP40)
            idB = 15;
        end
%*****
% Barra - 16
%*****
        if (Meg > Mer && Meg > Meb && ...
            Mek > Mer && Mek > Meb && ...
            dgk < dP00 && drb < dP00 && ...
            drg > dP20 && drg < dP25)
            idB = 16;
        end
%*****
% Barra - 17
%*****
        if (drg <= dP00 && ...
            drb <= dP00 && ...
            dbk <= dP00)
            idB = 17;
        end
%*****
% Barra - 18
%*****
        if (Mer > Meg && Mer > Mek && ...
            Meb > Meg && Meb > Mek && ...
            drb < dP00 && dgk < dP00 && ...
            drg > dP10 && drg < dP30)
            idB = 18;
        end

```

```

%*****
% Barra - 19
%*****
    if (Mer > Meg && Mer > Mek && ...
        Meb > Meg && Meb > Mek && ...
        drb < dP00 && dgk < dP00 && ... % Ver todos os iguais a este
        drg > dP25 && drg < dP40) % Ver todos os iguais a este
        idB = 19;
    end
%*****
% Barra - 20
%*****
    if (Meg > Meb && Meg > Mer && ...
        Mek > Meb && Mek > Mer && ...
        drg > dgb && dgb > dgk && ...
        dgk > dP01 && dgk < dP03 && ... % Ver todos os iguais a este
        drg > dP20 && drg < dP40) % Ver todos os iguais a este
        idB = 20;
    end
%*****
% Barra - 21
%*****
    if (Meg > Meb && Meg > Mek && ...
        Meb > Mer && Mek > Mer && ...
        drg > dgb && drg > dgk && ...
        dbk < dP00 && ... % Ver todos os iguais a este
        drg > dP20 && drg < dP30) % Ver todos os iguais a este
        idB = 21;
    end
%*****
% Barra - 22
%*****
    if (Meb > Mer && Meb > Meg && ...
        Mer > Mek && Meg > Mek && ...
        dbk > drb && dbk > dgb && ...
        drg < dP00 && ...
        dbk > dP20 && dbk < dP30)
        idB = 22;
    end
%*****
% Barra - 23
%*****
    if (Meb > Meg && Meb > Mek && ...
        Mer > Meg && Mer > Mek && ...
        dbk > dgb && dgb > drb && ...
        drb > dP01 && drb < dP03)
        idB = 23;
    end

```

```

%*****
% Barra - 24
%*****
    if (Meg > Meb && Meg > Mer && ...
        Mek > Meb && Mek > Mer && ...
        drg > dgb && dgb > dgk && ...
        dgk < dP10 && drg > dP40)
        idB = 24;
    end
%*****
% Barra - 25
%*****
    if (Meg > Mer && Meg > Mek && ...
        Meb > Mer && Meb > Mek && ...
        dgb < dP00 && drk < dP00 && ...
        drg > dP20 && drg < dP30)
        idB = 25;
    end
%*****
% Barra - 26
%*****
    if (Meb > Meg && Meb > Mek && ...
        Mer > Meg && Mer > Mek && ...
        dbk > dgb && dgb > drb && ...
        drb < dP20 && dbk > dP40)
        idB = 26;
    end
%*****
% Barra - 27
%*****
    if (Meg > Meb && Meg > Mek && ...
        Meb > Mer && Mek > Mer && ...
        drg > drb && drg > dgk && ...
        dbk < dP00 && drg > dP40)
        idB = 27;
    end
%*****
% Barra - 28
%*****
    if (Meb > Mer && Meb > Meg && ...
        Mer > Mek && Meg > Mek && ...
        dbk > drb && dbk > dgk && ...
        drg < dP00 && dbk > dP40)
        idB = 28;
    end
%*****
% Barra - 29
%*****
    if (Meg > Mek && Meg > Mer && ...
        Meb > Mek && Meb > Mer && ...

```

```

    drg > dgk && dgk > dgb && ...
    dbk > dP00 && ...
    dgb > dP05 && dgb < dP10)
    idB = 29;
end
%*****
% Barra - 30
%*****
    if (Meg > Mer && Meg > Mek && ...
        Meb > Mer && Meb > Mek && ...
        dgb < dP00 && drk < dP00 && ...
        drg > dP25 && drg < dP40)
        idB = 30;
    end
%*****
% Barra - 31
%*****
    if (Meb > Mer && Meb > Mek && ...
        Meg > Mer && Meg > Mek && ...
        dbk > drb && drb > dgb && ...
        drg > dP00 && ...
        dgb > dP05 && dgb < dP10)
        idB = 31;
    end
%*****
% Barra - 32
%*****
    if (Meg > Mek && Meg > Mer && ...
        Meb > Mek && Meb > Mer && ...
        drg > dgk && dgk > dgb && ...
        dgb > dP01 && dgb < dP03)
        idB = 32;
    end
%*****
% Barra - 33
%*****
    if (Meb > Mer && Meb > Mek && ...
        Meg > Mer && Meg > Mek && ...
        dbk > drb && drb > dgb && ...
        dgb > dP01 && dgb < dP03)
        idB = 33;
    end
end

```

ANEXOS 3

Neste Anexo é mostrado através da Figura A1 o comportamento dos detectores quando em um cenário de queda de barras de controle nos instantes de queima simulados.

Podemos observar que os valores das respostas dos detectores possuem uma variação muito sutil em um comportamento muito bem definido o que contribuiu para a funcionalidade do método. Ainda na Figura A1, observa-se também o comportamento similar das respostas dos detectores para as barras em que pertencem ao mesmo banco e se encontram em posições simétricas. Com exceção da barra 17 que se encontra na posição central no núcleo. Vale ressaltar que apenas o comportamento é similar, porém os valores das respostas são diferentes como podemos ver na Figura A1.

Na Tabela A1 é mostrado o agrupamento dos bancos e as barras correspondentes a este banco.

Tabela A1: Bancos de Barras de Controle

Bancos	Barras de Controle
A	1, 2, 11, 14, 20, 23, 32, 33
B	9, 16, 18, 25
C	6, 7, 17, 28, 27
D	4, 15, 19, 30
SA	3, 5, 8, 10, 24, 26, 29, 31
SB	12, 13, 21, 22

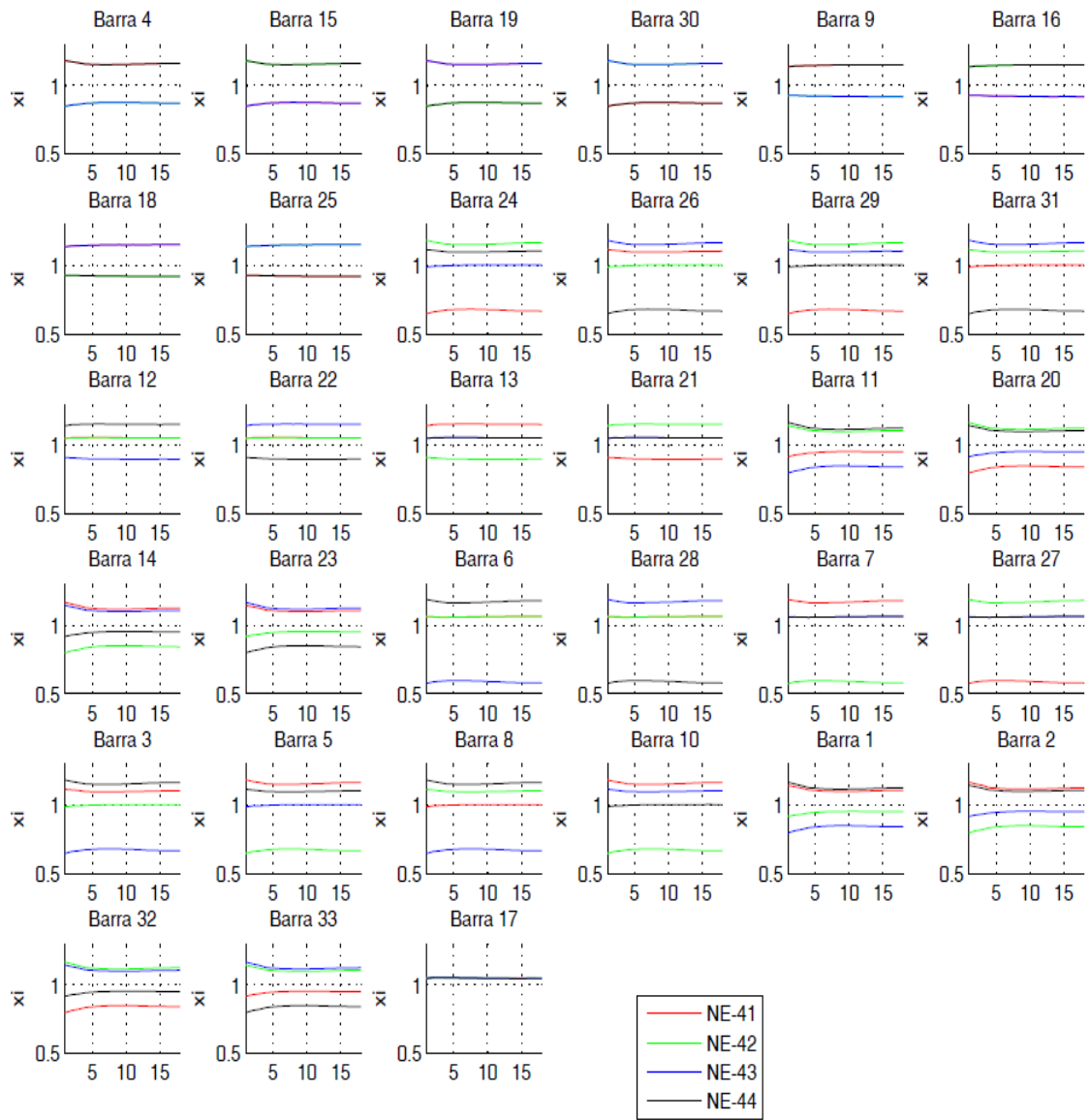


Figura A1: Resposta dos detectores em cenários de queda de barra de controle para os instantes de queima simulados