

CONTROLE PREDITIVO NEURAL APLICADO AO PROCESSO DE
CRITICALIDADE DA USINA NUCLEAR DE ANGRA II

Kleber Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Roberto Schirru, D.Sc.

Prof. José Antonio Carlos Canedo Medeiros, D.Sc.

Prof. Hermes Alves Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2008

GOMES, KLEBER

Controle Preditivo Neural Aplicado ao
Processo de Criticalidade da Usina Nuclear
de Angra II [Rio de Janeiro] 2008

XV, 193 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
M.Sc., Engenharia Nuclear, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, COPPE

1. Criticalização por Diluição
2. Controle Preditivo Neural
3. Redes Neurais Artificiais

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

A fé é o firme fundamento das coisas
que se esperam, e a prova das coisas que
não se vêem.
Hebreus 11:1

Dedicatória

A minha querida esposa Karina e ao meu filho Caio, meu melhor presente, pelo gesto de amizade e tolerância quanto a minha ausência.

Ao meu amigo Professor (Luiz Cid), in memoriam, que ajudou a construir o homem que hoje sou, com seu exemplo e dedicação. Ainda hoje me lembro dos seus ensinamentos.

Ao seu Jansen, me deste um livro e eu ainda era um garoto. Uma aquisição que não desfaço. “Que brilhe a tua luz em sabedoria e inteligência”.

A meus pais Hildeu e Luzia, que me deram uma referência, um lar - uma oportunidade. Tenham a certeza de que representam muito para mim e compartilhem comigo a alegria desta conquista.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por permanecer sempre ao meu lado, durante toda a minha caminhada.

Ao Professor Dr. Roberto Schirru, pela orientação, colaboração, paciência, estímulo mesmo nos momentos mais difíceis. Que Deus o ilumine e ti dê muita saúde. Espero que saibas que o tenho no mais elevado nível, um profissional de uma potencialidade criativa invejável, vide seus trabalhos pioneiros em Angra 1 e Angra2.

Ao Professor Dr. José Carlos Canedo, um trabalhador incansável, cuja generosidade lançou luz sobre este trabalho. O grau de envolvimento, a busca por soluções, a paciência em me ensinar. A sua doação é inesquecível. O nome do programa PREDCRIT é em sua homenagem.

Aos colegas Marcelo, Alan, Vinícius, Serginho pelo envolvimento e força. A troca de informações, sugestões e amizade construída durante o curso.

Ao colega Marcio Ayala uma agradecimento especial, algumas pessoas em pouco tempo faz muito. Agradeço a Deus por ter posto você no meu caminho.

A Simone pela paciência e receptividade com que sempre me atendeu.

Ao Marcos e Daniel funcionários sempre atenciosos.

À Eletrobrás Termonuclear S.A. - ELETRONUCLEAR, especialmente ao Eng^o. Décio Brandes Moura Ferreira Junior e Físico Amory Martins Dias, pelo suporte técnico.

Aos professores, alunos e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear, em especial à Jô e à Tânia, por toda a ajuda e companheirismo.

Aos amigos e colegas que de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

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

CONTROLE PREDITIVO NEURAL APLICADO AO PROCESSO DE
CRITICALIDADE DA USINA NUCLEAR DE ANGRA II

Kleber Gomes

Março/2008

Orientador: Roberto Schirru

Programa: Engenharia Nuclear

Neste trabalho é implementado um algoritmo de controle preditivo neural (*NGPC – Neural Generalized Predictive Control*) cujo propósito é servir de ferramenta para o cálculo e controle inteligente da reatividade necessária para levar o reator da Usina Nuclear de Angra II à criticalidade pelo processo de diluição do circuito primário. A dinâmica do processo de criticalidade é representada por um modelo que utiliza uma rede neural multicamada, com estrutura de tempo regressiva, cuja finalidade é prever explicitamente a saída do processo (taxa de variação de reatividade) através de horizontes de predição e de controle pré- definidos.

Os resultados mostram que o controlador preditivo neural, quando aplicado ao processo de criticalidade do reator da Usina Nuclear de Angra II dá ao operador uma maior flexibilidade e segurança, visto que este tem conhecimento prévio da taxa de variação relativa do fluxo neutrônico que é um fator limitante para execução desta tarefa. Adicionalmente, o uso do NGPC possibilitou a execução da criticalidade por diluição num tempo melhor quando comparado aqueles obtidos pelo uso dos procedimentos operacionais, administrativos e programa de computador utilizado para o cálculo estimado da reatividade necessária para levar o reator de Angra II à condição crítica.

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

NEURAL PREDICTIVE CONTROL
APPLIED TO THE CRITICALITY PROCESS OF ANGRA II NUCLEAR POWER
PLANT

Kleber Gomes

March/2008

Advisors: Roberto Schirru

Department: Nuclear Engineering

In the present work it is implemented a Neural Predictive Control algorithm (NGPC - Neural Generalized Predictive Control) whose purpose is to serve as a tool for calculation and intelligent control of the reactivity required to bring the Angra II Nuclear Power Plant reactor to the critical condition by using the dilution of the primary circuit method. The dynamics of criticalization process is represented by a model that uses a multilayer neural network with regressive time structure which explicitly predicts the output of the process (variation of reactivity) through pre-defined horizons of prediction and control.

The results show that, when applied to the criticalization process of the Angra II Nuclear Power Plant reactor, the Neural Predictive Control gives the operator greater flexibility and security, since he has prior knowledge of the relative variation rate on the neutron flow which is a limiting factor for carrying out this task. Additionally, the use of NGPC enabled the implementation of criticalization by the dilution of the primary circuit in a better time when compared to the one obtained by the use of operating and administrative procedures, as well as the computer program used to calculate the estimated reactivity needed to bring the Angra II reactor to critical condition.

3.4.3. Algoritmo de Minimização da Função de Custo.....	30
3.4.4. Modelagem da Planta	30
3.4.5. Predição Usando uma Rede Neural.....	33
Capítulo 4 – Implementação do Sistema de Controle Preditivo Neural.....	35
4.1. Introdução.....	35
4.2. Implementação	38
4.2.1 Código Computacional para Simulação do Processo de Criticalidade....	38
4.2.2 Modelagem do Código Computacional Reator PWR.....	39
4.3. Composição do Controle Preditivo Neural	44
4.3.1 Modelo Neural da Planta	44
4.3.2 Algoritmo de Controle.....	46
4.4 Implementação do Controle Preditivo Neural	47
Capítulo 5 – Estudo de Casos: Resultados e Discussões	49
5.1. Introdução.....	49
5.2. Primeiro Caso – Desarme da Usina em 19/12/2007	51
5.2.1. Controle Preditivo Neural.....	52
5.2.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 20 pcm	57
5.2.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 25 pcm	58
5.2.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 30 pcm	60
5.2.2. Comentário do Primeiro Caso	62
5.3. Segundo Caso – Desarme da Usina em 11/11/2007	64
5.3.1. Controle Preditivo Neural.....	65
5.3.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 9 pcm	68
5.3.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 10 pcm	69
5.3.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 11 pcm	71
5.3.2. Comentário do Segundo Caso	73
5.4. Terceiro Caso – Desarme da Usina em 11/05/2007	73
5.4.1. Controle Preditivo Neural.....	74
5.4.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 25 pcm	78
5.4.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 30 pcm	79
5.4.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 35 pcm	81
5.4.2. Comentário do Terceiro Caso.....	83

5.5. Quarto Caso – Desarme da Usina em 07/08/2006	83
5.5.1. Controle Preditivo Neural.....	85
5.5.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 25 pcm	87
5.5.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 30 pcm	89
5.5.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 35 pcm	90
5.5.2. Comentário do Quarto Caso	92
5.6. Comentários Adicionais sobre o PREDCRIT	94
Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações	96
Anexo.1 - Redes Neurais Artificiais	100
Anexo 2 - Métodos de Minimização	119
Anexo 3 - Tabelas do Reator PWR	123
Anexo 4 - Código Computacional do Reator PWR	145
Anexo 5 - Cálculo de Aproximação à Criticalidade do Reator de Angra II	177
Referências Bibliográficas	189

Índice de Figuras

Figura 2.1	Reação em cadeia	8
Figura 2.2	Variação do fluxo de nêutrons em função da variação dos bancos D e L (reatividade)	11
Figura 2.3	Formação do Xenônio	14
Figura 2.4	Valor integral da reatividade do xenônio versus tempo, após desligamento partindo de xenônio em equilíbrio para diversos níveis de potência	15
Figura 2.5	Formação do Samário	15
Figura 2.6	Valor integral da reatividade do samário partindo do samário em equilíbrio em função do tempo após redução de potência do reator de 100% de pn para vários níveis 1000 horas	16
Figura 2.7	Concentrações de boro para as condições de desligado quente e desligado frio (CH e CHK) em função da concentração crítica de referência (CR)	17
Figura 3.1	Diagrama em bloco de um Controlador Regulatório Clássico	24
Figura 3.2	Estrutura básica de um Controlador Preditivo Sujeito a Restrições.	25
Figura 3.3	Diagrama em bloco do Controle Preditivo Neural	26
Figura 3.4	Estratégia do Controlador Preditivo	27
Figura 3.5	Diagrama em bloco do treinamento da Rede Neural off-line	31
Figura 3.6	Rede Neural Feedforward com uma estrutura de tempo regressiva.	32
Figura 3.7	Predição da rede neural para $k = 2$	34
Figura 4.1	Arquitetura do controle de criticalidade do reator da Usina Nuclear de Angra II com controlador preditivo neural (PREDCRIT)	35
Figura 4.2	Identificação da planta (simplificação)	45
Figura 4.3	Configuração do Controlador	48
Figura 4.4	Identificação da planta para geração de dados para treinamento da do modelo neural da planta.	48

Figura 5.1	Esquema de utilização do PREDCRIT	50
Figura 5.2	Amostras de dados para treinamento da rede	52
Figura 5.3	Evolução de erros no processo de treinamento	55
Figura 5.4	Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural	55
Figura 5.5	Dados de validação para o Controlador preditivo neural	55
Figura 5.6	Dados de teste para o Controlador preditivo neural	56
Figura 5.7a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	57
Figura 5.7b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	58
Figura 5.7c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	58
Figura 5.8a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	59
Figura 5.8b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	59
Figura 5.8c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	60
Figura 5.9a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	60
Figura 5.9b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	61
Figura 5.9c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	61
Figura 5.10	Amostras de dados para treinamento da rede	65
Figura 5.11	Evolução de erros no processo de treinamento	66
Figura 5.12	Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural	66
Figura 5.13	Dados de validação para o Controlador preditivo neural	67
Figura 5.14	Dados de teste para o Controlador preditivo neural	67
Figura 5.15a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	68
Figura 5.15b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	68
Figura 5.15c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	69
Figura 5.16a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	69

Figura 5.16b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	70
Figura 5.16c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	70
Figura 5.17a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	71
Figura 5.17b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	71
Figura 5.17c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	72
Figura 5.18	Amostras de dados para treinamento da rede	75
Figura 5.19	Evolução de erros no processo de treinamento	75
Figura 5.20	Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural	76
Figura 5.21	Dados de validação para o Controlador preditivo neural	76
Figura 5.22	Dados de teste para o Controlador preditivo neural	77
Figura 5.23a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	78
Figura 5.23b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	78
Figura 5.23c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	79
Figura 5.24a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	79
Figura 5.24b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	80
Figura 5.24c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	80
Figura 5.25a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	81
Figura 5.25b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	81
Figura 5.25c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	82
Figura 5.26	Amostras de dados para treinamento da rede	85
Figura 5.27	Evolução de erros no processo de treinamento	86
Figura 5.28	Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural	86
Figura 5.29	Dados de validação para o Controlador preditivo neural	86

Figura 5.30	Dados de teste para o Controlador preditivo neural	87
Figura 5.31a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	87
Figura 5.31b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	88
Figura 5.31c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	88
Figura 5.32a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	89
Figura 5.32b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	89
Figura 5.32c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	90
Figura 5.33a	Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.	90
Figura 5.33b	Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.	91
Figura 5.33c	Variação da reatividade durante atuação do controle.	91
Figura 5.34	Tela para acompanhamento da criticalidade do reator de Angra II	95

Índice de Tabelas

Tabela 2.1	Modos Operacionais da Usina de Angra II	19
Tabela 2.2	Cálculo da Quantidade de Água Desmineralizada a ser Adicionada ao Primário para Criticalizar o reator após um desarme do reator.	21
Tabela 2.3	Cálculo da Margem de Desligamento do reator após um RESA.	22
Tabela 4.1	Condições da Usina no Desligamento – Teste do Reator PWR	43
Tabela 4.2	Condições da Usina na Criticalidade – Teste do Reator PWR	43
Tabela 5.1	Condições da Usina no Desligamento – Caso 1	51
Tabela 5.2	Condições da Usina na Criticalidade – Caso 1	51
Tabela 5.3	Parâmetros para gerar as amostras de treinamento.	52
Tabela 5.4	Arquitetura da Rede	53
Tabela 5.5	Parâmetros do Controlador	53
Tabela 5.6	Resultado do treinamento.	53
Tabela 5.7	Parâmetros do Controlador	56
Tabela 5.8	Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.	61
Tabela 5.9	Condições da Usina no Desligamento – Caso 2	64
Tabela 5.10	Condições da Usina na Criticalidade – Caso 2	64
Tabela 5.11	Resultado do treinamento.	65
Tabela 5.12	Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.	72
Tabela 5.13	Condições da Usina no Desligamento – Caso 3	74
Tabela 5.14	Condições da Usina na Criticalidade – Caso 3	74
Tabela 5.15	Resultado do treinamento.	75
Tabela 5.16	Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.	82
Tabela 5.17	Condições da Usina no Desligamento – Caso 4	84
Tabela 5.18	Condições da Usina na Criticalidade – Caso 4	84
Tabela 5.19	Resultado do treinamento	85
Tabela 5.20	Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.	92

Capítulo 1

– Introdução –

1.1. Considerações Iniciais

Para se avaliar e prever estados operacionais críticos e subcríticos, bem como prever evoluções nucleares em operação normal e acidentes. Em um reator nuclear faz-se freqüentemente necessária uma análise quantitativa de todos os parâmetros de reatividade envolvidos. Para a Usina Nuclear de Angra II (Angra II), os principais parâmetros que influenciam a reatividade do núcleo do reator, são:

- Posição dos bancos de controle e de desligamento (barras de controle),
- Pressão do sistema de refrigeração do reator (SRR), (CFOL I – JEC, 1998),
- Temperatura média do SRR,
- Decaimento de produtos oriundo da fissão (xenônio e samário),
- Potência do núcleo.
- Queima do combustível nuclear e
- Concentração de ácido bórico dissolvido no SRR.

Estes parâmetros vão definir o comportamento cinético do reator, isto é, como o fluxo de nêutrons no interior do núcleo se desenvolve ao longo do tempo.

O processo de criticalização de Angra II envolve o gerenciamento da reatividade necessária para seu retorno à condição operacional após um desarme do reator ou após uma parada para troca de combustível (recarregamento). Neste sentido, diversos procedimentos operacionais e administrativos devem ser utilizados pelos Operadores, com apoio do grupo de Física de Reatores, para avaliar o comportamento desses parâmetros nucleares com o objetivo de garantir que os limites de projetos não sejam violados durante execução desta tarefa.

Com objetivo de quantificar a reatividade positiva que deve ser inserida no núcleo para retornar de uma condição sub-crítica para crítica, a usina de Angra II dispõe atualmente de um programa de computador, REATIV A2 (BRANDES, 2005) que realiza cálculos de balanço de reatividade dos parâmetros que influenciam a

comportamento cinético do reator. A aplicação do balanço de reatividade nesta atividade através do programa REATIV A2 substitui com eficiência os cálculos manuais permitindo extrapolações que se fizerem necessárias para atender as condições do núcleo durante a evolução desse processo, evitando em muitos casos, fontes de erros devido a enorme quantidade de parâmetros envolvidos.

Em Angra II, o processo de criticalização do reator pode ser realizado de duas formas:

- Por barras de controle, através do cálculo da posição crítica estimada (PCE) – Não tratado neste trabalho,
- Por diluição do SRR, através do cálculo da concentração crítica estimada de boro (CCE), dividida em duas fases:
 - Retirada de Bancos que ocorre brevemente,
 - Diluição do SRR

Para a fase de diluição do SRR (CFOL I – JEC, 1998), é calculada pelo programa REATIV A2 a quantidade de água desmineralizada necessária para levar o reator a condição crítica. Nesta fase, o REATIV A2 sugere um fluxo constante de água de diluição a ser injetado no SRR a fim de cobrir a quantidade de água previamente estabelecida. Entretanto, existem restrições operacionais, limitativas e protetivas que estão associadas a taxa de variação relativa de fluxo neutrônico (%/s) que impossibilita que esse fluxo de diluição seja mantido. Decorre que o controle dessa taxa é primordial para que os limites impostos pelo projeto do núcleo não sejam violados. Assim sendo, a operação de criticalidade está sujeito a flutuações ou descontinuidades caso, por exemplo, em que a taxa de variação de fluxo neutrônico evolua rapidamente, o que necessita da tomada de ação por parte do operador do reator para barrar esta evolução. Caso não seja tomada nenhuma ação o reator poderá vir a desarmar novamente, o que enseja em perda de tempo e desgaste de elemento combustível.

Sob o ponto de vista operacional, o estabelecimento de um valor de referência da taxa de reatividade a cada minuto atende ao pré-requisito de manutenção da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico dentro dos limites operacionais. Desta forma, o desenvolvimento de um sistema capaz de servir como ferramenta para o cálculo e controle inteligente da reatividade necessária para levar o reator à criticalidade oferece uma perspectiva para solução do problema da criticalidade. A idéia é dotar a etapa de

diluição do primário, com vistas à criticalidade, com uma “válvula inteligente” que tenha a capacidade de manter a taxa de variação relativa de fluxo neutrônico constante durante este processo.

Para dar inteligência a esse sistema, optou-se pela utilização de um controlador preditivo que pertence a classe de controladores digitais (*MBPC – Model Based Predictive Control*). O controle preditivo é apontado na literatura moderna como uma ferramenta de grande potencial para aplicações em processos não lineares e que são submetidos a grandes variações durante a sua operação. Esta técnica utiliza um modelo interno, o qual irá estimar os estados futuros do processo num intervalo (horizonte de predição) pré-definido. Estas estimativas serão utilizadas para o cálculo das ações de controle.

Adicionalmente, houve a necessidade de criação de um código computacional que simulasse o reator no senso da criticalidade, dinamicamente no tempo, visto que o programa de computador existente limita-se a execução de cálculos de balanço de reatividade entre as condições imediatamente antes do desligamento do reator e no momento que é estimada a ocorrência da criticalidade.

O modelo interno usa as redes neurais artificiais para descrever o comportamento do reator no senso da criticalidade. A estrutura da rede empregada é a feedforward, com o algoritmo de treinamento backpropagation.

O controlador proposto neste trabalho baseia-se na minimização de um critério de desempenho quadrático, onde é levada em consideração tanto a diferença entre a trajetória proposta para a variação da reatividade do reator e o valor predito pelo modelo neural, quanto um fator de penalização para oscilações na variável manipulada, que é a vazão de água. A rede neural utilizada tem uma estrutura recorrente, de forma a melhorar o desempenho da mesma na predição do comportamento dinâmico do sistema. Esta estrutura foi utilizada desde o treinamento da rede, onde o horizonte de predição define o número de pontos futuros que a rede tinha que prever, sendo estes valores confrontados com o padrão de treinamento. Foram realizados testes com os dados obtidos de quatro casos reais de desarme do reator de Angra II ocorridos no passado. Os resultados desses testes foram confrontados com aqueles obtidos na usina pela utilização dos recursos existentes (procedimentos e programa de computador).

Esta pesquisa pretende demonstrar que o procedimento de criticalização proposto pode trazer benefícios para a realização desta tarefa. Consistindo na implementação de um sistema de fácil manipulação; onde a aquisição dos dados para

controle é relativamente rápida, bastando digitar poucas variáveis. Estabelecendo a possibilidade de extrair estas variáveis diretamente do Sistema Integrado de Computador de Processo de Angra II (SICA A2).

1.2. Objetivo

O principal objetivo desta pesquisa é o desenvolvimento de um sistema capaz de servir como ferramenta para o cálculo e controle inteligente da reatividade necessária para levar o reator de Angra II à condição de criticalidade durante o processo de diluição do SRR. Com isto é esperado que a variação de reatividade ($\Delta\rho$) inserida no núcleo do reator se mantenha constante, o que teoricamente é indicativo que a taxa de variação relativa de fluxo neutrônico se manterá a mesma ao longo do processo. Adicionalmente fornece informações sobre o comportamento dos parâmetros que influenciam o balanço de reatividade do núcleo do reator.

A introdução de um controlador preditivo como ferramenta capaz de definir a melhor trajetória de diluição do SRR durante o processo de criticalidade do reator de Angra II é estudada neste trabalho. É estipulado um valor de referência de reatividade a cada minuto, o que representa a taxa de variação relativa de fluxo neutrônico no núcleo do reator, e com isto é previsto a variação do fluxo de diluição do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR). É esperado que se percorrendo a trajetória traçada pelo controlador, o Operador do Reator e grupo de Física de Reatores envolvidos, obtenha um desempenho otimizado do processo.

Uma evolução consciente deste processo, proporcionada por esta categoria de controladores digitais pode ir além do aspecto da criticalidade, pode servir também como ferramenta de monitoramento “on line” das condições do núcleo do reator para qualquer condição operacional subcrítica e crítica.

1.3. Motivação

As técnicas de controle clássico são baseadas em modelos linearizados dos sistemas físicos, o que representa perda de informações, que muitas vezes são importantes para o funcionamento da planta com altos níveis de exigência. Atualmente, a utilização de diferentes técnicas de controle inteligente tem aberto uma nova perspectiva no tratamento de sistemas não-lineares e no projeto de seus controladores. A

possibilidade de contemplar os acoplamentos existentes entre os diversos parâmetros (variáveis) que são manipuladas e as diversas variáveis controladas aumentam o desempenho do sistema de controle e com isto promovem uma produção mais otimizada.

Neste sentido, a utilização de redes neurais artificiais para identificação e para aplicação em controles inteligentes demonstra ter a capacidade de melhor capturar a dinâmica do processo físico quando este é não linear. Este fato decorre das potencialidades de aproximação universal das redes neurais, o que fazem delas uma escolha popular para modelar sistemas não-lineares e para programar controladores não-lineares de propósito geral.

1.4. Estrutura da Dissertação

O capítulo 2, apresenta brevemente a filosofia do Balanço de Reatividade do Reator de Angra II, parâmetros, princípios e características que norteiam o processo de criticalidade.

O capítulo 3 faz uma abordagem sobre a filosofia e funcionamento do Controle Preditivo Neural (*NGPC – Neural Generalized Predictive Control*), com o objetivo principal de facilitar o entendimento do funcionamento desse controlador que será implementado para controle do processo de criticalidade de Angra II por diluição do Sistema de Refrigeração do Reator.

O capítulo 4 apresenta o processo de desenvolvimento e implementação do Sistema PREDCRIT (Sistema de Predição da Criticalidade do Reator de Angra II), que é baseado nos conceitos do controlador preditivo neural expostos no capítulo 3. Adicionalmente, apresenta o processo de construção do código computacional que simula o reator de Angra II (Reator PWR) no senso da criticalidade para o cálculo temporal do balanço de reatividade que será usado para aplicação deste controlador.

O capítulo 5 apresenta a aplicação do controlador desenvolvido em casos reais de desarme de Angra II e seu posterior retorno à potência. São feitos comentários sobre os resultados encontrados pelo uso do controlador. A comparação com os resultados obtidos pelos recursos existentes na usina se dá apenas para o tempo de duração da criticalidade e a concentração de boro alcançada.

O capítulo 6 a partir da análise dos resultados obtidos, apresenta as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros.

O anexo 1 apresenta tópicos básicos sobre Redes Neurais Artificiais, seus princípios e aplicações.

O anexo 2 apresenta as tabelas de reatividade usadas para desenvolvimento do código computacional que simula a criticalidade do Reator PWR

O anexo 3 apresenta os métodos de minimização (algoritmos) Levenberg-Marquardt e Backpropagation resiliente usados neste trabalho para treinamento da rede neural.

O anexo 4 apresenta o código computacional que simula o reator de ANGRA II no senso da criticalidade (Reator PWR).

O anexo 5 apresenta as planilhas dos cálculos de aproximação à criticalidade nos casos de desarme estudados neste trabalho.

Capítulo 2

– Conceitos Básicos sobre Balanço de Reatividade –

2.1. Introdução

O retorno da Usina Nuclear de Angra II a condição operacional, após um desarme do reator (RESA), é precedido de algumas condições que precisam ser atendidas de acordo com o manual de operações e também das especificações técnicas. Estas condições podem ser observadas no *Final Safety Análise Report* (FSAR, 2007). No FSAR estão contidas todas as bases de projeto, discussões e análise de segurança que norteiam a operação segura e eficiente da Usina.

O Manual de Operações é um conjunto de procedimentos administrativos, de manutenção, de operação e de testes, cujo objetivo é definir a estratégia a ser seguida nos casos de operação normais, anormais e de acidente. Logo, as premissas básicas para que o processo de criticalização do reator tenha seu início são atendidas pela observação destes procedimentos.

Para o processo de criticalização da Usina Nuclear de Angra II existem duas estratégias básicas:

- Por barras de controle, através do cálculo da posição crítica estimada (PCE) – Não tratado neste trabalho,
- Por diluição do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR), (CFOL I – JEC, 1998), através do cálculo da concentração crítica estimada de boro (CCE), dividida em duas fases:
 - Retirada de Bancos que ocorre brevemente,
 - Diluição do SRR propriamente dita.

Evidentemente que diversas condições iniciais precisam estar satisfeitas para que este processo se desenvolva de forma segura e eficiente. Essas condições são estabelecidas no Relatório do Projeto Nuclear e Termo-hidráulico do reator – (RPNT). Qualquer condição que venha desafiar as condições previstas nas bases de projeto do núcleo, ou ainda os parâmetros operacionais terão como resposta uma interrupção no

processo garantindo a todo tempo a segurança do núcleo do reator da Usina Nuclear de Angra II.

2.2. Reatividade

Na figura 2.1, observamos como se realiza o processo de produção de nêutrons num reator.

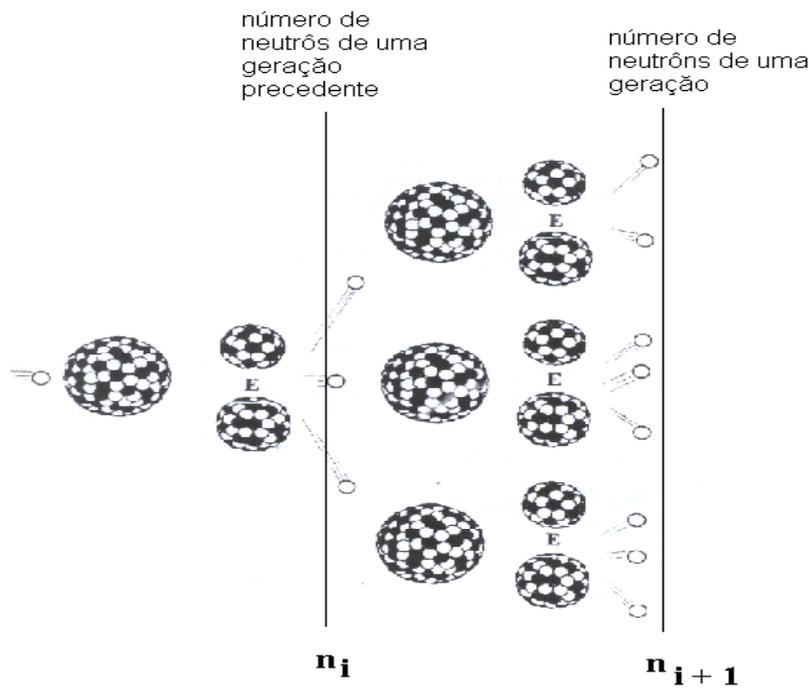


Figura 2.1 Reação em cadeia

Existem três estados operacionais para o núcleo de um reator de potência tendo em vista o comportamento cinético do fluxo de nêutrons em seu interior. Estes estados operacionais são descritos por uma grandeza chamada reatividade (ρ), medida, para efeito deste trabalho, em pcm (por cem mil) ou ainda em % ($\Delta k/k$). Assim, um reator estará no estado:

- Subcrítico quando o teor de reatividade presente no núcleo do reator for menor que ZERO ($\rho < 0$). Significa dizer que a relação existente entre a população de nêutrons ($n(i+1) / n_i$) de duas gerações consecutivas é sempre menor que a unidade.

- Crítico quando o teor de reatividade presente no núcleo do reator for igual a ZERO ($\rho = 0$). Significa dizer que a relação existente entre a população de nêutrons ($n(i+1) / n_i$) de duas gerações consecutivas é sempre igual a unidade.
- Supercrítico quando o teor de reatividade presente no núcleo do reator for maior que ZERO ($\rho > 0$). Significa dizer que a relação existente entre a população de nêutrons ($n(i+1) / n_i$) de duas gerações consecutivas é sempre maior que a unidade.

A relação $n(i+1) / n(i)$ define o fator de multiplicação efetivo (k_{eff}), equação 2.1.

$$k_{eff} = n_{(i+1)} / n_{(i)} \quad (2.1)$$

Onde:

- $n(i + 1)$ – define a população de nêutrons de uma geração.
- $n(i)$ – define a população de nêutrons da geração precedente.

Pode-se relacionar a reatividade (ρ) ao fator de multiplicação (k_{eff}) pela equação do “In-Hour”, na forma:

$$\rho = (n(i+1) - n_i) / n(i+1) = (k_{eff} - 1) / k_{eff} \quad (2.2)$$

Assim, os estados operacionais de subcrítico, crítico e supercrítico podem ser definidos em função do k_{eff} , como seguem abaixo:

- $k_{eff} = 1$ (Crítico),
- $k_{eff} < 1$ (Subcrítico),
- $k_{eff} > 1$ (Supercrítico).

Na Usina Nuclear de Angra II diversos são os parâmetros que influenciam a reatividade do núcleo. Entre eles, destacamos aqueles de maior importância:

- Temperatura Média do Moderador,
- Temperatura do Combustível (Proporcional a Potência do Reator),
- Concentração de Ácido Bórico (Cb),

- Posição do Banco de Desligamento L,
- Posição do Banco de Controle D,
- Concentração de Venenos de Fissão (Xenônio e Samário).

2.3. Coeficientes de Reatividade

Os Coeficientes de Reatividade descrevem a dependência da reatividade, ρ , em relação às variações dos parâmetros que influenciam o balanço de nêutrons durante a operação do reator.

$$\Gamma_x = d(\rho_x) / dx \quad (2.3)$$

Onde:

- Γ_x - Representa o coeficiente de reatividade do parâmetro considerado (x);
- ρ_x - Reatividade devida ao parâmetro considerado (x),
- x - Parâmetro considerado

Os principais coeficientes de Reatividade de Angra II são:

- Γ_k - Coeficiente de Reatividade de Temperatura do Moderador (pcm/ $^{\circ}$ C)
- Γ_{Pot} - Coeficiente de Reatividade da Potência do Reator (Proporcional a Temperatura do Combustível) (pcm/%/POT). É também chamado de defeito de potência.
- Γ_{Boro} - Coeficiente da Reatividade do Boro (pcm/ppm)

2.4. Balanço de Reatividade

Representa a diferença de reatividade entre duas condições (estado) do reator. Ela é representada pela variação individual da reatividade de seus parâmetros operacionais como indicado abaixo:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \sum(\Delta\rho)_x \quad (2.4)$$

Onde:

- ρ_1 - É a reatividade total devido aos parâmetros \underline{x} no estado ou condição 1,
- ρ_2 - É a reatividade total devido aos parâmetros \underline{x} no estado ou condição 2,
- $(\Delta\rho)_{\rho x}$ - É a reatividade devida a variação de cada parâmetro \underline{x} considerado do estado 1 para o estado 2.

Havendo um desligamento do reator de Angra II, uma grande quantidade negativa de reatividade é introduzida pelos *bancos de controle (D-Bank)* e pelos *bancos de desligamento (L-Bank)*, fazendo com que o k_{ef} da reação em cadeia fique menor que 1 e o reator vai para condição subcrítica. A figura 2.2 procura exemplificar como um destes parâmetros influencia cinética neutrônica; ele mostra o tempo de dobramento e redução do fluxo neutrônico.

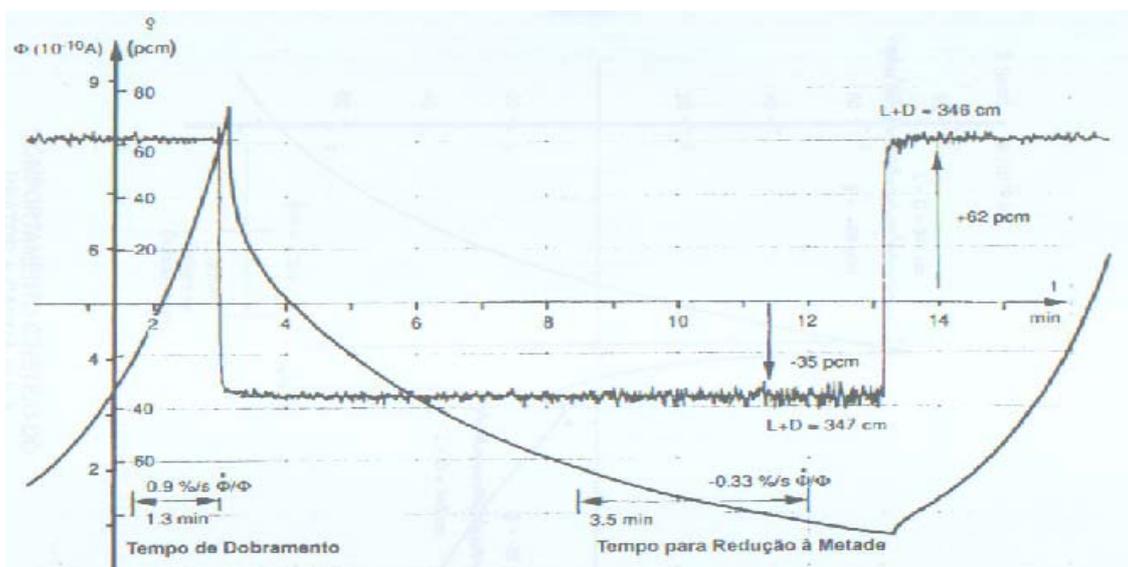


Figura 2.2. Variação do fluxo de nêutrons em função da variação dos bancos D e L (reatividade).

Para garantir que o reator permaneça no estado subcrítico ou para levar novamente o reator ao estado crítico é necessário fazer uma comparação entre os valores das reatividades dos fatores que influenciavam a reatividade total do reator para as condições anteriores ao desligamento com os valores das reatividades dos fatores que influenciam a reatividade total do reator para a nova condição em que se quer levar o reator, seja para estado subcrítico ou crítico.

2.4.1. Condição da Reatividade Total Anterior ao Desligamento

Na condição de reatividade anterior ao desligamento, representada pelo sobrescrito (1) – equação 2.5, os valores dos dados de referência, tais como: concentração de boro, posição dos bancos de controle, potência nuclear, temperatura média do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR) devem ser aqueles tidos como mais estáveis possíveis.

$$\rho_{\text{total anterior ao desligamento}} = (\rho^{(1)}_{\text{Ac. Bórico}} + \rho^{(1)}_{\text{B. Desligamento}} + \rho^{(1)}_{\text{B. Controle}} + \rho^{(1)}_{\text{potência}} + \rho^{(1)}_{\text{Temperatura SRR}} + \rho^{(1)}_{\text{Xenônio}} + \rho^{(1)}_{\text{Samário}}) \quad (2.5)$$

Onde:

- $\rho^{(1)}_{\text{Ac. Bórico}}$ – Reatividade devido a concentração de boro em pcm,
- $\rho^{(1)}_{\text{B. Desligamento}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos L (L+D) em pcm,
- $\rho^{(1)}_{\text{B. Controle}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos D em pcm
- $\rho^{(1)}_{\text{Potência}}$ – Reatividade devido a potência do reator em pcm
- $\rho^{(1)}_{\text{Temperatura SRR}}$ – Reatividade devido a temperatura média do moderador no SRR em pcm
- $\rho^{(1)}_{\text{Xenônio}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do xenônio no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do I - 135) em pcm,
- $\rho^{(1)}_{\text{Samário}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do samário no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do Pm - 149) em pcm.

2.4.2. Condição da Reatividade Total no Desligamento

A condição de reatividade no desligamento, representada pelo sobrescrito (2) – equação 2.6, os valores dos dados de referência, tais como: concentração de boro, posição dos bancos de controle, potência nuclear, temperatura média do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR) devem ser aqueles tidos posterior ao desligamento. A variação destes valores no tempo revela o grau de subcriticalidade presente no núcleo do reator.

$$\rho_{\text{total no desligamento}} = (\rho^{(2)}_{\text{Ac. Bórico}} + \rho^{(2)}_{\text{B. Desligamento}} + \rho^{(2)}_{\text{B. Controle}} + \rho^{(2)}_{\text{potência}} + \rho^{(2)}_{\text{Temperatura SRR}} + \rho^{(2)}_{\text{Xenônio}} + \rho^{(2)}_{\text{Samário}}) \quad (2.6)$$

Onde:

- $\rho^{(2)}_{\text{Ac. Bórico}}$ – Reatividade devido a concentração de boro em pcm,
- $\rho^{(2)}_{\text{B. Desligamento}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos L (L+D) em pcm,
- $\rho^{(2)}_{\text{B. Controle}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos D em pcm
- $\rho^{(2)}_{\text{Potência}}$ – Reatividade devido a potência do reator em pcm
- $\rho^{(2)}_{\text{Temperatura SRR}}$ – Reatividade devido a temperatura média do moderador no SRR em pcm
- $\rho^{(2)}_{\text{Xenônio}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do xenônio no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do I - 135) em pcm,
- $\rho^{(2)}_{\text{Samário}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do samário no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do Pm - 149) em pcm.

2.4.3. Condição na Criticalidade

Para esta condição, representada pelo sobrescrito (3), são tomados o período de tempo em que o reator esteve subcrítico, bem como os valores atuais da concentração de boro, da posição dos bancos de controle, da potência nuclear, da temperatura média do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR) devem ser registrados como referência, bem como os valores de suas respectivas reatividades introduzidas mais os valores das reatividades do Xenônio e do Samário determinados através do histórico de potência.

$$\rho_{\text{total nova criticalização}} = (\rho^{(3)}_{\text{Ac. Bórico}} + \rho^{(3)}_{\text{B. Desligamento}} + \rho^{(3)}_{\text{B. Controle}} + \rho^{(3)}_{\text{Temperatura SRR}} + \rho^{(3)}_{\text{Xenônio}} + \rho^{(3)}_{\text{Samário}}) \quad (2.7)$$

Onde:

- $\rho^{(3)}_{\text{Ac. Bórico}}$ – Reatividade devido a concentração de boro em pcm,
- $\rho^{(3)}_{\text{B. Desligamento}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos L (L+D) em pcm,
- $\rho^{(3)}_{\text{B. Controle}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos D em pcm

- $\rho^{(3)}_{\text{Potência}}$ – Reatividade devido a potência do reator em pcm
- $\rho^{(3)}_{\text{Temperatura SRR}}$ – Reatividade devido a temperatura média do moderador no SRR em pcm
- $\rho^{(3)}_{\text{Xenônio}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do xenônio no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do I - 135) em pcm,
- $\rho^{(3)}_{\text{Samário}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do samário no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do Pm - 149) em pcm.

2.4.4. Comportamento da Reatividade no Desligamento

Em caso de desligamento ocorre uma grande inserção de reatividade negativa, o que faz com o fluxo neutrônico decresça violentamente. Vamos resumidamente indicar como se dá esse processo.

A formação do Xenônio direto das fissões e seu desaparecimento através da queima é paralisada. Nota-se que o Xenônio é um veneno em relação a manutenção da potência no núcleo do reator, isto é seu crescimento insere reatividade negativa pois absorve nêutrons térmicos. No caso de desarme do reator, o seu aumento está associado apenas ao decaimento do Iodo e desaparece com seu decaimento para Césio, figura 2.3.

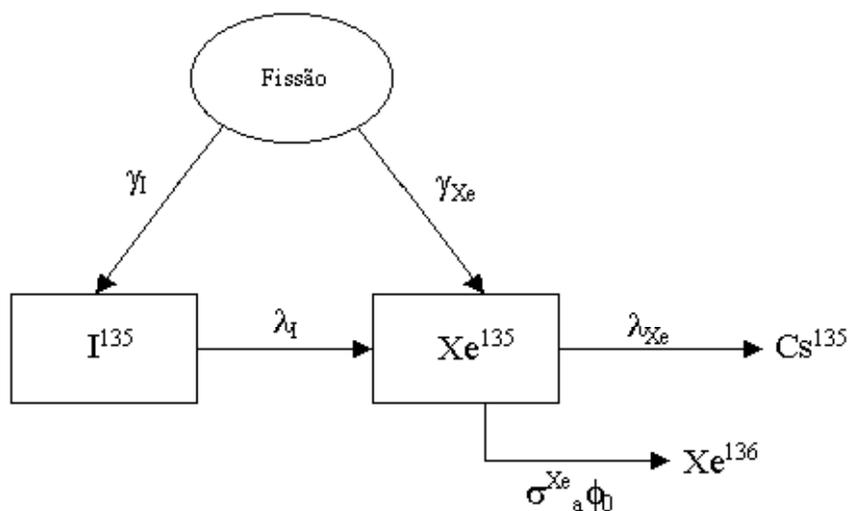


Figura 2.3. Formação do Xenônio.

Como a meia vida de decaimento do Iodo é menor que a do Xenônio logo após um desligamento a concentração inicial Iodo permanece inalterada, ocorre então um aumento na concentração do Xenônio devido a sua formação do decaimento radioativo

do Iodo. Disto resulta um crescimento temporário do envenenamento pelo Xenônio até um valor máximo, *Pico de Xenônio*, que em Angra II ocorre à aproximadamente 8 hora após o desligamento, já que o decaimento radioativo do Xenônio ocorre mais lentamente.

A partir do *Pico de Xenônio*, a concentração de Xenônio começa a diminuir devido ao seu decaimento para o Césio. Aproximadamente 24 horas após o desligamento, a variação de reatividade Xenônio passa a ser positiva. A reatividade devida ao Xenônio atinge um valor próximo de zero em torno de 100 horas após desligamento, reator *livre de Xenônio*, figura 2.4.

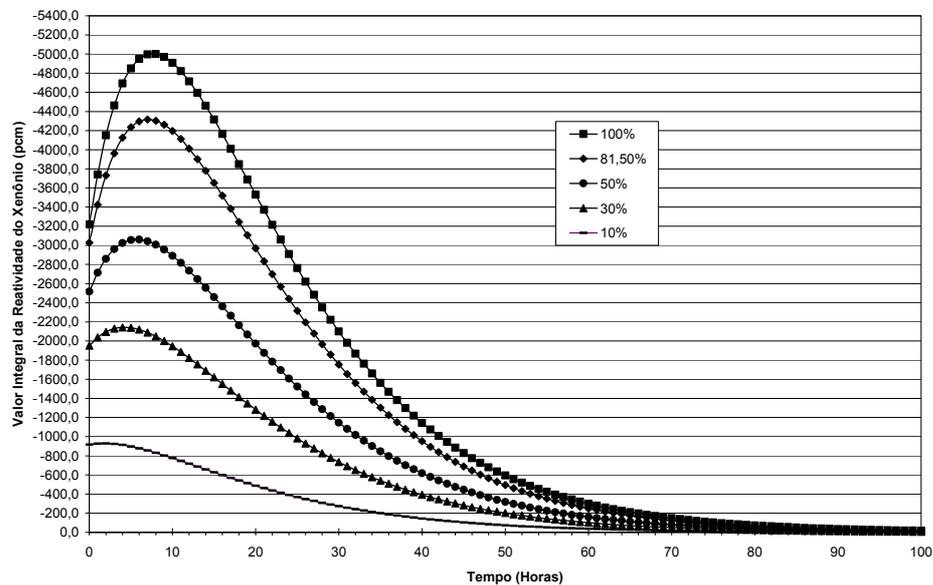


Figura 2.4 Valor integral da reatividade do xenônio versus tempo, após desligamento partindo de xenônio em equilíbrio para diversos níveis de potência

Como não há processo de decaimento radioativo do Samário então, após um desligamento, a concentração do Samário aumenta até atingir um equilíbrio, introduzindo sempre reatividade negativa, figuras 2.5 e 2.6.

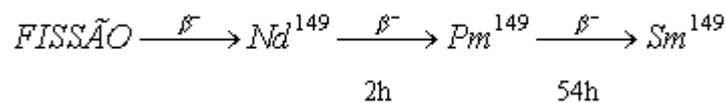


Figura 2.5 Formação do Samário

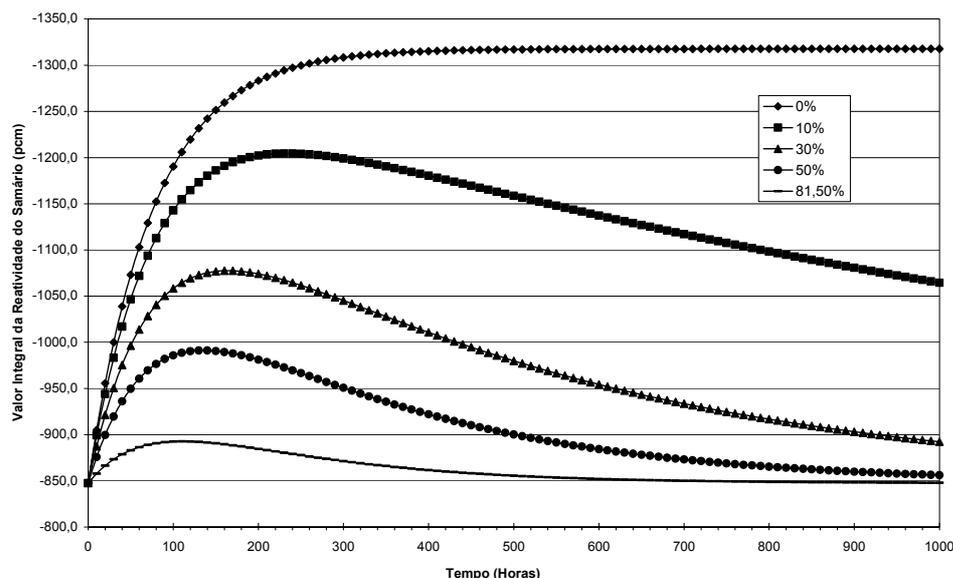


Figura 2.6. Valor integral da reatividade do samário partindo do samário em equilíbrio em função do tempo após redução de potência do reator de 100% de Pot. Nominal para vários níveis 1000 horas

Quando o reator estiver em um patamar de potência e ocorrer um desligamento, pelo coeficiente de reatividade de potência negativo é introduzido uma quantidade positiva de reatividade no reator (*defeito de potência*).

Quando o reator está na condição *desligado quente* (DQ) ou em *quente potência zero* (QPZ) a temperatura média do moderador deve ser igual a 295,1 °C, neste caso o *defeito isotérmico de temperatura* introduz reatividade nula. Se a temperatura do moderador for maior que 295,1 °C, a reatividade introduzida será negativa, caso contrário positiva.

Um outro dado importante de avaliar é a Margem de Desligamento, que é a quantidade de reatividade necessária para garantir a subcriticalidade do reator, requerido pelas especificações técnicas. Em Angra II, este valor que é de 1000 pcm, está também associado ao tempo após o desarme, à temperatura média do refrigerante, bem como à concentração de boro. Assim, vale o que segue.

Para Temperatura Média ≥ 260 °C:

- Em até 12 horas após o desarme (*trip*) do reator pode-se manter o reator com a concentração de boro de referência (CR), a que o reator estava quando em operação.
- A concentração de boro deve ser levada para a concentração de desligado quente

(CH) em até 24 horas do desligamento.

Para Temperatura Média < 260 °C:

- A concentração de boro deve estar na concentração de boro para a situação de desligado frio (CHK).

Essas premissas garantem que o reator não sofrerá uma criticalização inesperada.

A figura 2.7 demonstra o exposto.

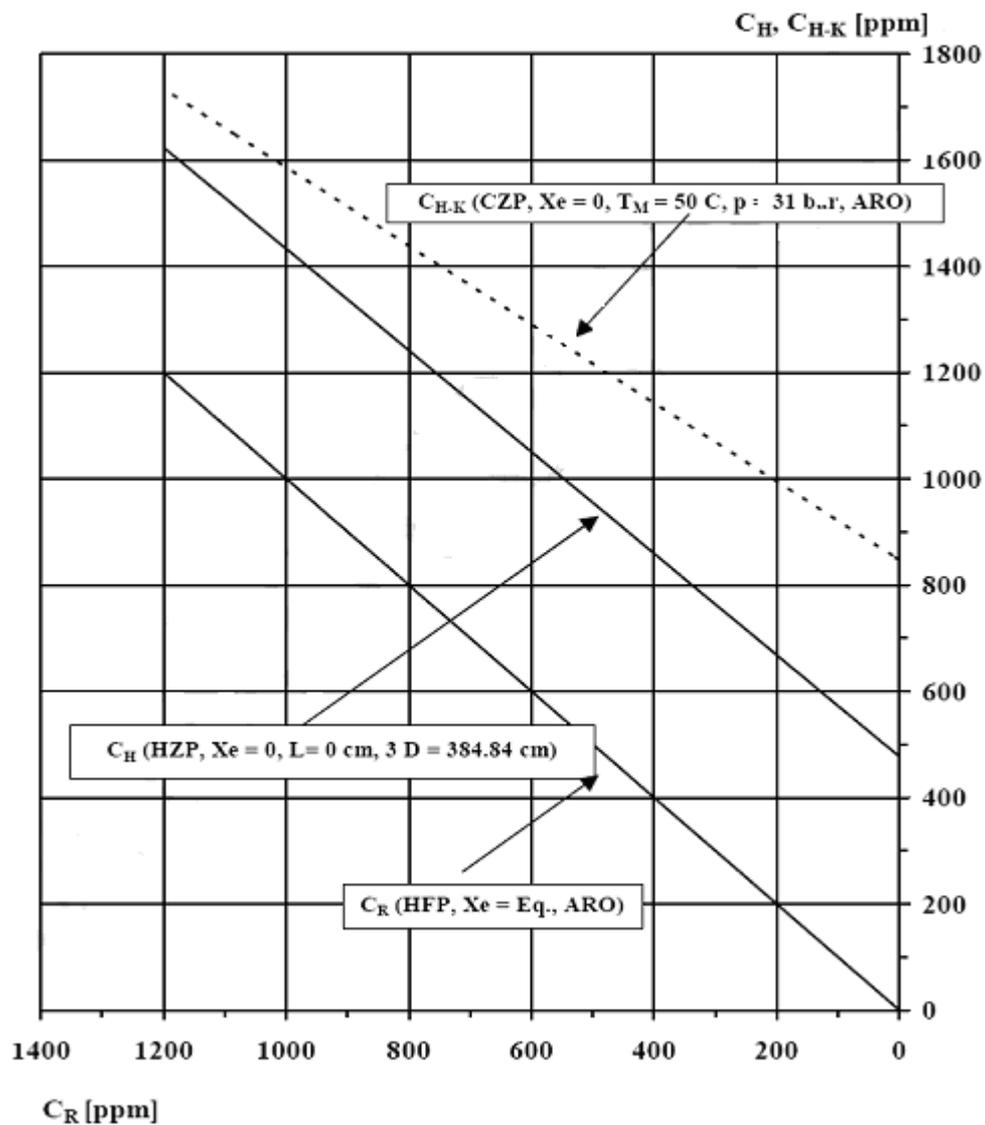


Figura 2.7 Concentrações de boro para as condições de desligado quente e desligado frio (CH e CHK) em função da concentração crítica de referência (CR)

Através dos balanços de reatividade é possível determinar se a margem de desligamento está dentro do requerido pelas especificações técnicas. Se a margem de desligamento não estiver sendo atendida deve-se calcular a quantidade de boro a ser adicionada ao circuito primário para garantir a margem de desligamento. Esta é a base do procedimento 2PPR03 – Cálculo da Margem de Desligamento.

$$\rho_{\text{total anterior ao desligamento}} - \rho_{\text{total no desligamento}} = \text{Margem de Desligamento} \quad (2.8)$$

Para levar novamente o reator ao estado crítico após um desligamento a posição dos bancos de controle ou a concentração de boro no circuito primário, fatores que afetam diretamente a reatividade do reator, devem ser acionados separadamente de modo que a condição da equação 2.9 seja satisfeita. Os acionamentos destes controles devem compensar efeitos $\rho_{\text{Xenônio}}$, $\rho_{\text{Samário}}$, $\rho_{\text{potência}}$ e $\rho_{\text{isotérmico de temperatura}}$ que sofrem variação enquanto o reator esteve na condição de desligado:

$$\rho_{\text{total anterior ao desligamento}} - \rho_{\text{total nova criticalização}} = 0 \quad (2.9)$$

No próximo item é apresentado um cálculo real do balanço de reatividade para a Margem de desligamento e Aproximação da Criticalidade.

2.5. Criticalidade

A seguir será apresentado um cálculo real do balanço de reatividade para a Margem de Desligamento e Aproximação da Criticalidade usando os procedimentos de Cálculo da Margem de Desligamento (2PPR03) e determinação da Posição de Barras de Controle e Concentração de Boro para Criticalidade (2PPR04), respectivamente.

O processo de criticalidade é executado pelo pessoal de operação, sob a supervisão do pessoal de Física de Reatores. Para os cálculos da CCE (objetivo deste trabalho) devem ser fornecidos os valores da Potência do Reator, Temperatura Média do SRR, Seqüência de Movimentação dos bancos D, estratégia de movimentação que define a quantidade de Banco D inseridos no núcleo do Reator, posição dos bancos de controle (D) e posição dos bancos de controle (L). A Posição Crítica Estimada de Banco (PCE) não será tratada neste trabalho.

2.5.1. Desenvolvimento da Etapa de Criticalidade

Na tabela 2.1 são indicados os modos operacionais da Usina Nuclear de Angra II definidos nas Especificações Técnicas (FSAR, 2007).

Tabela 2.1. Modos Operacionais da Usina de Angra II

Modo de Operação	Título	Condição de Reatividade (Keff)	Variação da Potência (%)	Temperatura de Entrada do SRR (°C)	Remoção de Calor por
1	Partida e Operação a Potência	$\geq 0,99$	0 - 100	$295 \geq T_{in} \geq 260$ a)	GV
2	Prontidão a Quente	$< 0,99$	NA	$295 \geq T_{in} < 120$	GV
3	Desligado Quente	$< 0,99$	NA	$120 \geq T_{in} \geq 100$	GV b)
4	Desligado Frio	$< 0,99$	NA	$100 > T_{in} < 50$	JN
5	Desligado Frio e Despressurizado (c)	$< 0,99$	NA	50	JN
6	Desligado Frio e Despressurizado para Recarregamento (d)	NA	NA	< 50	JN

a) 250 °C em operação de prolongamento do ciclo (Stretchout)

b) A remoção de calor pode ser executada em paralelo com o Sistema de Remoção de Calor Residual do Núcleo.

c) Pressão do SRR ≤ 5 bar

d) Combustível no Núcleo do Reator e pelo menos um parafuso da Tampa do Vaso de Pressão do Reator distensionado.

Operacionalmente a criticalidade só é permitida em Modo 1. As ações tomadas nesta fase são como descrito abaixo:

- A priori é feito pelo pessoal da física um balanço de reatividade, que engloba a margem de desligamento e o cálculo da concentração de boro crítica estimada (CCE) pelos procedimentos 2PPR03 e 2PPR04.

- É feito um teste dos detectores de nêutrons da faixa da fonte (relação sinal/ruído) garante o monitoramento da partida a todo o momento.
- É feito um teste de efetividade do sinal de Trip do Reator manualmente. Verifica-se o desarme do Reator (RESA) é eficaz, garantia da subcriticalidade.
- Traçado da Curva 1/M (multiplicação subcrítica) com esta curva há uma estimativa do momento da criticalidade, equação 2.10.

$$1/M = Z_0 / Z \quad (2.10)$$

Onde:

- Z_0 é contagem inicial de nêutrons na faixa da fonte (CFOL II - FRPO, 1998), medida em contagem por segundos; e continua com a passagem para faixa intermediária (detectores que monitoram o fluxo de neutrôns).
- Z é a contagem de nêutrons à partir do início do processo de criticalidade (CFOL II - FRPO, 1998). Em geral esta contagem é tomada de 5 em 5 minutos.

É iniciada a diluição do SRR, cuja vazão a todo o momento é avaliada de acordo com a modificação da cinética neutrônica durante este processo obedecendo aos limites impostos pelas especificações técnicas para fatores de canal quente, taxa de variação relativa de fluxo neutrônico, DNB, entre outros parâmetros.

A todo o momento avalia-se a taxa de variação de fluxo neutrônico (%/s), isto é, como a evolução do fluxo está ocorrendo. Caso haja algum imprevisto essa ação de criticalização é paralisada e só retornada quando as condições para tarefa estiverem novamente satisfeitas.

O processo é continuado até que o operador verifique uma não variação entre gerações de nêutrons, isto é, a taxa de variação relativa de fluxo neutrônico permanece constante vista em medidor apropriado na sala de controle de Angra II, quando então o reator é considerado crítico.

Verifica-se a concentração de boro final do SRR – Feita por amostragem manual do setor de química da Usina.

2.5.2. Criticalidade e Margem Real de Desligamento

Neste item são mostradas as planilhas usadas para o cálculo da reatividade positiva que deverá ser inserida no núcleo do reator de Angra II para criticalizá-lo e para o cálculo da quantidade negativa que deverá ser inseridas no núcleo para mantê-lo subcrítico, conforme a condição operacional que se deseja para Usina. para cada parâmetro. No Anexo 5 deste trabalho é mostrado um roteiro para o cálculo destas planilhas.

Tabela 2.2. Cálculo da Quantidade de Água Desmineralizada a ser Adicionada ao Primário para Criticalizar o reator após um desarme do reator.

Condições da Usina no Desligamento															
Data e Hora	1	17/07/2005 05:56	Parâmetros de Reatividade												
Queima do Cido	2	8390,2	ppm	Valor Dif. do Boro	8	-8,2	ppm								
Prof. de Ins. Banco L	3	12	cm	Valor Int. Banco L	9	-174	pcm								
Temp. Média do SFR	4	308,6	oC	Defeito Iso. de Temp.	10	43	pcm								
Potência do Reator	5	81,2	%FN	Valor Int. de Potência	11	-1480	pcm								
1o Banco D	6	37	cm	Valor Int. do Banco D	12	-56	pcm								
Sequência				2											
Conc. de Boro no SRR	7	367	ppm	Valor Int. do Boro	13	-3026	pcm								
				Reat. do Xenônio	14	-2838	pcm								
				Reat. do Samário	15	-778	pcm								
Soma das Reatividades no Desligamento	16				16	-8309	pcm								=(9+10+11+12+13+14+15)

Condições da Usina na Criticalidade																	
Data e Hora	17	21/07/2005 20:00	Parâmetros de Reatividade														
Tempo do Reator Desl.	18	110:04	hr:mm	Valor Dif. do Boro	23	-8,6	ppm										
Posição de Banco L	19	12	cm	Valor Int. Banco L	24	-174	pcm										
Temp. Média do SFR	20	295	oC	Defeito Iso. de Temp.	25	421	pcm										
Potência do Reator	21	0	%FN	Defeito de Potência	26	0	pcm										
Banco D (Prof. de Ins.)	22	360	cm	Valor Int. do Banco D	27	-829	pcm										
Sequência				2													
1oD																	
2oD (1oDin)				x													
3oD (1oD+2oDin)																	
				Reat. do Xenônio	28	-7	pcm										
				Reat. do Samário	29	-1086	pcm										
Soma das Reatividades na Criticalidade (Sem o Valor Integral do Boro)	30				30	-1676	pcm								=(24+25+26+27+28+29)		
Valor Integral do Boro na Criticalidade	31				31	-6633	pcm								=(16 - 30)		
Concentração Crítica Esperada (CCE) de Boro	32				32	771	ppm								=(31/ 23) ou Tabela 24		
Concentração de Boro no SFR no Início da Diluição	33				33	887	ppm										
CB no KBB (Boro Residual):	34				34	0	ppm										
Quant. de Água a ser Adicionada para Criticalidade:	35				35	40824	kg										
Taxa de Diluição Borração:						10	kg/seg										
Duração da Diluição:						1:08	horas: minutos										

Tabela 2.3. Cálculo da Margem de Desligamento do reator após um RESA.

Condições de Usina Anteriores ao Desligamento (Reator Crítico)						
Data e Hora	1	17/07/2005 05:56		Parâmetros de Reatividade		
Queima de Gdo	2	839,2	MWD/TMU	Valor Dif. de Boro	8	-82 ppm
Prof. de Ins. Banco L	3	12	cm	Valor lit. Banco L	9	-174 ppm
Temp. Média de SFR	4	308,6	°C	Reat. de Moderador	10	43 ppm
Potência de Reator	5	81,2	%FN	Valor lit. de Potência	11	-148 ppm
1º Banco D	6	37	cm	Valor lit. de Banco D	12	-56 ppm
Sequencia	2					
Conc. de Boro no SFR	7	367	ppm	Valor lit. de Boro	13	-302 ppm
				Reat. de Xenônio	14	-233 ppm
				Reat. de Samário	15	-778 ppm
Soma das Reatividades no Desligamento	16				16	-839 ppm = (9+10+11+12+13+14+15)

Condições de Usina no Desligamento (Reator Sub Crítico)						
Data e Hora	17	20/07/2005 12:00		Parâmetros de Reatividade		
Tempo de Reator Desl.	18	7804	h:min	Valor Dif. de Boro	23	-86 ppm
Posição de Banco L+D	19	384	cm	Valor lit. Banco L	24	-712 ppm
Temp. Média de SFR	20	288,94	°C	Reat. de Moderador	25	40 ppm
Potência de Reator	21	0	%FN	Valor lit. de Potência	26	0 ppm
Conc. de Boro no SFR	22	834	ppm	Valor lit. de Boro	13	-718 ppm
				Reat. de Xenônio	28	-68 ppm
				Reat. de Samário	29	-1036 ppm
Soma das Reatividades como Reator Sub Crítico	30				30	-1486 ppm = (24+25+26+27+28+29)

Margem de Desligamento para	20/07/2005 12:00	31	-667	ppm	= (30-16)
-----------------------------	------------------	----	------	-----	-----------

Keff (Aproximado) =	32	0,94	= 1 / ((31 * 10000) - 1)
---------------------	----	------	--------------------------

Capítulo 3

– Controle Preditivo Neural –

3.1. Introdução

Neste capítulo faremos uma abordagem sobre os aspectos teóricos que envolvem o entendimento de um sistema de controle preditivo, necessários para implementação do algoritmo de controle utilizado neste trabalho. A filosofia do controlador preditivo é apresentada de forma geral, passando pela função custo e seus parâmetros, até a obtenção da lei de controle. Antes, porém, é feita uma breve menção aos controles regulatórios clássicos - Proporcional, Integral, Diferencial (PID).

3.2. Controle Regulatório Clássico

A filosofia básica de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada de um processo (plantas lineares ou não lineares) com o intuito de fazer com que o sinal de saída satisfaça certas especificações e/ou apresente um comportamento particular. A eficiência do processo pode, então, ser analisada em função da técnica de controle utilizada, isto é do desempenho do sistema de controle.

Diversos processos industriais sejam eles lineares ou não lineares utilizam os controladores regulatórios clássicos (PID) (OGATA, 2003). Com estes, o processo é tratado como se fosse à junção de diversos processos monovariáveis. Como exemplos, se podem citar, os controles de temperatura média, de fluxo neutrônico, de posição do banco L, de posição do banco D e de distribuição de potência, que compõem o Sistema de Controle do Reator da Usina Nuclear de Angra II. A figura 3.1 mostra um diagrama em bloco genérico deste tipo de controle.

Onde:

- $r(t)$ representa o sinal de referência para o controlador,
- $e(t)$ representa o sinal de erro entre $r(t)$ e $y(t)$,
- $u(t)$ representa o sinal de controle, entrada do processo,

- $y(t)$ representa a saída do processo (variável controlada).

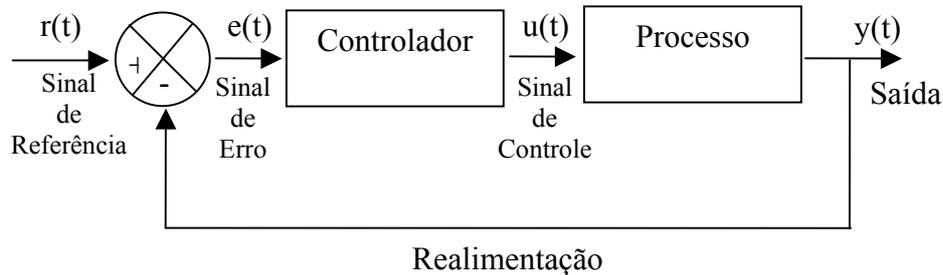


Figura 3.1 Diagrama em bloco de um Controlador Regulatório Clássico

Uma constatação feita a respeito dos controladores regulatórios clássicos é que eles não contemplam os acoplamentos existentes entre as várias variáveis manipuladas e as várias variáveis controladas. Tais acoplamentos, quando são considerados, promovem ao sistema de controle um melhor desempenho e em conseqüência promoverá ao processo uma produção otimizada (OGATA, 2003), (CAMACHO, 1998) e (CLARKE, 1987).

3.3. Controle Preditivo Sujeito a Restrições (GPC)

O controle preditivo sujeito a restrições, também chamado de controle preditivo ou GPC (*Generalized Predictive Control*), é uma técnica de controle introduzida em meados dos anos 70 e pertence a uma classe de método de controle baseadas em controle digital (*MBPC – Model Based Predictive Control*). O controle preditivo possui bom desempenho quando o processo é instável ou possui grandes atrasos de transporte. Responde bem com respeito aos erros da entrada e saída de controle, valores variados das variáveis envolvidas e a ruídos. A figura 3.2 mostra uma estrutura básica de um GPC.

Onde:

- $u(t)$ representa o sinal de controle,
- $y(t)$ representa o sinal da variável controlada,
- $r(t)$ representa o sinal de referência,

- $y_n(t)$ representa a saída do modelo linear da planta ou processo.

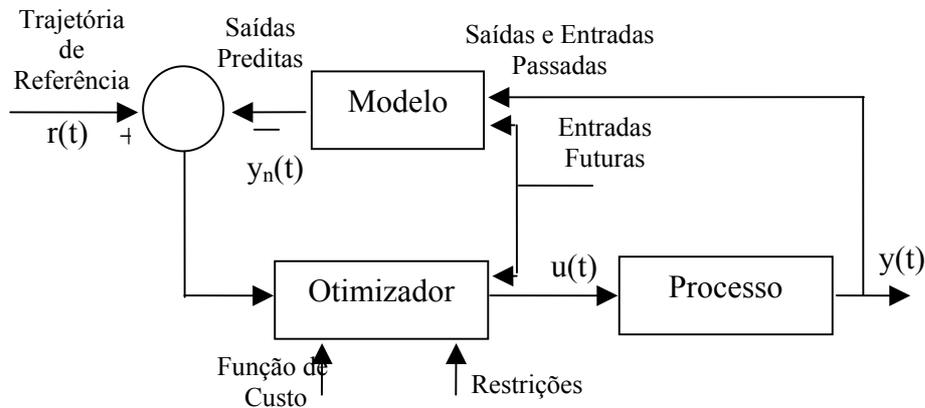


Figura 3.2 Estrutura básica de um Controlador Preditivo Sujeito a Restrições.

O GPC foi originalmente desenvolvido como um preditor linear, isto é, o algoritmo de otimização do controle precisa de um modelo linear e paramétrico do sistema a ser controlado para resolução analítica da lei de controle. Para os casos em que o modelo é não linear, ocorre a necessidade de utilização de um algoritmo também não linear. Isto afeta a eficiência e o desempenho computacional pelo quais as entradas de controle são determinadas (CLARKE, 1987). Para plantas não lineares, a habilidade do GPC em fazer previsões eficientes pode ser melhorada se uma rede neural for usada para aprender a dinâmica do sistema ao invés de se usar técnicas de modelagem não linear normalizadas. Diversos são os métodos de otimização que podem ser utilizados (NEWTON-RAPHSON, GAUSS-NEWTON, LEVENBERG-MARQUARDT, entre outros (DENNIS, 1983), (GILL, 1981), (MARQUARDT, 1963) e (LEVENBERG, 1944).

A seleção de um método de minimização da função de custo pode ser baseada em diversos critérios, tais como:

- Número de interações para a solução;
- Custo computacional;
- Eficiência da solução proposta.

Os próximos itens descrevem os passos para construção de um controlador preditivo que se utiliza das redes neurais (*NGPC – Neural Generalized Predictive Control*) para

modelagem do processo a ser controlado. Vale lembrar que estes passos são os mesmos caso utilizássemos o GPC.

3.4. Controle Preditivo Neural (NGPC)

Como visto anteriormente para plantas não lineares, a resposta do controle é também melhorada se um algoritmo que usa um método de otimização não linear for aplicado. Neste item, são descritos os passos para construção de um controlador preditivo que se utiliza das redes neurais (*NGPC – Neural Generalized Predictive Control*) para modelagem do processo a ser controlado. A Figura 3.3 abaixo mostra um controlador preditivo usando rede neural para modelagem do processo. Ele consiste de quatro componentes, a planta a ser controlada, o modelo de referência que especifica o desempenho desejado da planta, a rede neural que modela a planta e o algoritmo de minimização da função de custo que determina a entrada necessária para que se produza a saída otimizada. O algoritmo NGPC consiste dos blocos da função de minimização do custo e da rede neural (SOLOWAY, 1996) e (HUNT *et al*, 1992).

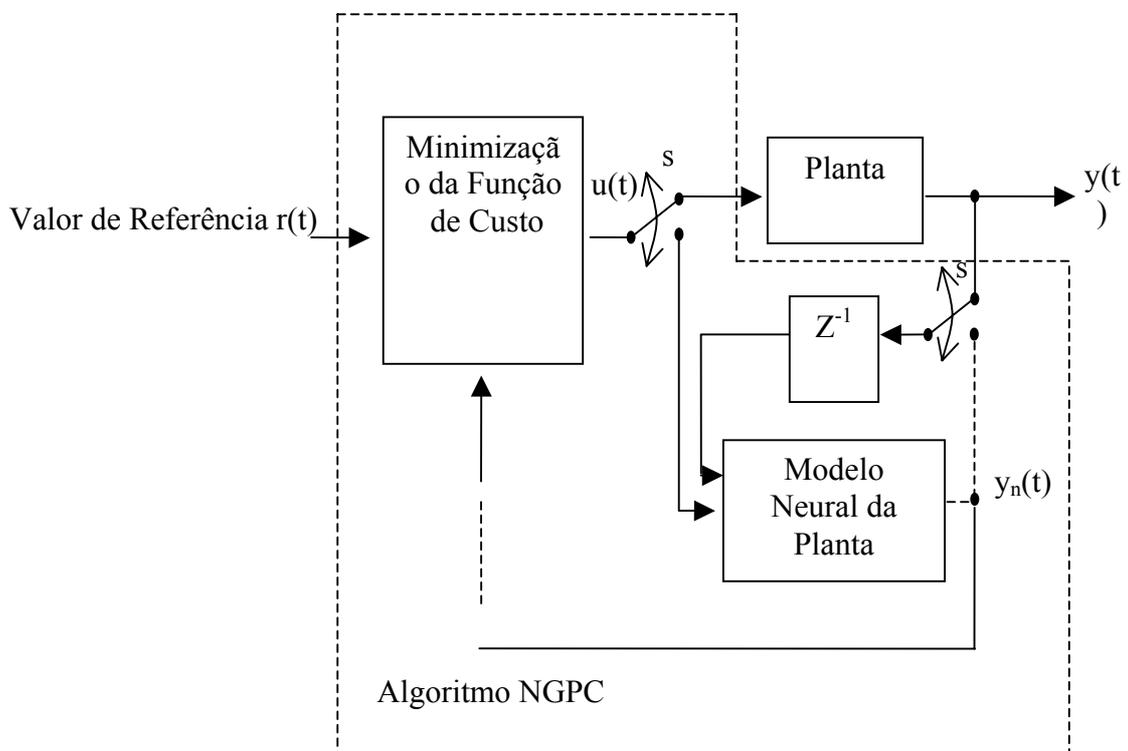


Figura 3.3 Diagrama em bloco do Controle Preditivo Neural

3.4.1. Funcionamento do NGPC

O algoritmo executa uma seqüência de ações de controle pela minimização de uma função de custo, definida sobre um horizonte de predição, com ponderação da ação de controle (horizonte de controle) e pertence a classe de controladores de horizonte móvel. O princípio do horizonte móvel calcula uma seqüência de ações de controle, porém só envia a ação (ou ações no caso multivariável) de controle atual.

A Figura 3.4. abaixo ilustra o conceito do controle preditivo no qual uma seqüência de sinal de controle futura é calculada de maneira que a saída predita siga uma determinada trajetória de referência. Adiante é feita uma descrição da seqüência operacional do sistema.

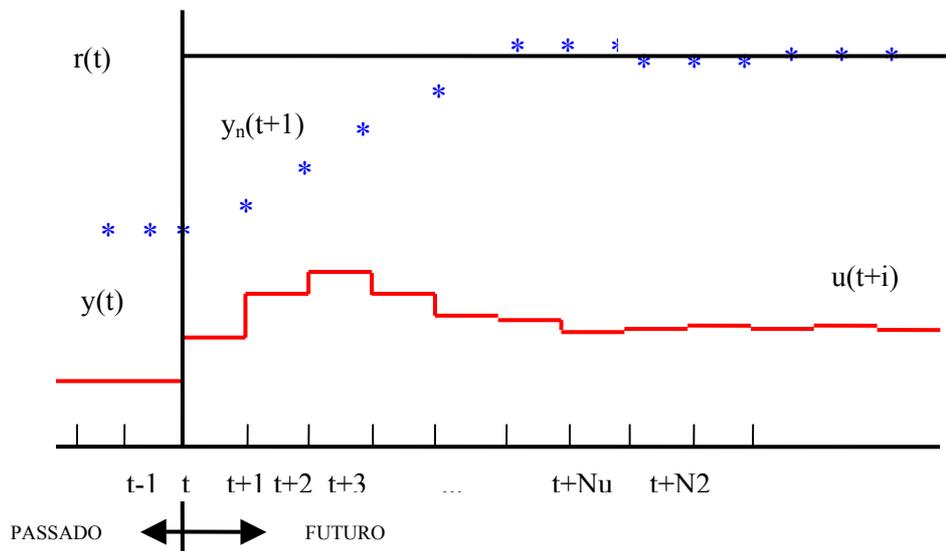


Figura 3.4 Estratégia do Controlador Preditivo

3.4.1.1. Seqüência Operacional

O algoritmo (ver figuras 3.3 e 3.4) se inicia com um sinal de entrada $r(t)$, que é o valor de referência. A variável $r(t)$ corresponde à trajetória de referência a ser seguida e para este trabalho ela é uma função constante. A saída predita $y_n(t)$ do modelo da planta (neste caso executado por uma rede neural) é então comparada à trajetória de referência cujo erro produzido é então enviado ao bloco do otimizador, que contém a função de custo (ver figura 3.3). O algoritmo de minimização da função de custo produz uma saída utilizada como entrada para a planta $u(t)$ quando esta é minimizada e o processo se

repete. Entre amostras, a chave \underline{s} da figura 3.3 é ajustada para a rede neural, onde o algoritmo passa a fazer o cálculo para próxima entrada $u(t+1)$ em função da resposta do sistema, uma vez a função de custo sendo minimizada sua resposta é passada para a planta. Podem ser observadas entradas e saídas com “*delay time*” que são usadas como entrada para a RN [$y(t-j)$ e $u(t-j)$] e entradas futuras $u(t+j)$ tanto para o modelo da planta quanto para o bloco otimizador, onde $j \in \mathbb{N}$. As restrições observadas limitam o grau de liberdade dessas variáveis.

3.4.2. Função de Custo

Os vários algoritmos GPC e conseqüentemente o NGPC propõem diferentes funções de custo para obter a lei de controle. O objetivo principal é que a saída futura $y(t)$ (equação 3.1) no horizonte considerado, deve seguir um determinado sinal de referência $r(t)$ e, ao mesmo tempo, o esforço do controlador necessário para isto deve ser penalizado. Para os casos de treinamento da rede neural, a saída $y(t)$ pode ser substituída na equação 3.1 por $y_n(t)$, que é a predição do sinal de saída do modelo neural. A função de custo de interesse para aplicação neste trabalho é:

$$J = \sum_{j=N1}^{N2} [r(t+j) - y(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{Nu} \lambda [\Delta u(t+j)]^2 \quad (3.1)$$

Onde:

- $N1$ é o horizonte mínimo de predição;
- $N2$ é o horizonte máximo de predição;
- Nu é o horizonte de controle;
- $y(t+j)$ é a predição do sinal de saída do processo
- $r(t+j)$ é a trajetória de referência ao longo do tempo;
- λ é o fator de ponderação da entrada de controle;
- $\Delta u(n+j)$ é a variação entre $u(n+j)$ e $u(n+j-1)$.

Esta função de custo quando minimizada permite minimizar não somente o erro médio quadrático existente entre o sinal de referência e modelo da planta, mas também a taxa de variação quadrática da entrada de controle.

Quando esta é minimizada, uma entrada de controle $u(t+j)$ é gerada, o que permite que a planta acompanhe a trajetória de referência $r(t)$ com alguma tolerância (SOLOWAY, 1996).

3.4.2.1. Parâmetros

$N1$ e $N2$ é o valor mínimo e o valor máximo do horizonte de predição da função custo, respectivamente e Nu é o horizonte de controle, o qual não é necessariamente coincidente com o horizonte máximo, como será visto depois. O significado de $N1$ e $N2$ é intuitivo. Eles marcam os limites dos instantes no qual é desejado que a saída do processo siga a referência. Então, se um valor muito alto para $N1$ for adotado é porque não é importante que existam erros nos primeiros instantes, o que irá provocar uma resposta suave para o processo. Nota-se que em processos com um tempo morto \underline{d} não existe razão para $N1$ ser menor do que \underline{d} , porque a saída não começará a evoluir até o instante $\underline{t+d}$. Além disto, se o processo possui resposta inversa, este parâmetro irá permitir que os primeiros instantes da resposta inversa sejam eliminados da função de custo. O coeficiente λ é um fator que considera o comportamento futuro, funciona como atenuador.

3.4.2.2. Trajetória de Referência

Uma das vantagens do controle preditivo é que se a trajetória de referência for conhecida a priori, o sistema pode reagir antes que as mudanças sejam efetivamente implementadas, evitando-se com isto os efeitos do retardo na resposta do processo.

3.4.2.3. Restrições

Na prática, todos os processos estão sujeitos a restrições. Os atuadores têm um campo limitado de ação, assim como uma determinada taxa de variação como, por exemplo, as válvulas que estão limitadas por sua posição totalmente aberta ou fechada e pela taxa de resposta, que é o tempo para a sua abertura ou fechamento. Razões construtivas, de segurança ou ambientais ou até mesmo faixa de leitura dos sensores podem impor limites nas variações do processo, como por exemplo, níveis de tanque, vazões em tubulações, valores máximos para pressões ou temperaturas. Faz-se

necessário a introdução destas possíveis restrições na função de custo a ser minimizada. A adição destas restrições na função de custo torna a minimização mais complexa, tal que a solução não pode ser obtida explicitamente como nos casos sem restrições. Alguns tipos:

- Restrições de Sobre Elevação - Em alguns processos a sobre elevação (*overshoot*) não é desejável por diferentes razões. Restrições para a sobre elevação são de fácil implementação.
- Comportamento Monotônico - Alguns sistemas de controle tendem a exibir oscilações não desejáveis na variável controlada antes de atingir o valor de referência,. Podem-se adicionar restrições ao sistema de controle para evitar este tipo de comportamento, impondo um comportamento monotônico à variável de saída.

3.4.3. Algoritmo de Minimização da Função de Custo

O objetivo do algoritmo é minimizar J (equação 3.1) com respeito às entradas $u(t+1), u(t+2), \dots, u(t+N_u)$, que são indicações das entradas $u(t)$ no horizonte de controle N_u . A função de custo em questão é minimizada pelo algoritmo do Backtracking (DENNIS, 1983).

3.4.4. Modelagem da Planta

Pelo que foi apresentado, até então, percebe-se que o ponto mais importante do controle preditivo é o modelo do processo. Os modelos podem ser subdivididos em função de suas várias características. Como o GPC requer a solução de um modelo para prever as saídas futuras do processo, a forma do modelo selecionado vai repercutir também no desempenho do método. Para este trabalho foi considerado uma Rede Neural “*Feedforward*”, como segue:

O treinamento inicial da rede é feito *off-line* antes do controle ser aplicado, conforme figura. 3.5. A rede neural recebe a mesma entrada que a planta $u(t)$. A rede neural tem uma entrada adicional que tanto pode vir da planta $y(t)$, quanto da saída da rede $y_n(t)$. A que é usada depende da planta e sua aplicação. Esta entrada auxilia na captura da dinâmica da planta e na estabilização de sistemas instáveis. Para treinar a rede, seus pesos sinápticos são ajustados de forma que um conjunto de entrada produza

a saída desejada. Um erro é formado entre $y_n(t)$ e $y(t)$. Este é então usado para atualizar os pesos da rede neural via gradiente de aprendizagem descendente. Isto é repetido até que algum critério de parada seja atingido.

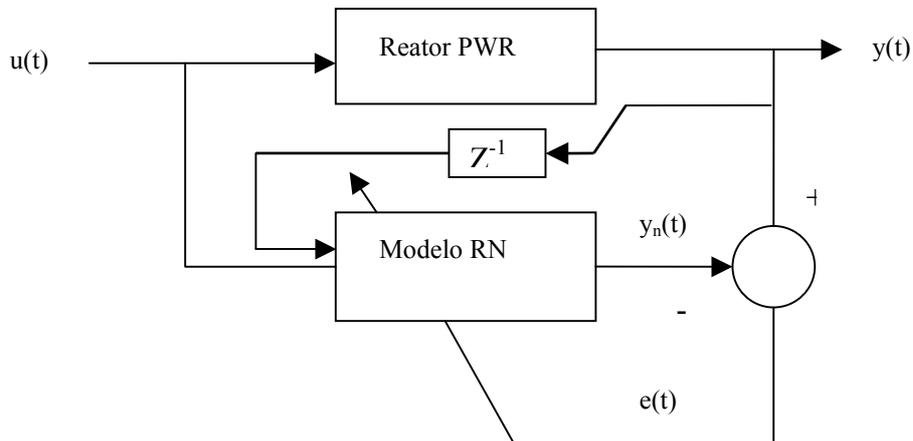


Figura 3.5 Diagrama em bloco do treinamento da Rede Neural off-line

A partir do momento em que uma rede neural seja usada para modelar a planta, a configuração da arquitetura da rede deve ser considerada. Uma rede neural tanto pode ser configurada para modelar uma entrada e saída, quanto para modelar um estado espacial. Esta implementação do NGPC adota o modelo de entrada e saída, visto que a modelagem espacial requer medidas do estado da planta que nem sempre estão disponíveis. A figura 3.6 descreve uma rede neural multicamadas *feedforward* com uma estrutura de tempo regressiva. Como abordado neste trabalho, a rede neural representada consiste das entradas externas $u(t)$ e $y(t-1)$, e seus respectivos nós de atraso $u(t-1), \dots, u(t-n_d)$ e $y(t-2), \dots, y(t-d_d)$. Os parâmetros n_d e d_d representam o número de nós de atraso relativos as entradas $u(t)$ e $y(t-1)$, respectivamente. A rede neural possui uma camada oculta contendo nós ocultos que utilizam a função de ativação genérica, $f(\cdot)$. O nó de saída usa uma função de ativação linear.

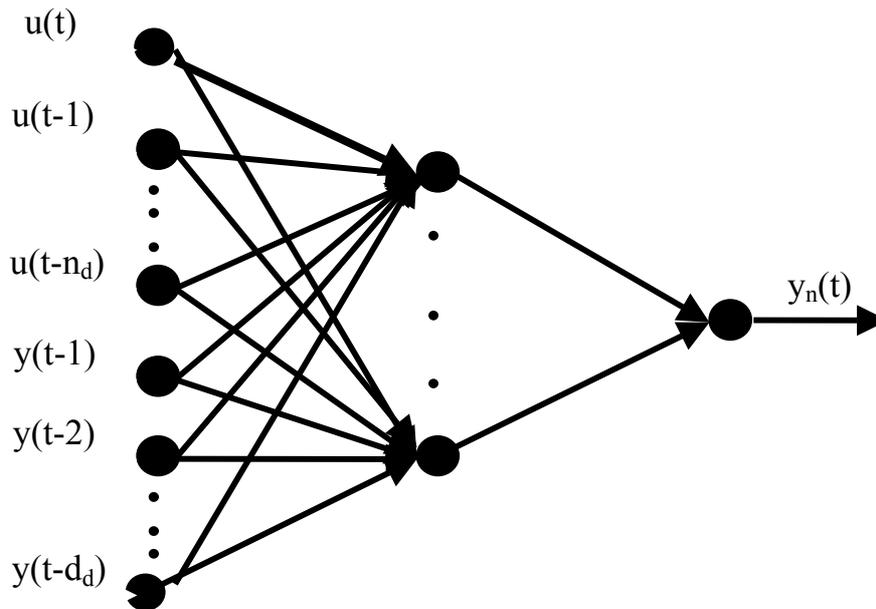


Figura 3.6 Rede Neural Feedforward com uma estrutura de tempo regressiva.

As equações 3.2 e 3.3 representam esta arquitetura na forma:

$$y_n(t) = \sum_{j=1}^{hid} w_j f_j(\text{net}_j(t)) + b \quad 3.2$$

$$\text{net}_j(t) = \sum_{i=0}^{n_d} w_{j,i+1} u(t-i) + \sum_{i=1}^{d_d} w_{j,n_d+i+1} y(t-i) + b_j \quad 3.3$$

Onde:

- $y_n(t)$ - é a saída da Rede Neural
- $f_j(-)$ - é a saída da função para o j th nó da camada oculta,
- $\text{net}_j(t)$ - é o nível de ativação dos j th nós da função de saída,
- hid - é o número de nós da camada oculta,
- n_d - é o número de nós entrada associada com $u(\cdot)$ exceto $u(n)$,
- d_d - é o número de entradas associadas com $y(\cdot)$,
- w_j - os pesos que conectam os j th nós ocultos ao nó de saída,
- $w_{j,i}$ - os pesos que conectam os i th nós de entrada aos j th nós ocultos,
- $y(t-i)$ - é a saída em atraso da planta usada como uma entrada da RN,
- $u(t-i)$ - é a entrada da RN e seus atrasos,
- b_j - é o bias no j th nó oculto,

➤ b - é o bias no nó de saída.

3.4.5. Predição Usando uma Rede Neural

O algoritmo NGPC usa a saída do modelo da planta para prever a dinâmica da planta considerando uma entrada arbitrária do tempo corrente t, para algum tempo futuro t+k. Isto é alcançado modificando as equações 3.2 e 3.3 conforme apresentado a seguir:

$$yn(t+k) = \sum_{j=1}^{hid} \{w_j f_j (net_j(t+k))\} + b \quad 3.4$$

$$net_j(t+k) = \sum_{i=0}^{n_d} w_{j,i+1} \begin{cases} u(t+k-i), k-N_u < i \\ u(t+N_u), k-N_u \geq i \end{cases} + \sum_{i=1}^{\min(k,d_d)} (w_{j,n_d+i} yn(t+k-1)) + \sum_{i=k+1}^{d_d} (w_{j,n_d+i+1} + y(t+k-i)) \quad 3.5$$

A complexidade da equação 3.5 se eleva quando consideramos a função de custo J e a natureza recursiva da predição. A primeira soma da equação 3.5 quebra-se em duas partes representadas pela condições, $k - N_u < i$ e $k - N_u \geq i$. A condição onde $k - N_u < i$ é tratada previamente os futuros valores de u até $u(t + N_u - 1)$. A condição onde $k - N_u \geq i$ ajusta as entradas de $u(t + N_u)$ até $u(t + K)$ igual a $u(t + N_u)$. Esta condição ocorrerá apenas se $N_2 > N_u$. A segunda soma da equação 3.5 trata a parte recursiva da predição. Isto faz com que se retorne a saída da rede, y_n , para os tempos k ou d_d , que são sempre pequenos. A terceira e última soma de equação 3.5 trata os valores prévios do sinal de saída (y).

O seguinte caso, descrito abaixo, ilustra o processo de predição usando uma rede neural:

Considere uma rede neural com dois nós ocultos (h_d), um nó de saída e, entrada consistindo de $u(t)$ e, duas entradas prévias ($n_d = 2$) e três saídas prévias ($d_d = 3$). Suponha que 2 passos de predição necessitam ser encontrados, isto é, a rede neural necessita prever as saídas nos tempos t +1 e t +2. Para produzir a saída $y_n(t+2)$, as entradas $u(t+1)$ e $u(t+2)$ são necessárias. O processo de predição é iniciado no tempo t, com as condições iniciais de $[u(t), u(t-1)]$ e $[y(t), y(t-1), y(t-2)]$ e uma entrada estimada $u(t+1)$. A saída deste processo é $y_n(t+1)$, que é retornado a rede neural e o processo é repetido para produzir a saída predita da planta $y_n(t+2)$. O processo é mostrado na

figura 3.7. O que também demonstra a natureza recursiva da predição.

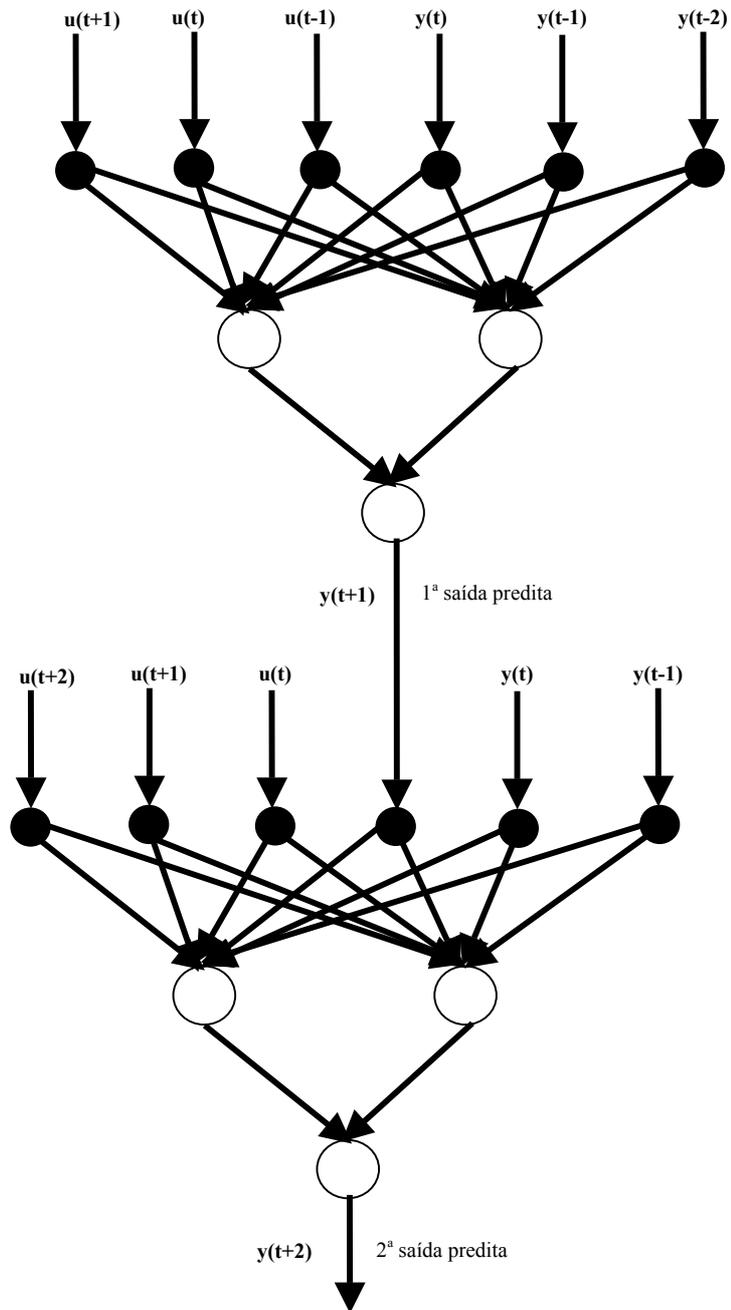


Figura 3.7. Predição da rede neural para $k = 2$

Capítulo 4

– Implementação do Sistema de Controle Preditivo Neural –

4.1. Introdução

Neste capítulo, é apresentada uma descrição completa do desenvolvimento e implementação do controlador preditivo neural para aplicação no processo de criticalidade por diluição do reator da Usina Nuclear de Angra II. A figura 4.1, a seguir, representa a arquitetura desse controlador preditivo neural que se convencionou chamar Sistema PREDCRIT em alusão à expressão “Predição de Criticalidade”, objetivo deste trabalho.

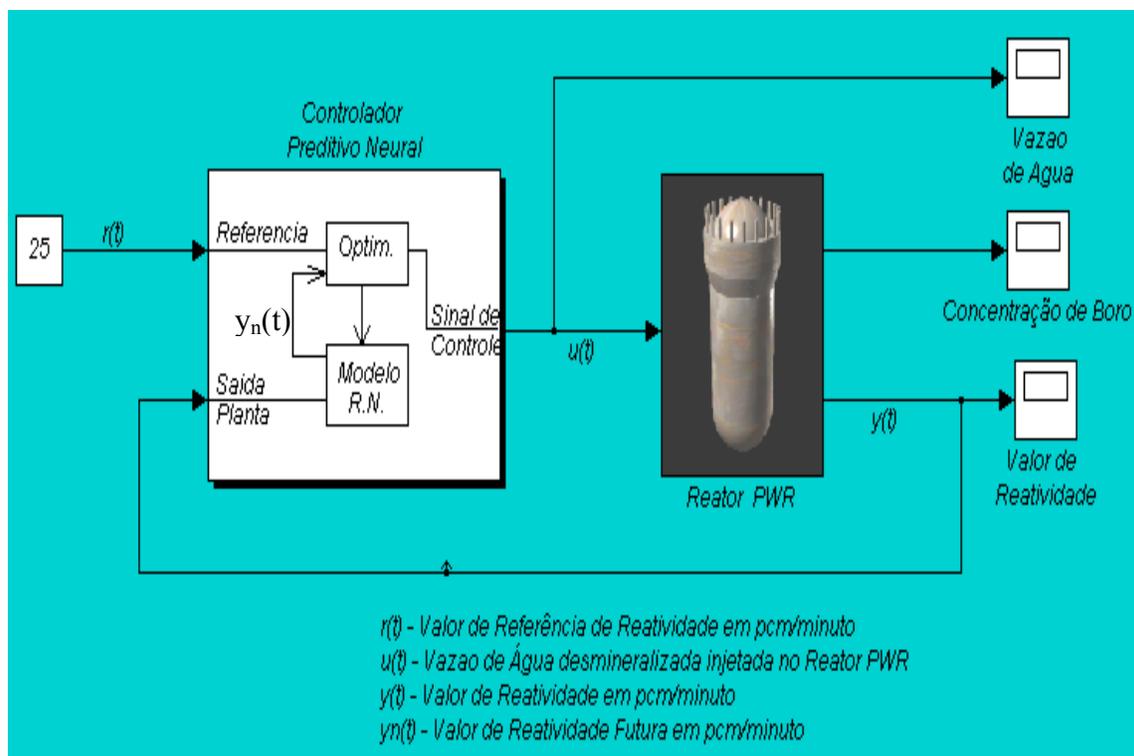


Figura 4.1. Arquitetura do controle de criticalidade do reator da Usina Nuclear de Angra II com controlador preditivo neural (PREDCRIT)

O Sistema Controlador Preditivo Neural PREDCRIT envolve:

- Reator PWR - Representa o código computacional que executa o cálculo do balanço de reatividade relativo aos parâmetros que influenciam na cinética neutrônica do reator de Angra II, isto é, simula o processo de criticalidade. Este código está disponibilizado na íntegra no anexo II deste trabalho. Este bloco é comentado em detalhes no item 4.2.1
- Controlador Preditivo Neural – Que contém:
 - O bloco Modelo RN – que representa o modelo da planta com o uso de uma rede neural representado;
 - O bloco Optim – que contém o algoritmo de minimização da função de custo \underline{J} de interesse para este trabalho (equação 4.1, item 4.2.2 do corrente capítulo).

Os blocos Modelo RN e Optim são comentados em detalhes nos itens 4.3.1 e 4.3.2 respectivamente. As entradas e saídas envolvidas neste controlador são representadas como segue:

- $r(t)$ - Valor de Referência de Reatividade – que é comparado aos valores de reatividade de saída do modelo neural $y_n(t)$ para predição da entradas de controle futura $u(t)$ (vazão de água desmineralizada futura) no bloco otimizador (minimizador) da função de custo \underline{J} .
- $u(t)$ - Vazão de água desmineralizada injetada no Reator PWR – que é a entrada para o processo simulado de criticalidade. Seus valores atuais e em atraso são usados no bloco otimizador da função de custo \underline{J} e no modelo neural do processo simulado.
- $y_n(t)$ - Variação da Reatividade futura decorrente do processo de predição do Modelo RN - que indica como a planta se comportaria num horizonte de predição pré-definido conhecendo-se as entradas e saídas atuais e em atraso da vazão de água desmineralizada e variação da reatividade do processo simulado (Reator PWR). Este valor é tratado no bloco otimizador que

minimiza a função de custo

- $y(t)$ - Variação da Reatividade decorrente da quantidade de água injetada no Reator PWR - que é a saída do processo simulado de criticalidade. É utilizado como entrada do modelo neural para predição de $y_n(t)$, valores futuros de $y(t)$.

Com este sistema de controle, é esperado que dado um valor de referência de variação de reatividade $r(t)$ em *pcm*, seja possível mantê-lo pela geração de uma trajetória de vazão de água desmineralizada futura $u(t)$, variável de controle, em *kg/s* que deverá ser seguida pelo operador do reator por atuação nos elementos finais de controle que são válvulas de injeção de água desmineralizada no sistema primário, representado na figura 4.1 pelo desenho de um reator (Reator PWR). A variação de reatividade $y(t)$, variável controlada, que ocorre em resposta a essa ação de controle é comparada ao valor de referência $r(t)$ e novas ações futuras de controle $u(t)$ são geradas a fim de manter o controle com o menor nível de desvio possível, ou seja, manter constante a taxa de variação de reatividade no decorrer do processo de criticalização do reator de Angra II.

Esse processo de diluição do sistema primário promove a redução da absorção de nêutrons, isto é, redução da concentração de boro (absorvedor de nêutrons) e com isto mais nêutrons ficam disponíveis para causar fissão no U-235, elevando a produção de nêutrons entre gerações consecutivas (cinética neutrônica), aumentando o fator de multiplicação k até que o mesmo alcance a unidade (1) e o reator de Angra II possa ser considerado crítico (capítulo 2, item 2.2).

A concentração de boro final estabelecida pelo alcance da criticalidade, em decorrência da diluição, é chamada de concentração crítica de boro e é tomada por análise química manual feita pelo setor de química da usina. Esta ação permite verificar se a criticalidade ocorreu dentro das tolerâncias exigidas pelas especificações técnicas (FSAR,2007).

A idéia de se manter constante o valor de referência da variação de reatividade, contribui diretamente para manutenção da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico constante, já que reatividade ρ e o fator de multiplicação k estão relacionados conforme visto no capítulo 2, item 2.2. A taxa de variação relativa de fluxo é dada em %/s e é um parâmetro limitante do processo de criticalidade. Operacionalmente, para o processo de

criticalidade este valor é limitado em até 3%/s, limites acima deste valor estão sujeitos à intervenção automática do sistema de limitação do reator em 5%/s com a inserção automática de barras de controle e em 7%/s pelo sistema de proteção do reator com a queda de todas as barras de controle e conseqüentemente o desarme do reator (RESA), (CFOL II - FRPO, 1998).

O processo em questão conta com a presença de seis outros parâmetros (capítulo 2, item 2.2), além da concentração de boro, que influenciam na cinética neutrônica alterando o valor de k_{eff} (k efetivo). Portanto, para levar o reator a condição de criticalidade pela diluição do sistema primário há necessidade de se fazer um balanço entre esses parâmetros, isto é realizar um cálculo matemático (balanço de reatividade) que possa contemplar a dinâmica do processo (multivariável) para alcance desse objetivo - criticalização do reator de Angra II (capítulo 2 - item 2.4).

4.2. Implementação

Este trabalho se inicia com o desenvolvimento de um código computacional que simula o processo de criticalização de Angra II, isto é, faz o balanço de reatividade necessário para o cálculo estimado da concentração crítica de boro, na seqüência é apresentado o controlador preditivo neural e sua composição e por fim, é feito um histórico da implementação deste sistema.

4.2.1. Código Computacional para Simulação do Processo de Criticalidade

A planta a ser controlada, representada na figura 4.1 pelo desenho de um reator (Reator PWR) é o processo de criticalidade do reator de Angra II, isto é, representa os cálculos de balanço de reatividade para se fazer a criticalidade do reator. Como entrada da planta tem-se a vazão de água desmineralizada $u(t)$ em kg/s proveniente dos Sistemas de Armazenamento de Água Desmineralizada (CFOL I - KBB, 1998) e Injeção de Ácido Bórico e Água Desmineralizada (CFOL I- KBC, 1998) que são conectados ao sistema primário (SRR), (CFOL I – JEC, 1998), via Sistema de Controle de Volume de Refrigerante (CFOL I- KBA, 1998) e como saída, a variação de reatividade $y(t)$ em pcm .

A variação de reatividade é função das características do processo, isto é, está intimamente ligada à variação dos parâmetros que influenciam a cinética neutrônica, bem como ao tempo morto, que é o tempo que uma porção de água desmineralizada saindo do KBB/KBC leva para chegar ao núcleo do reator, em geral 3 minutos com duas bombas de carregamento de alta pressão ligadas (Sistema de Controle Volumétrico - KBA) e de 5 minutos quando há apenas uma bomba desse sistema ligada. Para viabilizar esse processo foi necessária a modelagem de um código computacional baseado nas livrarias existentes no MATLAB/Simulink versão 6.0(MATHWORKS, 2002).

4.2.2. Modelagem do Código Computacional Reator PWR

O código Reator PWR, utiliza diversas tabelas, figuras e coeficientes de reatividade presentes no Livro de Dados do Reator da Usina Nuclear de Angra II (2PPR-11). Assim, as reatividades (ρ_{pcm}) correspondentes aos parâmetros que influenciam a cinética neutrônica do reator são obtidas por meio de interpolações destas tabelas e figuras ou ainda por multiplicação direta da variação do parâmetro por seu coeficiente de reatividade ($\rho_{pcm}/\Delta_{parâmetro}$).

Os parâmetros de maior importância que influenciam a reatividade do núcleo de Angra II são:

- Temperatura Média do Moderador,
- Temperatura do Combustível (Proporcional a Potência do Reator),
- Concentração de Ácido Bórico (C_b),
- Posição do Banco de Desligamento L,
- Posição do Banco de Controle D,
- Concentração de Venenos de Fissão (Xenônio e Samário).

As equações para os cálculos do balanço de reatividade foram introduzidas no código e contemplam as variações de reatividade para qualquer estado operacional da usina seja ele: subcrítico, crítico ou supercrítico. Estas equações definidas como 4.1, 4.2 e 4.3 caracterizam o balanço de reatividade nas condições anteriores ao desligamento, na

condição de criticalidade em função do tempo, representado pelo sobrescrito (3) e valor integral do boro na criticalidade em função do tempo respectivamente, mostradas abaixo:

$$\rho_{\text{total anterior ao desligamento}} = (\rho^{(1)}_{\text{Ac. Bórico}} + \rho^{(1)}_{\text{B. Desligamento}} + \rho^{(1)}_{\text{B. Controle}} + \rho^{(1)}_{\text{potência}} + \rho^{(1)}_{\text{Temperatura SRR}} + \rho^{(1)}_{\text{Xenônio}} + \rho^{(1)}_{\text{Samário}}) \quad (4.1)$$

Onde:

- $\rho^{(1)}_{\text{Ac. Bórico}}$ – Reatividade devido a concentração de boro em pcm,
- $\rho^{(1)}_{\text{B. Desligamento}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos L (L+D) em pcm,
- $\rho^{(1)}_{\text{B. Controle}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos D em pcm
- $\rho^{(1)}_{\text{Potência}}$ – Reatividade devido a potência do reator em pcm
- $\rho^{(1)}_{\text{Temperatura SRR}}$ – Reatividade devido a temperatura média do moderador no SRR em pcm
- $\rho^{(1)}_{\text{Xenônio}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do xenônio no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do I - 135) em pcm,
- $\rho^{(1)}_{\text{Samário}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do samário no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do Pm - 149) em pcm.

$$\rho_{\text{Total nova criticalização}}(t) = \rho_{\text{Ac. Bórico}}(t) + \rho_{\text{B. Desligamento}}(t) + \rho_{\text{B. Controle}}(t) + \rho_{\text{Temperatura SRR}}(t) + \rho_{\text{Xenônio}}(t) + \rho_{\text{Samário}}(t) \quad (4.2)$$

Onde:

- $\rho^{(3)}_{\text{Ac. Bórico}}$ – Reatividade devido a concentração de boro em função do tempo,
- $\rho^{(3)}_{\text{B. Desligamento}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos L (L+D) em função do tempo,
- $\rho^{(3)}_{\text{B. Controle}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos D em função do tempo,
- $\rho^{(3)}_{\text{Potência}}$ – Reatividade devido a potência do reator em função do tempo,
- $\rho^{(3)}_{\text{Temperatura SRR}}$ – Reatividade devido a temperatura média do moderador no SRR

em função do tempo,

- $\rho^{(3)}_{\text{Xenônio}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do xenônio no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do I - 135) em função do tempo,

$\rho^{(3)}_{\text{Samário}}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do samário no núcleo do reator (fissão direta, decaimento do Pm - 149) em função do tempo.

3 Valor Integral do Boro na Criticalidade

$$\rho_{\text{total anterior ao desligamento}} - \rho_{\text{total nova criticalização}}(t) = \text{Valor integral do boro}(t) \quad (4.3)$$

Onde:

- Valor integral do boro – Corresponde a reatividade total que deverá ser compensada por diluição para levar o reator a condição de criticalidade em função do tempo.

A equação 4.4 que define os cálculos de boração e diluição, isto é, a relação entre a quantidade de ácido bórico que deve ser removido do SRR e quantidade de água injetada neste sistema é definida como segue:

$$Q(t) = M * L_n ((C(\text{final})(t) - C(\text{injeção}) / (C(\text{inicial}) - C(\text{injeção}))) \quad (4.4)$$

Onde:

- L_n - logaritmo neperiano,
- $C(\text{inicial})$ - concentração de boro do primário antes da injeção em *ppm*,
- $C(\text{final})(t)$ - concentração de boro do primário no decorrer do processo de injeção em *ppm*,
- $C(\text{injeção})$ - concentração de boro do fluido injetado em *ppm*, como trata-se de água vinda do KBB, considera-se o teor de boro presente igual a zero.

- Q - massa do fluido injetado, água desmineralizada em *kg*,
- M - massa total do refrigerante no primário (SRR). Para o Reator PWR foi considerado uma temperatura do moderador de 296° C e pressão do SRR de 158 bar, o que corresponde a uma massa de refrigerante de 292000 kg.

As tabelas de reatividade dos parâmetros que influenciam no balanço de reatividade do processo de criticalização que são utilizadas para modelagem do código computacional que simula o reator de AngraII no senso da criticalidade são apresentadas no Anexo 3 deste trabalho.

O programa de simulação do Reator PWR foi elaborado considerando-se um tempo de amostragem de 60s dos parâmetros que influenciam a reatividade do núcleo do reator de Angra II. A cada amostragem é feito um cálculo de balanço de reatividade (*pcm*). Este resultado é multiplicado pelo coeficiente de reatividade do boro (*pcm/ppm*) e o novo resultado é dado em *ppm* de boro. O processo se repete até que concentração crítica de boro (CCE) seja alcançada. Entretanto, caso se queira alterar este tempo de amostragem para verificação do comportamento de cada um desses parâmetros em intervalos diferentes, é possível fazê-lo por simples alteração no código Reator PWR.

A fim de validar o código computacional, foi verificado se este reproduzia os resultados reais das tabelas e figuras do contidas no Livro de Dados do Reator (2PPR-11). É feita uma comparação entre os resultados de balanço de reatividade obtidos pelo código computacional Reator PWR e programa REATIV A2 que faz este cálculo de balanço. O caso, desarme do reator (RESA) em 19/12/2007, utilizado para esta comparação pode ser visto nas tabelas 4.1 e 4.2 que indicam, nesta ordem, as condições da usina no desligamento e as condições da usina na criticalidade.

Tabela 4.1 Condições da Usina no Desligamento - Teste do Reator PWR

	Dados da Usina	REATIV A2 (pcm)	Reator PWR (pcm)
Trip da Usina	19/12/2007 21:36h	-	-
Queima do ciclo	8213,9 MWD/TMU	-	-
Profundidade de inserção Banco L	8 cm	-113	-112.8
Temperatura Média do SRR	308.8 °C	36	35.5990
Potência do Reator	100%	-1807	-1806,7
Profundidade de inserção Banco D	29 cm	-40	-39.9798
Quantidade de bancos D inseridos no núcleo	1	-	-
Seqüência de movimentação do Banco D	2	-	-
Concentração de Boro	367 ppm	-2962	-2961.5
Xenônio		-3052	-3065
Samário		-789	-796

Tabela 4.2 Condições da Usina na Criticalidade - Teste do Reator PWR

	Dados da Usina	REATIV A2 (pcm)	Reator PWR (pcm)
Retorno da Usina de Angra II	20/12/2007 20:00 h	-	-
Tempo do Reator desligado	22:24 h	-	-
Profundidade de inserção Banco L	8 cm	-113	-112.8
Temperatura Média do SRR	295.1°C	534	406.3467
Potência do Reator	0 %	0	0
Profundidade de inserção Banco D	360 cm	-784	-783.6291
Quantidade de bancos D inseridos no núcleo	2	-	-
Seqüência de movimentação do Banco D	2	-	-
Concentração de Boro	875 ppm	Obs 1	-7355.9
Xenônio		-3333	-31271.1
Samário		-908	-921.52
Concentração Crítica de Boro		490	497.2101

Obs 1 - O REATIV A2 não calcula a reatividade integral devida a concentração de boro presente no SRR em sua estratégia de balanço para o cálculo da CCE. Este valor é calculado por este código quando a estratégia de criticalidade é por bancos (PCE).

A diferença entre estes dois códigos (REATIV A2 e Reator PWR) é a dinâmica dos cálculos de balanço de reatividade. O Reator PWR modela diversos balanços dentro de um intervalo, o que dá maior precisão quando se leva em consideração os efeitos temporais do Xenônio e do Samário. No REATIV A2 os cálculos são estáticos, faz-se um cálculo de balanço para as condições anteriores ao desligamento e outro cálculo no momento da criticidade; não se tem a evolução do processo no decorrer deste estados operacionais da usina. Na tabela 4.11 há uma distorsão muito grande no valor de reatividade devido a temperatura do moderador entre o REATIV A2 e o Reator PWR (aproximadamente 118 pcm). Isto ocorre porque o valor considerado para o REATIV A2, neste caso, não levou em consideração os dados da tabela de valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo. Este valor foi ajustado no decorrer do processo e está dentro das tolerâncias estabelecidas nas especificações técnicas.

4.3. Composição do Controle Preditivo Neural

O controle preditivo neural (SOLOWAY, 1996), requer um modelo neural da planta não linear para prever seu desempenho futuro, um algoritmo de controle que calcula a entrada de controle que otimizará o desempenho da planta sobre um tempo futuro específico, uma função de desempenho para avaliar as respostas do sistema e um procedimento de otimização para selecionar a melhor entrada de controle.

4.3.1. Modelo Neural da Planta

Nesta etapa é determinado o modelo neural da planta (Modelo RN). Assim, é treinada uma rede neural para representar a dinâmica da planta, neste caso a planta é o Reator PWR como vimos no item anterior. O erro $e(t)$ de predição entre a saída da planta (variação da reatividade do Reator PWR) $y(t)$ e a saída da rede neural (variação da reatividade do modelo RN) $y_n(t)$ é usado como um sinal de treinamento da mesma rede neural para a entrada $u(t)$, que representa a vazão de água desmineralizada. O modelo RN é

treinado *off line*, o processo é ilustrado na figura 4.2.

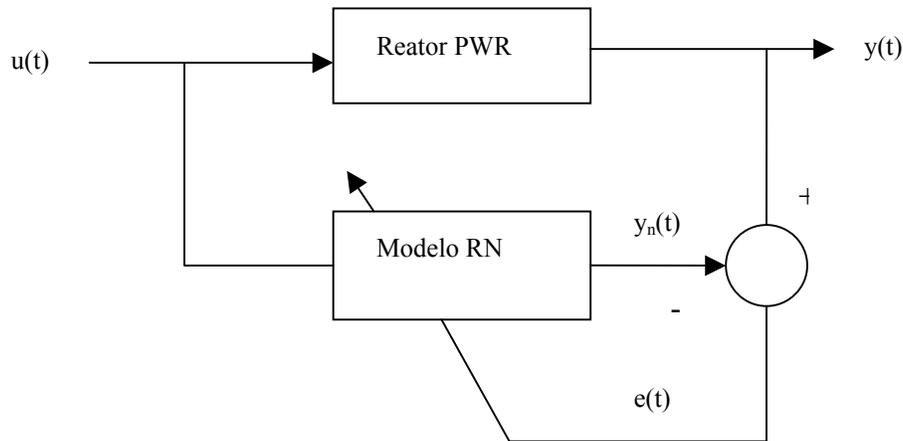


Figura 4.2 Identificação da planta (simplificação)

A rede adotada possui oito neurônios na camada de entrada, isto é, a entrada $u(t)$, que corresponde a vazão para o instante de tempo atual, com seus três respectivos nós de atraso $u(t-1)$, $u(t-2)$ e $u(t-3)$ e a saída $y(t-1)$, que corresponde a taxa de reatividade para o instante de tempo anterior, e seus três respectivos nós de atraso $y(t-2)$, $y(t-3)$ e $y(t-4)$, três neurônios na camada intermediária e um neurônio na camada de saída, configurando-se uma rede neural recursiva.

Para a configuração preditiva em questão o método adotado para treinamento da rede, isto é o algoritmo de aprendizagem, foi o método do gradiente (backpropagation). Para não ter problemas de extrapolação na rede, o espaço de operação da planta (Reator PWR) deve ser coberto adequadamente pelos dados de treinamento (ver referências (BILLINGS, 1985 A e 1985 B) e (A.J.N., 1996)).

4.3 2. Algoritmo de Controle

O modelo neural (Modelo RN, figura 4.1) prediz a resposta da planta sobre um tempo futuro específico chamado de horizonte. As previsões são usadas por um programa de otimização numérica, Optim (figura 4.1) que determina o sinal de controle que minimiza o seguinte critério de desempenho J sobre o horizonte específico:

$$J = \sum_{j=N1}^{N2} [r(t+j) - y_n(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{Nu} \lambda [\Delta u(t+j)]^2 \quad (4.1)$$

Onde:

- $N1$ é o horizonte mínimo de predição,
- $N2$ é o horizonte máximo de predição,
- Nu é o horizonte de controle,
- $r(t+j)$ corresponde a variação de reatividade futura atingida pelo Modelo RN no decorrer do tempo.
- $r(t+j)$ é o valor de referência da variação de reatividade no decorrer do tempo. Para este trabalho será sempre um valor constante.
- λ é o fator de ponderação da entrada de controle,
- $\Delta u(t+j)$ corresponde a taxa da vazão de água desmineralizada entre dois instantes de tempo consecutivos, é a variação entre $u(t+j)$ e $u(t+j-1)$.

Para se obter a seqüência ótima das ações de controle faz-se necessário o conhecimento prévio das variações de reatividade futuras preditas pela rede neural. Entretanto, a estimativa desta reatividade exige o conhecimento das ações de controle futuras e assim, inicia-se o cálculo com a seqüência de controle obtida na amostragem anterior, prosseguindo, iterativamente, para obter as ações de controle ótimas.

O método empregado para resolver o problema de encontrar o mínimo para a equação (4.1) é iterativo e está baseado em um algoritmo de backtracking (DENNIS, 1983). Geralmente aplicado a problemas de otimização, o algoritmo do backtracking é um método usado para realizar busca exaustiva, isto é, avaliar todas as possíveis soluções de um problema. A idéia central é utilizar algum mecanismo (em geral, uma função de corte) para

avaliar se uma determinada escolha tem alguma chance de levar a uma solução; caso a escolha não possa levar a uma possível solução então todas as opções que incluem aquela escolha podem ser ignoradas, isto é, não precisam ser avaliadas. Para maior informação consultar (DENNIS, 1983).

4.4. Implementação do Controle Preditivo Neural

A arquitetura do Controle de Criticalidade do Reator de Usina Nuclear de Angra II com Controlador preditivo neural (figura 4.1) foi estabelecida usando-se o código computacional Reator PWR (Anexo 4) e para implementação do controlador foi utilizado o controlador preditivo neural (NN Predictive Controller), presente na *toolbox* (caixa de ferramentas) do Matlab/ Simulink versão 6.0 que contemplam a configuração dos dados do controlador, tais como:

- Horizontes de predição N1 e N2,
- Horizonte de controle Nu,
- Rotina de minimização da função de custo para execução do algoritmo de controle,
- Fator de ponderação da entrada de controle, ρ , bem como o parâmetro de busca α ,
A configuração dos dados de identificação da planta, tais como:
 - Arquitetura da rede neural (nº de neurônios na camada oculta, nº de entradas e saídas com “*delay time*” e intervalo de amostragem da rede durante processo de aprendizagem),
 - Parâmetros de treinamento da rede neural, como:
 - Nº de padrões para treinamento,
 - Restrições para entrada planta – Vazão de água desmineralizada,
 - Restrições para saída da planta – Variação de reatividade,
 - Possibilidade de geração para treinamento, importação e exportação de dados para treinamento,
 - Intervalos de visualização do processo de aquisição do padrões de treinamento,
 - Nº de épocas para treinamento dos padrões de treinamento,
 - Rotina de minimização do erro durante processo de aprendizagem da planta - execução

do algoritmo de aprendizagem.

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam a plataforma de identificação do controlador preditivo neural disponível no Simulink do Matlab versão 6.0 (MATHWORKS, 2002).

Cost Horizon (N2)	3	Control Weighting Factor (ρ)	1
Control Horizon (Nu)	2	Search Parameter (α)	0.001
Minimization Routine	csrchbac	Iterations Per Sample Time	2
Plant Identification OK Cancel Apply			

Figura 4.3 Configuração do Controlador

Network Architecture			
Size of Hidden Layer	3	No. Delayed Plant Inputs	3
Sampling Interval (sec)	60	No. Delayed Plant Outputs	3
<input checked="" type="checkbox"/> Normalize Training Data			
Training Data			
Training Samples	1000	<input type="checkbox"/> Limit Output Data	
Maximum Plant Input	20	Maximum Plant Output	Inf
Minimum Plant Input	0	Minimum Plant Output	-Inf
Maximum Interval Value (sec)	600	Simulink Plant Model:	Browse
Minimum Interval Value (sec)	60		reativ_sim_02
Generate Training Data Import Data Export Data			
Training Parameters			
Training Epochs	1000	Training Function	trainbr
<input checked="" type="checkbox"/> Use Current Weights	<input checked="" type="checkbox"/> Use Validation Data	<input checked="" type="checkbox"/> Use Testing Data	
Train Network OK Cancel Apply			

Figura 4.4 Identificação da planta para geração de dados para treinamento da do modelo neural da planta.

Capítulo 5

– Estudo de Casos: Resultados e Discussões –

5.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada a utilização do controlador preditivo neural para quatro casos. Os casos considerados são desarmes da Usina Nuclear de Angra II e seu posterior retorno a operação à potência ocorridos no passado. Todos os casos utilizam como referência valores fixos de variação de reatividade $\Delta\rho$ (*pcm*). Os casos em estudo são:

- Primeiro caso – Desarme da Usina de Angra II em 19/12/2007
- Segundo caso – Desarme da Usina de Angra 2 em 11/11/2007
- Terceiro caso – Desarme da Usina de Angra 2 em 11/05/2007
- Quarto caso – Desarme da Usina de Angra 2 em 07/08/2006

Para cada caso apresentam-se os dados:

- Do processo de treinamento da rede neural e configuração do controlador preditivo neural, conforme fluxograma de funcionamento do PREDCRIT, figura 5.1.
- O resultado da aplicação do controle neural para diversos valores de reatividade.

Para os quatro casos em estudo é feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo PREDCRIT e o REATIV A2 (REATIV A2, 2002). Esta comparação é referente aos seguintes parâmetros:

- Concentração de boro crítica estimada (CCE) quando da utilização das informações geradas pelas estimativas de cálculo do REATIV A2 e fornecidas ao operador pelo grupo de física de reatores da Usina de Angra II.
- O tempo gasto pelo operador para criticalizar o reator.

A concentração crítica de boro real no sistema primário é verificada para o momento da criticalidade, o que é realizado por análise química manual deste sistema. Esta ação objetiva saber se a concentração de boro estimada pelo REATIV A2 e o PREDCRIT não violou as tolerâncias impostas pelas especificações técnicas (FSAR, 2007).

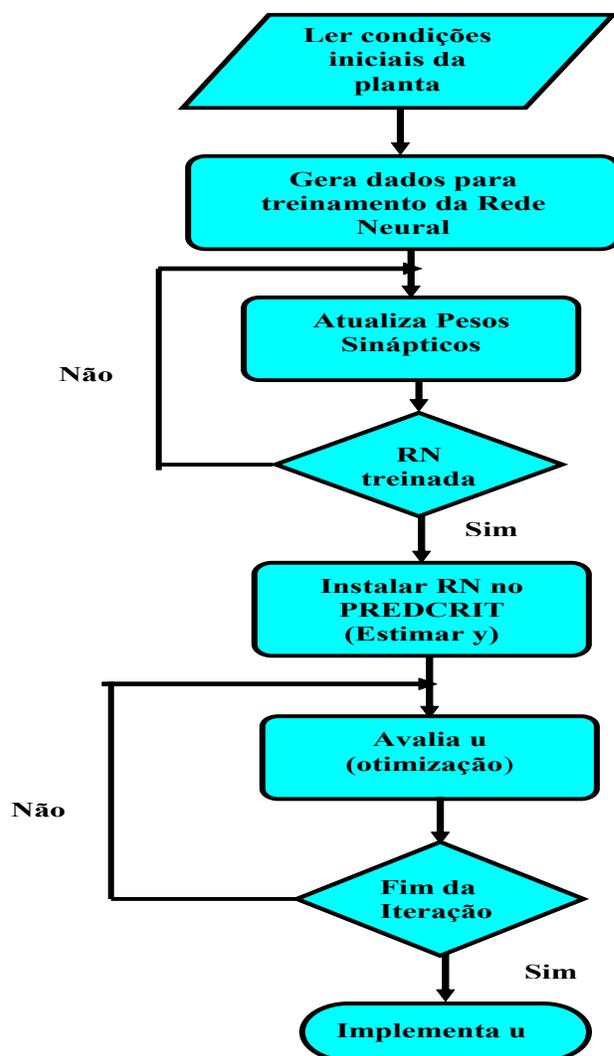


Figura 5.1 Esquema de utilização do PREDCRIT

A utilização do PREDCRIT, ver figura 5.1, possibilita que seja gerada uma trajetória (evolução) de vazão de água desmineralizada a ser seguida pelo operador atuando diretamente no elemento final de controle que são válvulas para diluição do sistema primário (SRR – Sistema de Refrigeração do Reator), (CFOL I – JEC, 1998).

No Anexo 5, são disponibilizadas as planilhas correspondente para os cálculos de aproximação à criticalidade (2PPR-04) e (REATIV A2), isto é, o balanço de reatividade para a criticalidade por diluição do SRR para cada um dos quatro casos considerados.

5.2. Primeiro caso – Desarme da Usina em 19/12/2007

Este caso foi testado para os seguintes valores de referência de variação de reatividade $r(t)$ de 20, 25 e 30 pcm de reatividade. O desempenho do controlador é mostrado em gráficos de vazão de água desmineralizada (kg/s), de concentração de boro (ppm) e de variação de reatividade (pcm) em função do tempo (s). Estes gráficos, são mostrados nas figuras 5.7.a,b,c, 5.8.a,b,c e 5.9.a,b,c para cada um dos valores de referência. Para cada caso estudado são feitos comentários sobre o comportamento do controlador (PREDCRIT) para cada um dos valores de referência de reatividade aplicados. Os dados da usina são descritos nas tabelas 5.1 e 5.2 a seguir:

Tabela 5.1 Condições da Usina no Desligamento – Caso 1

Trip da Usina de Angra II	19/12/2007 21:36h
Queima do ciclo	8213,9 MWD/TMU
Profundidade de inserção Banco L	8 cm
Temperatura Média do SRR	308.8 °C
Potência do Reator	100%
Profundidade de inserção Banco D	308,3 °C
Seqüência de movimentação do Banco D	29 cm
Estratégia de Inserção do Banco D	01
Concentração de Boro	367 ppm

Tabela 5.2 Condições da Usina na Criticalidade – Caso 1

Retorno da Usina de Angra II	20/12/2007 20:00 h
Tempo do Reator desligado	22:24 h
Profundidade de inserção Banco L	8 cm
Temperatura Média do SRR	295.1°C
Potência do Reator	0 %
Profundidade de inserção Banco D	360 cm
Seqüência de movimentação do Banco D	2
Estratégia de Inserção do Banco D	02
Concentração de Boro	875 ppm

5.2.1. Controle Preditivo Neural

Nesta parte a rede neural deverá aprender e simular o reator nas condições da usina descritas nas tabelas 5.1 e 5.2. São geradas amostras de treinamento (ver figura 5.2) a partir da planta simulada, Reator PWR, considerando os parâmetros de especificação mostradas na tabela 5.3.

Tabela 5.3. Parâmetros para gerar as amostras de treinamento.

Amostras do treinamento	1000 amostras
Entrada máxima da planta (kg/s)	20
Entrada mínima da planta (kg/s)	0
Valor máximo do intervalo (seg.)	600
Valor mínimo do intervalo (seg.)	60
Limites dos dados da saída	Limite inferior / superior é zero / 50 pcm

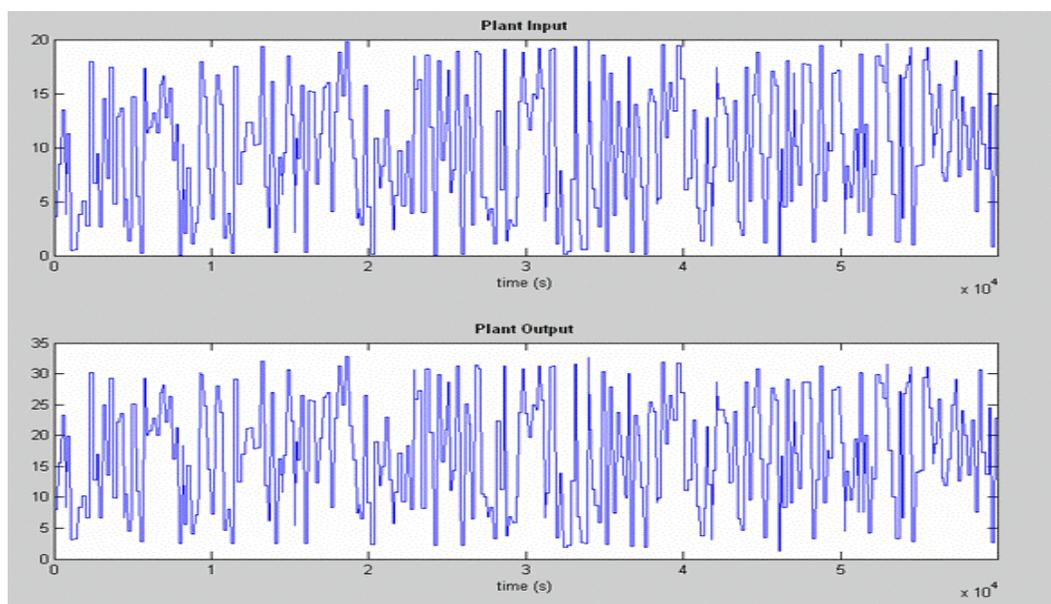


Figura 5.2. Amostras de dados para treinamento da rede.

Após a execução da aquisição dos dados para treinamento (figura 5.2), partimos então para o treinamento da rede, que é feita com as especificações de parâmetros relacionados a sua arquitetura e ao próprio treinamento, contidas nas tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4 Arquitetura da Rede

Tamanho da camada intermediária	3 neurônios
Intervalo de amostragem das entradas	60 segundos
Nº de entradas retardadas da planta	3
Nº de saídas retardadas da planta	3

Tabela 5.5 Parâmetros para treinamento

Épocas de treinamento	1000
Função de treinamento	TRAINRP / TRAINBR
Critério de parada	Nº. de épocas alcançado ou erro mínimo atingido
Conjunto de amostras usadas	Dados de treinamento, de validação e de teste

Sendo, o conjunto de dados de validação como o correspondente a pares entrada - saída que não são apresentados à rede durante o treinamento e não são parâmetros para encerrar o treinamento, ou seja, representam um conjunto totalmente novo a ser apresentado à rede para avaliação de desempenho.

TRAINRP é uma função do treinamento da rede que atualiza os valores dos pesos e dos bias com o algoritmo backpropagation (RPROP) (Anexo 2 deste trabalho).

Foi testada também como função de treinamento TRAINBR, que é uma função do treinamento da rede que atualiza os valores dos pesos e bias com algoritmo de Levenberg-Marquardt (Anexo 2 deste trabalho), (LEVENBERG, 1944) e (MARQUARDT, 1963). Esta função minimiza uma combinação de erros quadrados de pesos e, a seguir determina a combinação correta para produzir uma rede que generalize bem. O processo é chamado regularização Bayesiana.

Os resultados obtidos pelos dois métodos foram similares, já o tempo tomado pelo ultimo foi menor comparado com o tempo do primeiro. Assim, nos posteriores testes de identificação será utilizada a função TRAINBR.

Tabela 5.6. Resultado do treinamento.

Parada	Erro mínimo de validação
Épocas	207/1000
SSE* de treinamento	0,00114514
SSE de validação	8,54912e-006
SSE de teste	0,000646438

* SSE – *Square Standard Error* (Erro quadrático normalizado)

A figura 5.3 mostra claramente a evolução típica do erro de uma rede ao longo do processo de treinamento, os três sinais de erro (treinamento, validação e teste) vão quase juntos durante todo o processo. Os resultados desses erros são mostrados na tabela 5.6 acima.

Quando a partir de certo número de passos, o desempenho do conjunto de teste começa a piorar, mesmo que a do conjunto de treinamento continue decaindo, inicia-se a super especialização. É aceito que a melhor rede é aquela que fornece o menor erro no conjunto de validação e aquela que fornece o mínimo erro para o conjunto de teste.

As figuras 5.4, 5.5, e 5.6 apresentam o desempenho da rede quando comparada ao modelo Reator PWR para os sinais relacionados aos dados de treinamento, de validação e de teste respectivamente. O que se verifica é o erro existente entre a saída do Reator PWR e a saída do modelo neural quando submetido ao mesmo estímulo de entrada. O resultado do treinamento é mostrado na tabela 5.7 e a comparação dos resultados do controlador preditivo neural com o REATIV A2 e análise química manual são mostradas na tabela 5.8.

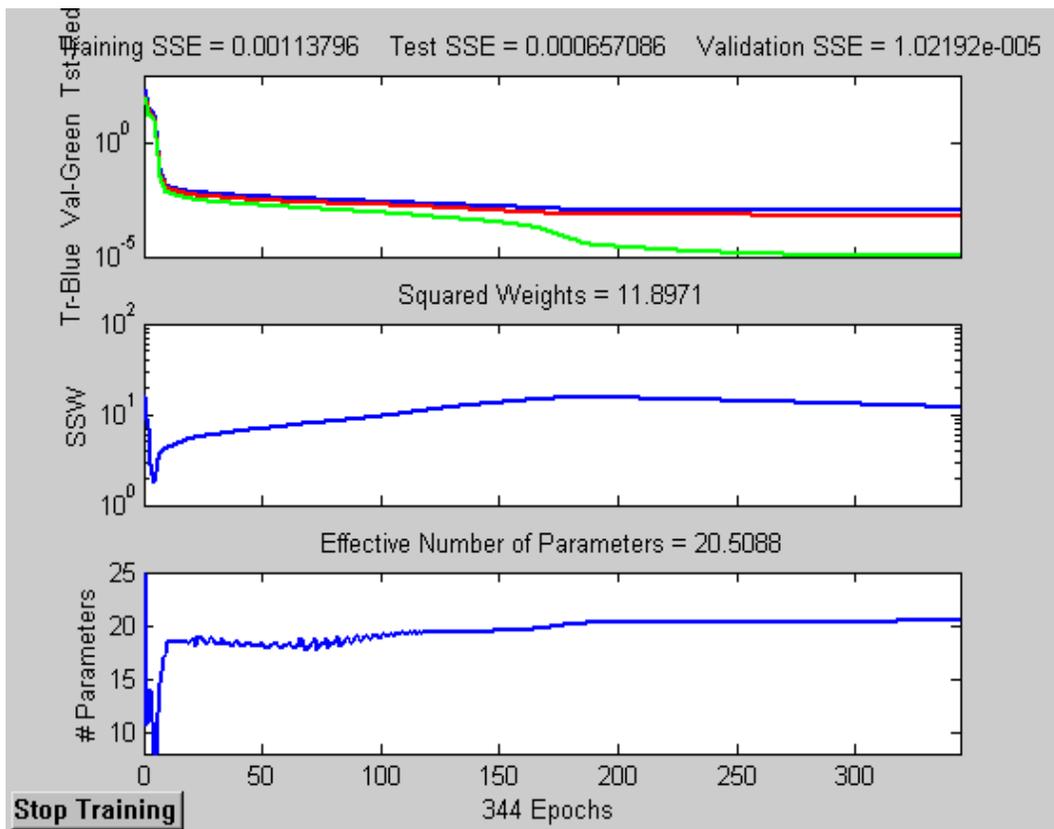


Figura 5.3 Evolução de erros no processo de treinamento

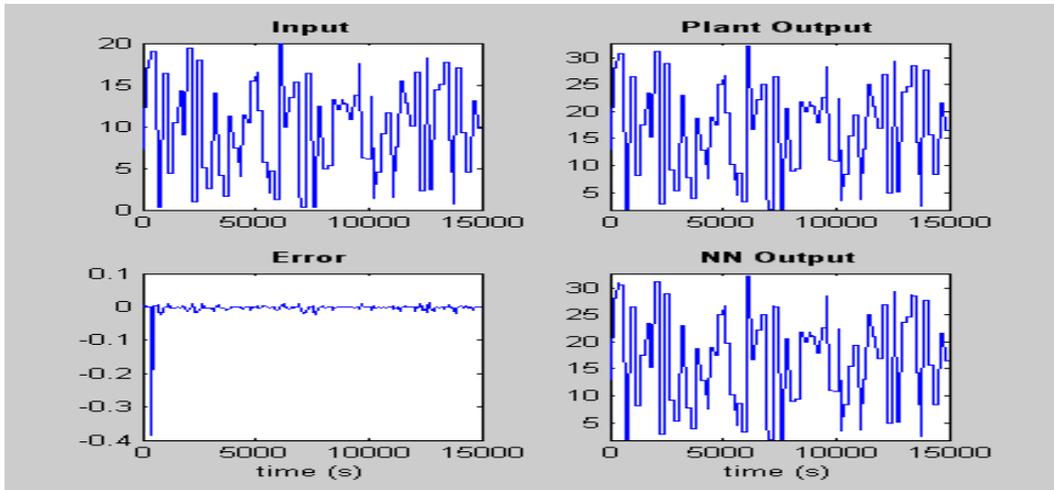


Figura 5.4 Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural

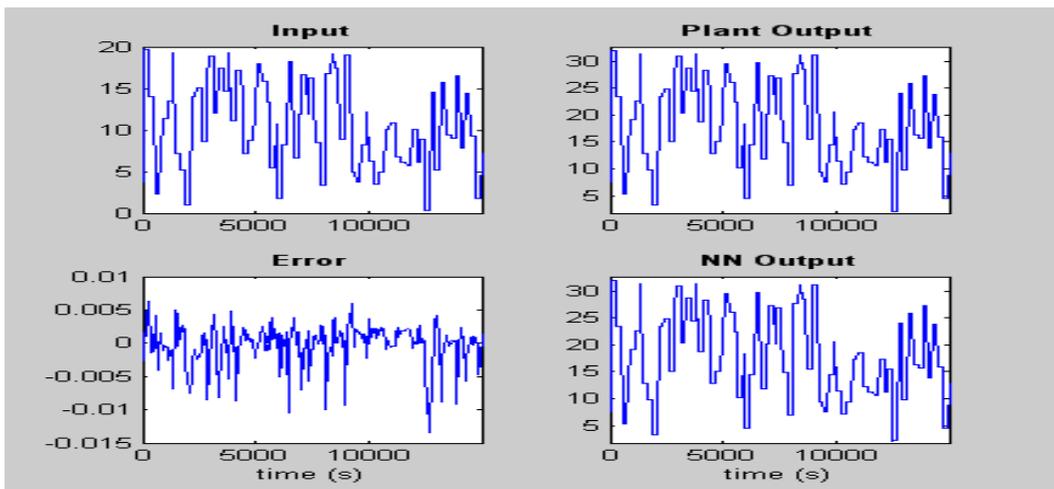


Figura 5.5 Dados de validação para o Controlador preditivo neural

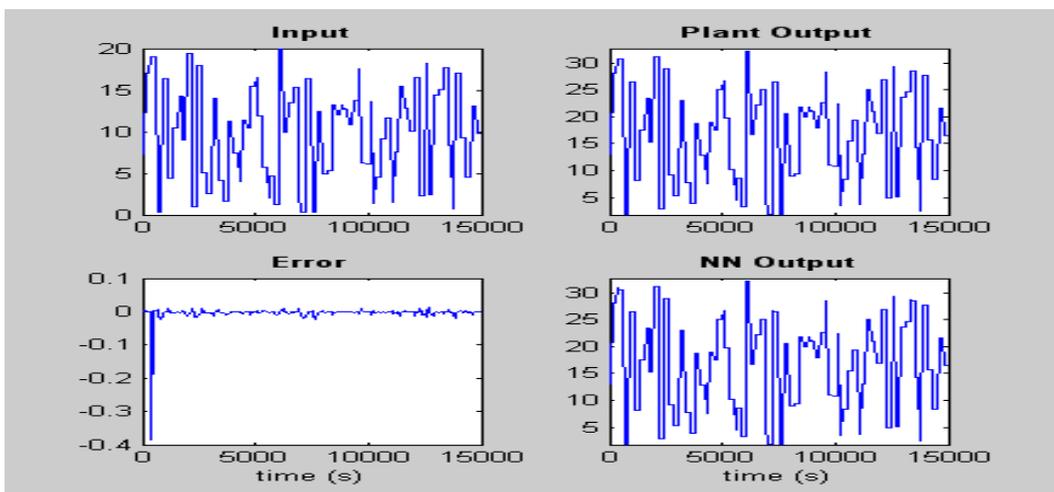


Figura 5.6 Dados de teste para o Controlador preditivo neural

Analisando a precisão do processo de treinamento da rede neural, verificou-se através das figuras 5.4, 5.5 e 5.6 que as respostas da rede às amostras de treinamento conduziram a um resultado satisfatório. O erro quadrático normalizado (SSE) (tabela 5.6) alcançou um valor bem próximo de zero tanto para os dados de treinamento, teste e validação. Uma vez configurada a rede neural, projetamos o controlador considerando os parâmetros mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 Parâmetros do Controlador

N1 (Horizonte de predição mínimo)	1
N2 (Horizonte de predição máximo)	3
Nu (Horizonte de controle)	2
ρ (fator de peso do controle)	1
α (parâmetro da busca)	0,001
Intervalo de amostragem das entradas	60
Iterações por tempo de amostra	2
Rotina da Minimização	CSRCHBAC (Algoritmo do Backtracking)

A rotina de minimização CSRCHBAC encontra o mínimo da função do desempenho no sentido da busca dx usando o algoritmo do backtracking (DENNIS, 1983).

As figuras 5.7.a,b,c, 5.8.a,b,c e 5.9.a,b,c apresentam os resultados pelo PREDCRIT em função da aplicação dos valores de referência de reatividade de 20, 25 e 30 pcm. As figuras 5.7.a,b,c, 5.8.a,b,c e 5.9.a,b,c representam, nesta ordem, a trajetória de vazão de água desmineralizada a ser seguida pelo operador do reator para alcance da criticalidade, a concentração crítica de boro estimada e a variação de reatividade proveniente da ação de controle para estes valores de referência de reatividade respectivamente. A seguir é apresentado o comportamento do controlador para cada um desses valores de referência:

5.2.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 20 pcm

- Tempo para a criticalidade pelo PREDCRIT = 11400 s = 3h 10min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 497,21 ppm

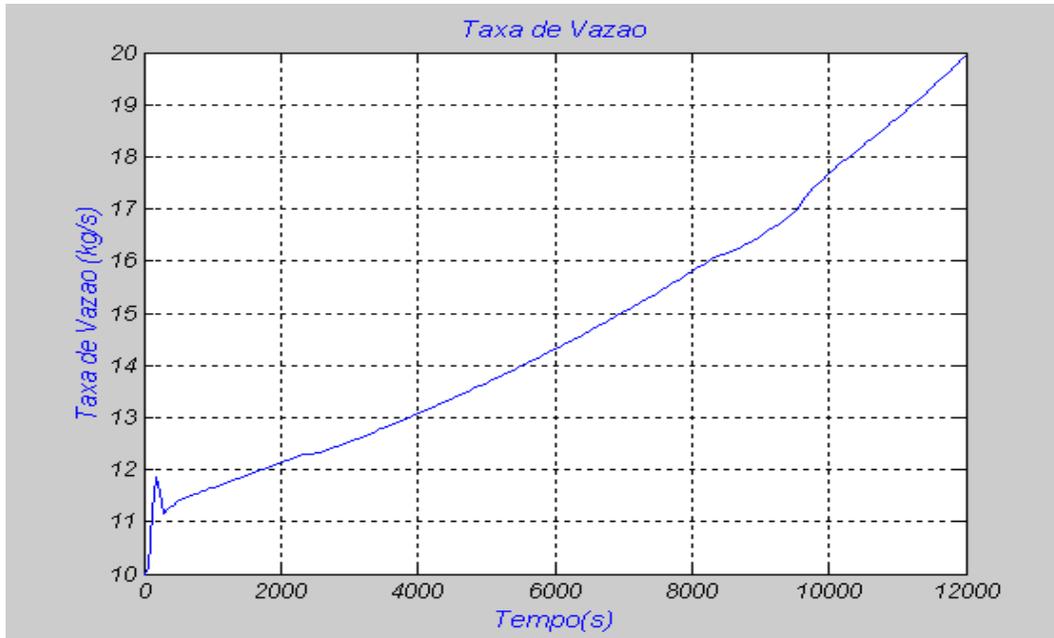


Figura 5.7.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

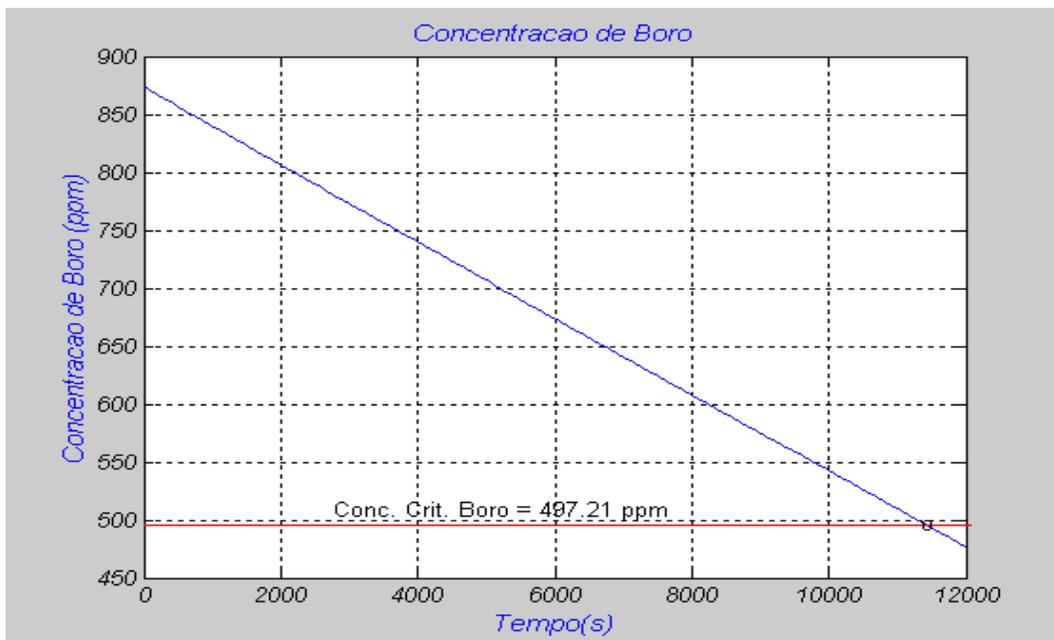


Figura 5.7.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

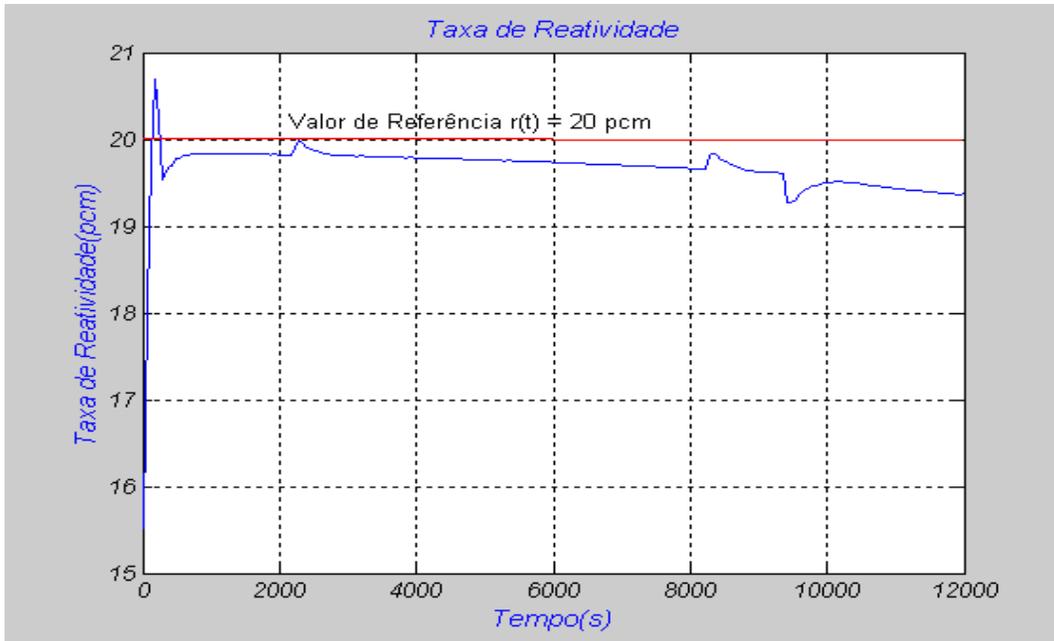


Figura 5.7.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.2.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 25 pcm

- Tempo para a criticalidade pelo PREDCRIT = 9240 s = 2h 34min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 497,21 ppm

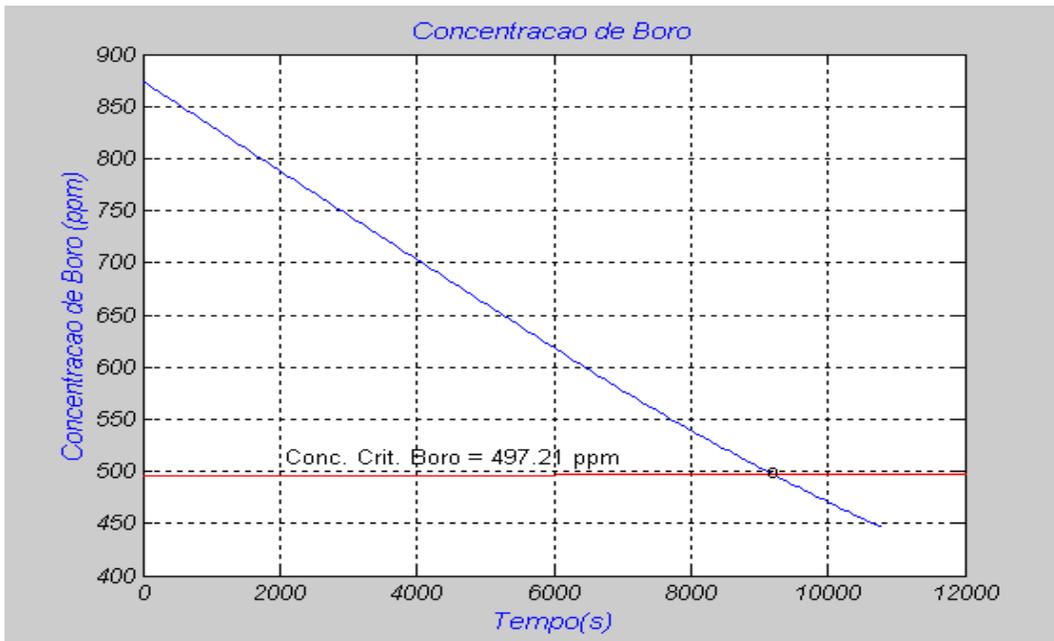


Figura 5.8.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

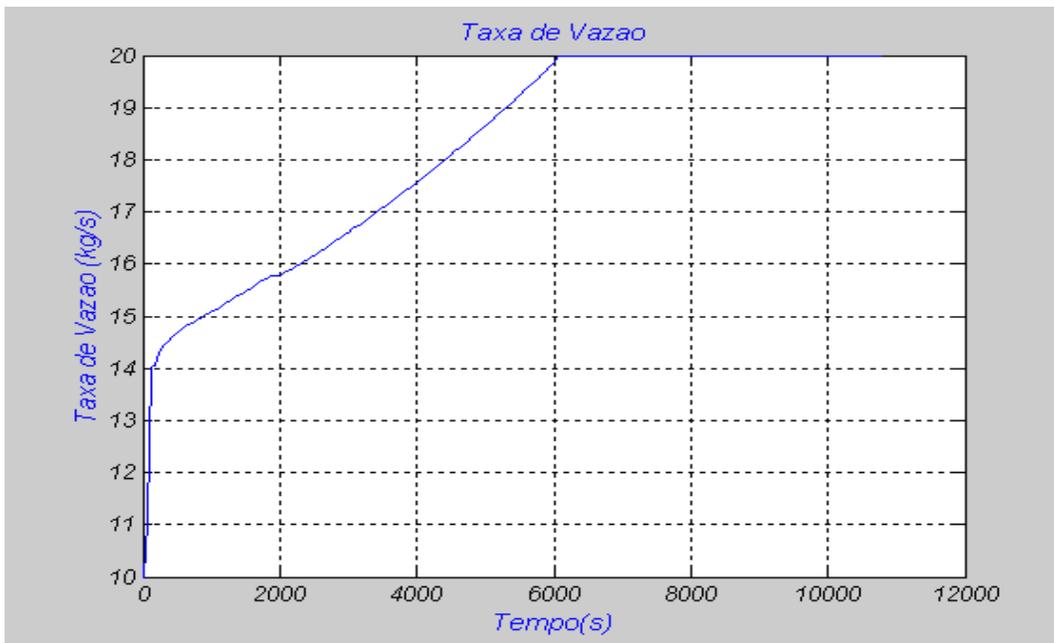


Figura 5.8.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

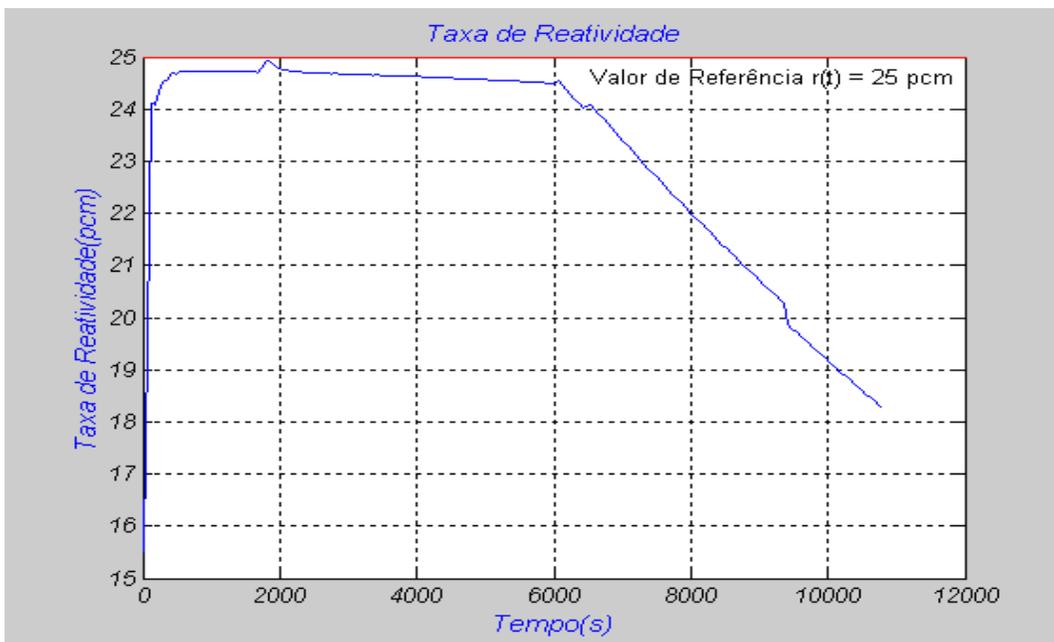


Figura 5.8.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.2.1.3 Para valor de referência de reatividade ($\Delta\rho$) = 30 pcm

- Tempo para a criticalidade pelo PREDCRIT = 8340 s = 2h 19min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 497,21 ppm

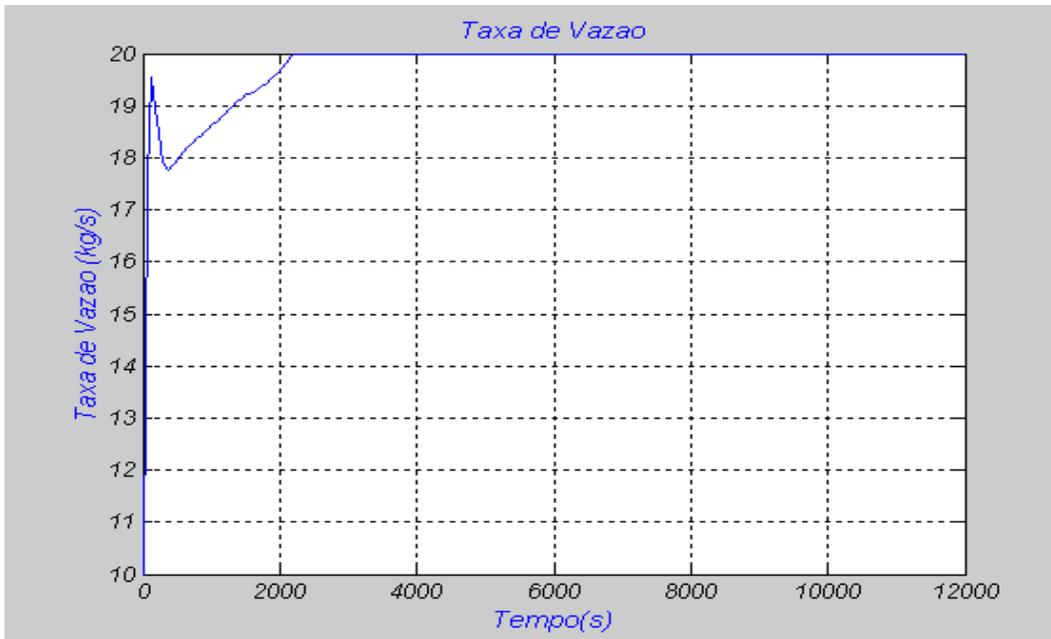


Figura 5.9.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

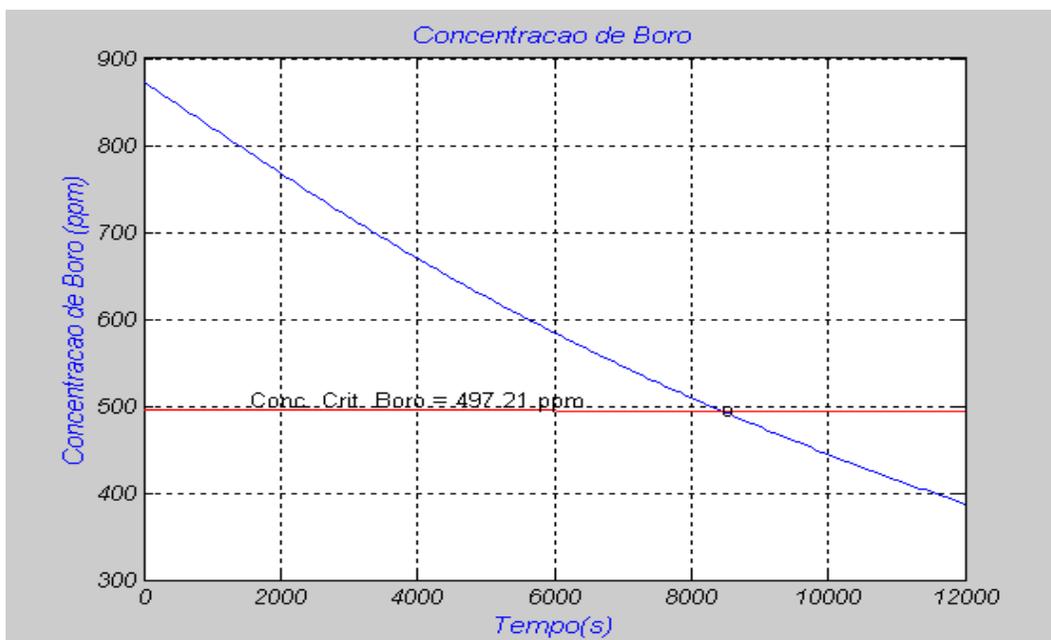


Figura 5.9.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

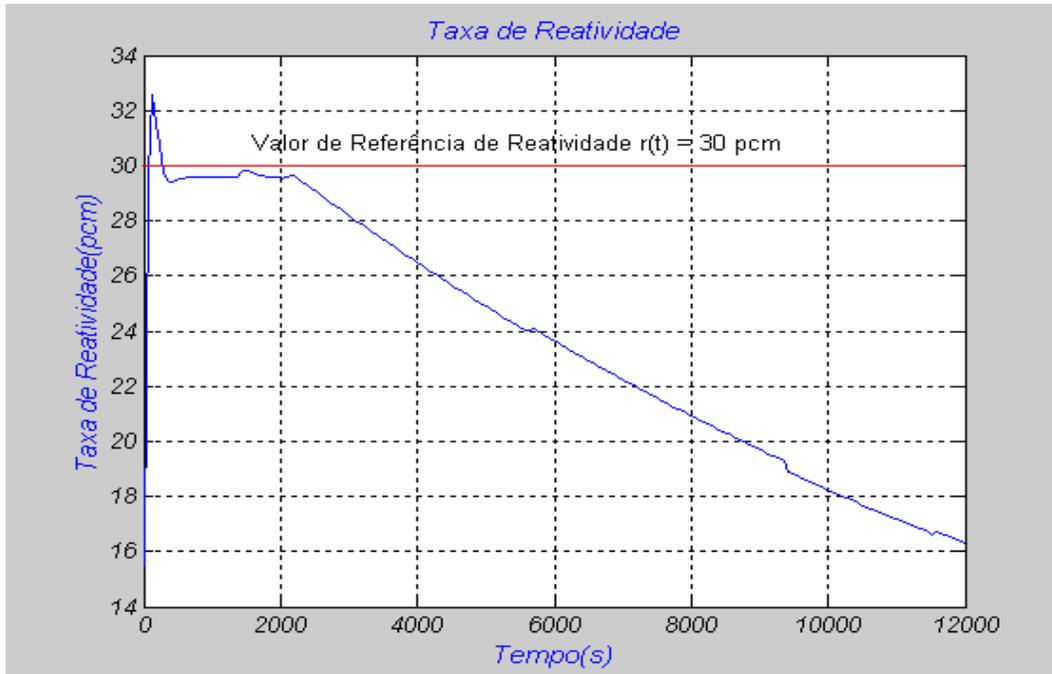


Figura 5.9.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

A fim de se ter uma melhor compreensão dos resultados, a tabela 5.8 mostra os resultados obtidos na época do retorno da usina à condição operacional e o PREDCRIT com relação ao tempo que o operador levou/ levaria para criticalizar o reator e a concentração crítica de boro estimada (CCE) pelo REATIV A2 e pelo Reator PWR. É possível Observar que o PREDCRIT gerou um resultado melhor que aquele obtida pelos procedimentos da usina na ocasião da execução do retorno da planta à operação.

Tabela 5.8 Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual do 1º caso estudado.

	REATIV A2	PREDCRIT		
Varição reatividade (pcm)	Obs 1	20	25	30
Tempo para criticalidade	2h 56min	3h10min	2h34min	2h19min
Conc. Boro.Análise química (ppm)	523	523	523	523
Conc Boro estimada (ppm)	490	497.21	497.21	497.21

Obs 1 - Este valor não é disponibilizado devido ao fato de que o REATIV A2 não ser um sistema controlador e sim um programa que faz cálculos estáticos de balanço de reatividade.

5.2.2. Comentários do Primeiro Caso

A respeito do desempenho do controlador preditivo neural para aplicação a 20 pcm de reatividade, pôde se observar que a variação da reatividade decorrente da quantidade de água injetada no Reator PWR assume um valor bem próximo do valor de referência durante todo processo de diluição do sistema primário para alcance da criticalidade do reator da Usina Nuclear de Angra II, figuras 5.7.a e 5.7.b. Isso revela que é possível desenvolver este procedimento de criticalidade a uma taxa relativa de variação de fluxo neutrônico constante - objetivo deste trabalho. As diferenças que se observam para ρ (< 1 pcm) são muito pequenas. Considerando que esta diferença seja observada a cada segundo, teríamos uma taxa de variação relativa de fluxo neutrônico de 0,001%/s. Entretanto, como o período de amostragem é de 60 s temos uma taxa de variação relativa real de $1,6 \cdot 10^{-5}$ %/s tendo em vista a diferença considerada. O ajuste do valor de referência em 20 pcm é relativo ao tempo de amostragem do controlador e do Reator PWR (60 s). Isto gera um valor de taxa de variação relativa de fluxo neutrônico de $0,3 \cdot 10^{-3}$ %/s.

Inicialmente observa-se que a taxa de vazão se eleva rapidamente logo no início da ação de controle, esta fato ocorre em função do crescimento do Xenônio no tempo, o que revela uma característica antecipatória do controlador na tentativa de manter a referência. Na seqüência o controlador tem um caráter mais linear, figuras 5.7.a e 5.7.b.

Verifica-se que a concentração de boro crítica, figura 5.7.b apresenta um erro menor quando comparada àquela obtida pelas estimativas de calculo do REATIV A2 em relação a concentração de boro obtida em análise química manual, quando da execução deste procedimento no passado.

Para o valor de referência de 20 pcm, com a utilização do PREDCRIT a criticalidade é realizada num tempo 14 minutos maior que aquele usado pelo operador/ REATIV A2 no passado, tabela 5.8. Esta situação está relacionada ao comportamento de cada operador do reator, isto é, a sua habilidade na tentativa de construir um procedimento ótimo de diluição do primário. Neste aspecto o PREDCRIT contribui bastante quando define para operador qual a trajetória de diluição a ser seguida.

Para o valor de referência de 25 pcm, o PREDCRIT consegue manter a variação de reatividade sem oscilações consideráveis por algo em torno de 75% do tempo necessário

para criticalizar o reator, após este período ocorre uma redução gradativa da variação de reatividade em função do alcance do limite de abertura das válvulas de diluição do sistema primário, figuras 5.8.a e 5.8.c. Embora não se consiga a todo o momento um valor constante da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico, isto é, manutenção constante da taxa de variação de reatividade, o resultado apresentado pode ser usado para controle sem que a segurança do reator seja afetada. Os limites estabelecidos para a taxa de variação do fluxo neutrônico (3, 5 e 7%/s) não são atingidos (ver item 4.1 deste trabalho).

Para este caso o resultado da criticalização do reator é sensivelmente melhor. O reator ficaria crítico com aplicação do PREDCRIT 22 minutos antes, o que representa um ganho razoável. Como é possível observar na tabela 5.8, a concentração de boro crítica, figura 5.8.b apresenta um erro menor quando comparada àquela obtida pelas estimativas de cálculo do REATIV A2 e em análise química manual no passado, quando da execução deste procedimento.

Para o valor de referência de 30 pcm, o PREDCRIT consegue manter a variação de reatividade sem oscilações consideráveis por algo em torno de 25% do tempo necessário para criticalizar o reator, após este período ocorre uma redução gradativa da variação de reatividade em função do alcance do limite de abertura das válvulas de diluição do sistema primário, figuras 5.9.a e 5.9.c. As observações para a concentração crítica de boro estimada, figura 5.9.b são as mesmas daquelas para 20 e 25 pcm de reatividade.

O resultado encontrado pelo PREDCRIT para criticalidade foi alcançada 37 minutos antes. O que sugere que variando-se os valores de referência é possível se estabelecer tempos melhores para execução da tarefa de criticalização do núcleo do reator de Angra II sem que os limites de segurança impostos pelo projeto ao sejam desafiados.

O tempo usado para cada uma destas três aplicações (20, 25 e 30 pcm) foi de 12000 segundos, estabelecidos no Simulink do Matlab (MATHWORKS, 2002).

Do exposto percebe-se que o PREDCRIT tem vantagens comparativas significativas relativas ao procedimento hoje adotado para criticalizar o reator de Angra II com a utilização do REATIV A2. O estabelecimento de uma trajetória de diluição do sistema primário com vista a manutenção da taxa de variação de reatividade, contribui diretamente para manutenção da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico, além de uniformizar as ações do operador. Com o PREDCRIT é possível saber como será o

comportamento das variáveis envolvidas no processo de criticalização do reator em qualquer instante de tempo.

5.3. Segundo caso – Desarme da Usina em 11/12/2007

Este caso foi testado para os seguintes valores de referência de variação de reatividade $r(t)$ de 9, 10 e 11 pcm. O desempenho do controlador é mostrado em gráficos de vazão de água desmineralizada (kg/s), de concentração de boro (ppm) e de variação de reatividade (pcm) em função do tempo (s), figuras 5.15.a,b,c, 5.16.a,b,c e 5.17.a,b,c. São feitos comentários sobre o comportamento do PREDCRIT para cada um dos valores de referência de reatividade aplicados, bem como entre os resultados obtidos pela aplicação deste controlador e aqueles observados pelo uso do REATIV A2 no passado. Os dados da usina são descritos nas tabelas 5.9 e 5.10 a seguir.

Tabela 5.9 Condições da Usina no Desligamento – Caso 2

Trip da Usina de Angra II	11/11/2007 05:16h
Queima do ciclo	6900,7 MWD/TMU
Profundidade de inserção Banco L	11 cm
Temperatura Média do SRR	308.4 °C
Potência do Reator	100%
Profundidade de inserção Banco D	27 cm
Seqüência de movimentação do Banco D	1
Estratégia de Inserção do Banco D	01
Concentração de Boro	485 ppm

Tabela 5.10 Condições da Usina na Criticalidade – Caso 2

Retorno da Usina de Angra II	11/11/2007 10:00 h
Tempo do Reator desligado	4:44 h
Profundidade de inserção Banco L	11 cm
Temperatura Média do SRR	295.2°C
Potência do Reator	0 %
Profundidade de inserção Banco D	360 cm
Seqüência de movimentação do Banco D	1
Estratégia de Inserção do Banco D	02
Concentração de Boro	485 ppm

5.3.1. Controle Preditivo Neural

O ajuste para o controlador preditivo neural para este caso tem as mesmas especificações e considerações das tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.7 do primeiro caso estudado. Já os dados da planta foram dispostos nas tabelas 5.9 e 5.10. As amostras de dados para treinamento da rede neural recursiva são mostradas na figura 5.10, a evolução dos erros no processo de treinamento são mostradas na figura 5.11. O que se verifica é o erro existente entre a saída do Reator PWR e a saída do modelo neural quando submetido ao mesmo estímulo de entrada. O resultado do treinamento é mostrado na tabela 5.11 e a comparação dos resultados do controlador preditivo neural com o REATIV A2 e análise química manual são mostradas na tabela 5.12.

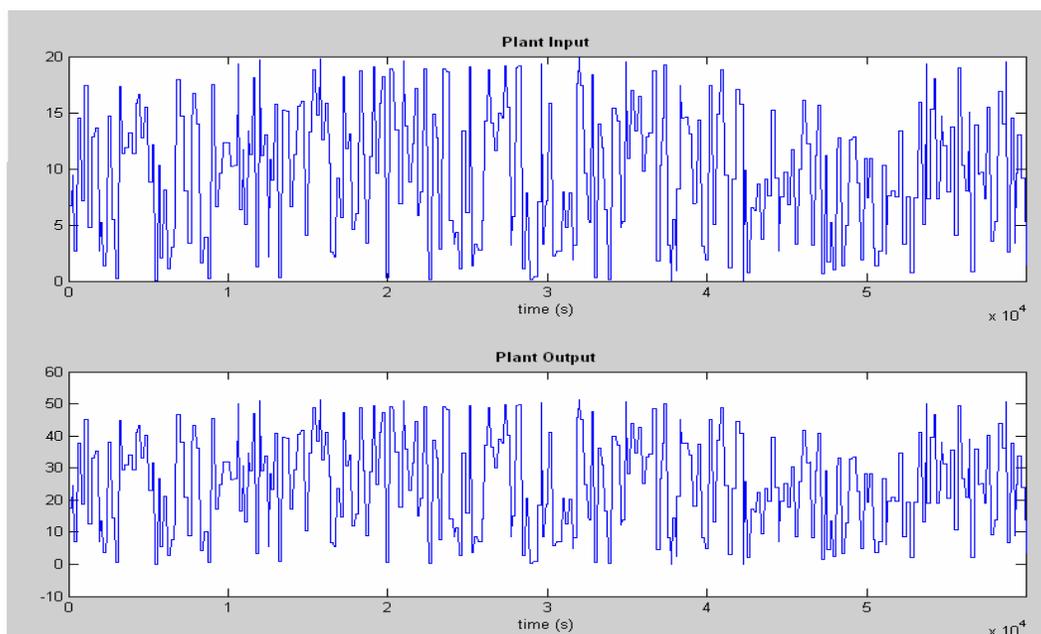


Figura 5.10. Amostras de dados para treinamento da rede.

Tabela 5.11. Resultado do treinamento.

Parada	Erro mínimo de validação
Épocas	1000/1000
SSE* de treinamento	1,03723e-11
SSE de validação	7,40336e-12
SSE de teste	8,91031e-12

*SSE – Square Standard Error (Erro quadrático normalizado)

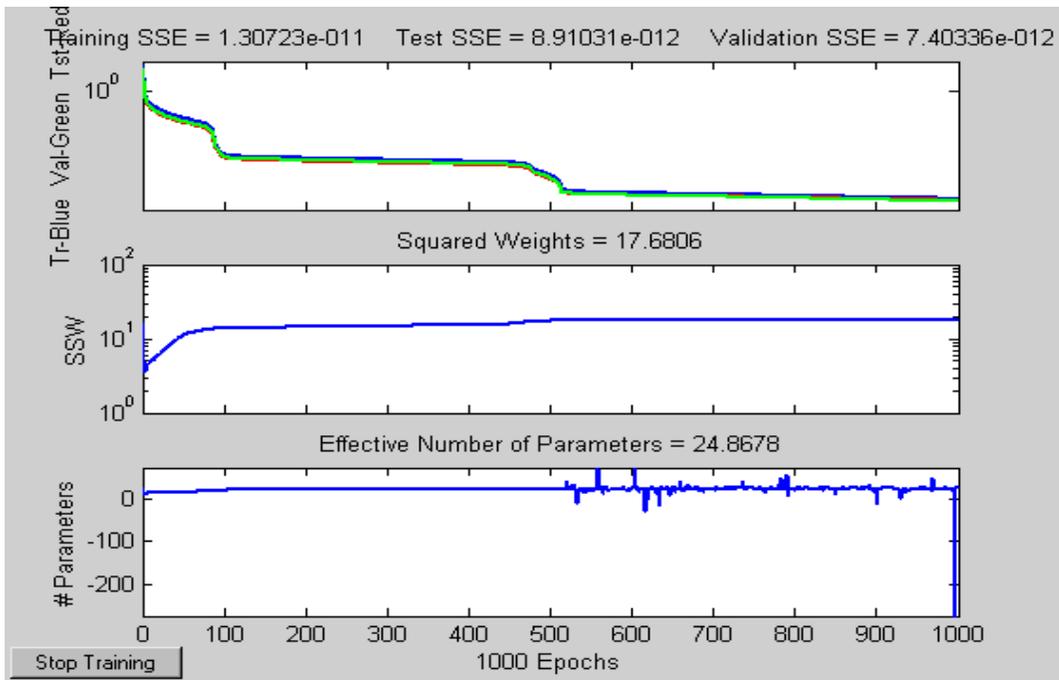


Figura 5.11 Evolução de erros no processo de treinamento

As figuras 5.12, 5.13, e 5.14 apresentam o desempenho da rede quando comparada ao modelo Reator PWR para os sinais relacionados aos dados de treinamento, de validação e de teste respectivamente. O que se verifica é o erro existente entre a saída do Reator PWR e a saída do modelo neural quando submetido ao mesmo estímulo de entrada.

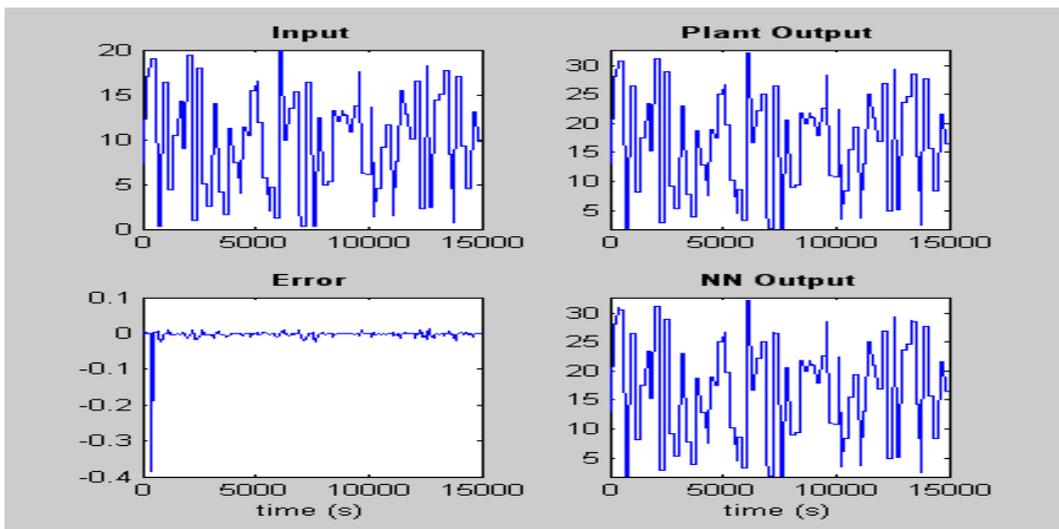


Figura 5.12 Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural

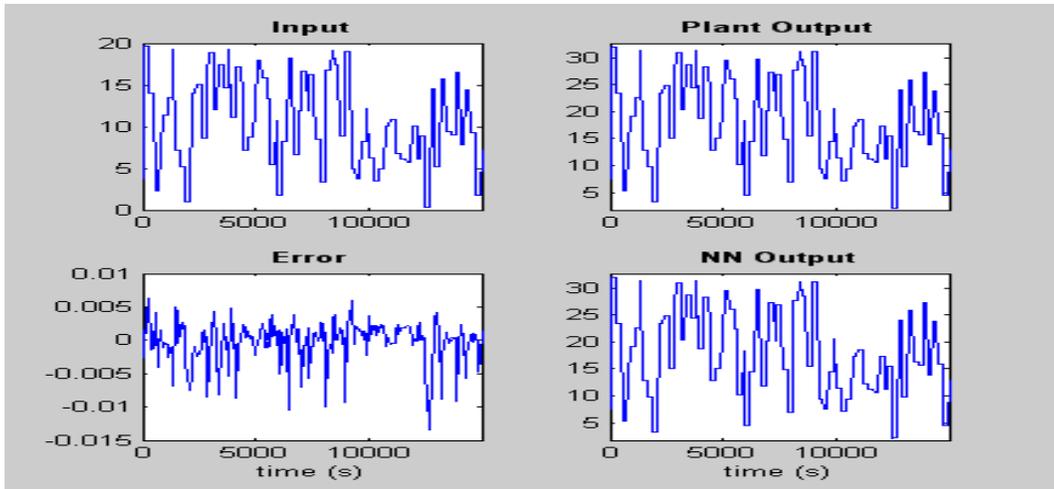


Figura 5.13 Dados de validação para o Controlador preditivo neural

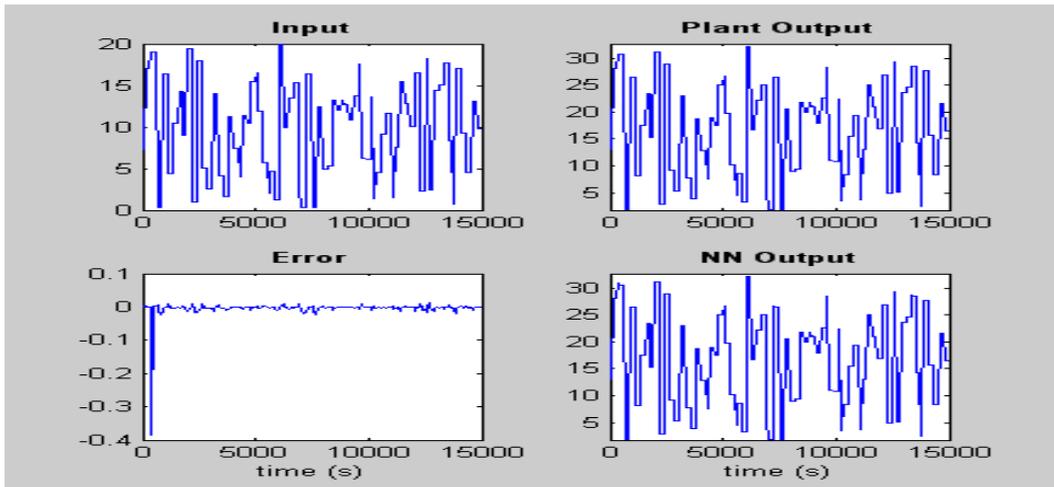


Figura 5.14 Dados de teste para o Controlador preditivo neural

Analisando a precisão do processo de treinamento da rede neural (figuras 5.12, 5.13 e 5.14), verificou-se que as respostas da rede as amostras de treinamento conduziram a um resultado satisfatório. O erro quadrático normalizado (SSE) (tabela 5.11 acima) alcançou um valor próximo de zero tanto para os dados de treinamento, teste e validação.

As figuras 5.15.a,b,c, 5.16.a,b,c e 5.17.a,b,c representam, nesta ordem, a trajetória de vazão de água desmineralizada a ser seguida pelo operador do reator para alcance da criticidade, a concentração crítica de boro estimada e a variação de reatividade proveniente da ação de controle para os valores de referência de reatividade de 9, 10 e 11 pcm. A seguir é apresentado o comportamento do controlador para cada um desses valores de referência:

5.3.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 9 pcm

- Tempo para a criticalidade = 1920s = 32min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 441,21 ppm

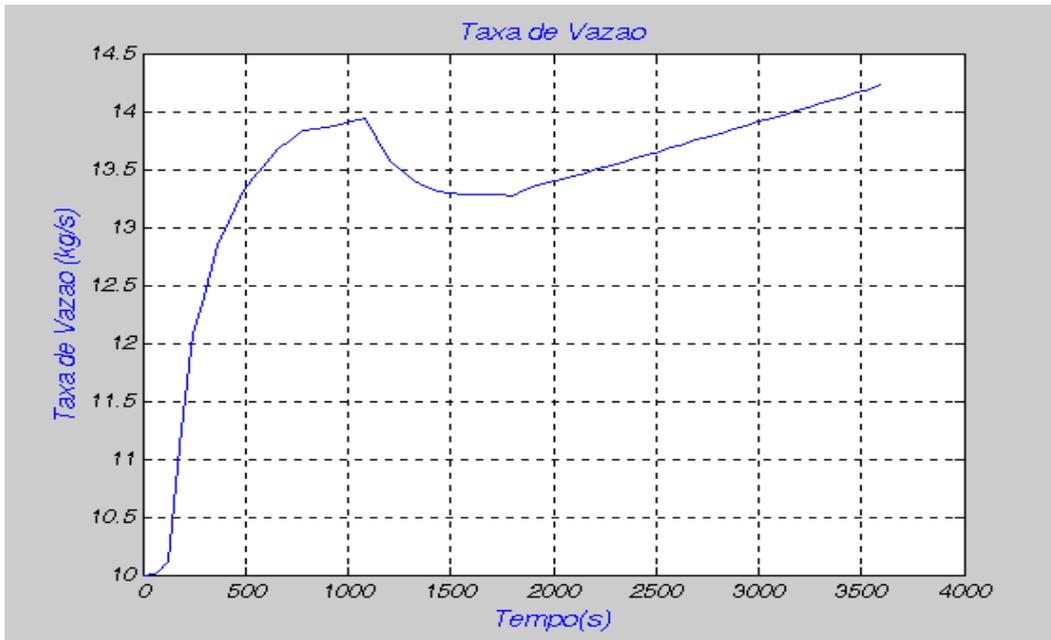


Figura 5.15.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

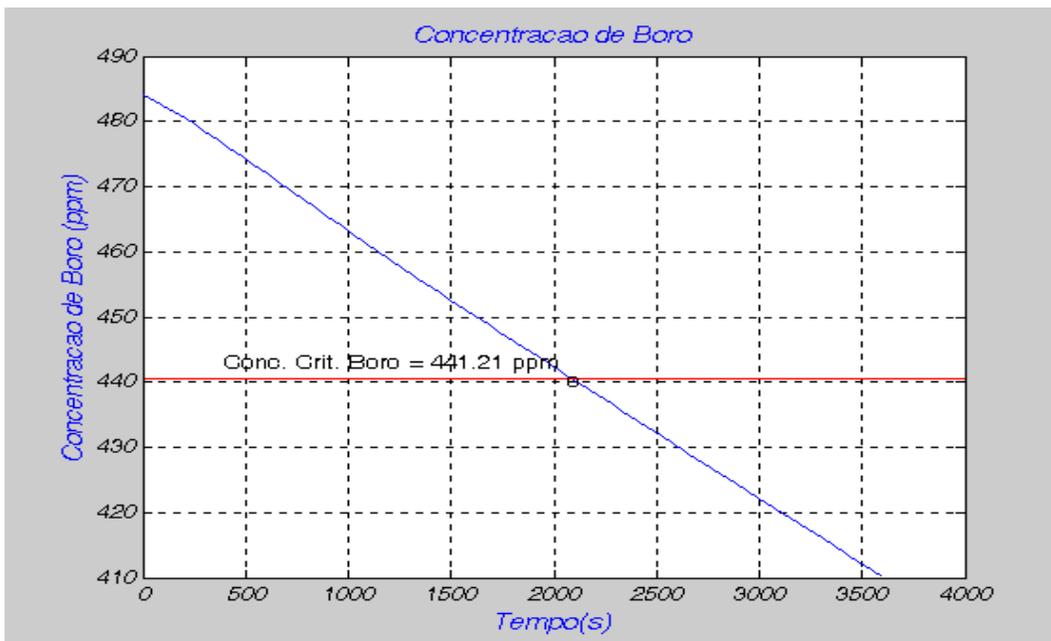


Figura 5.15.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

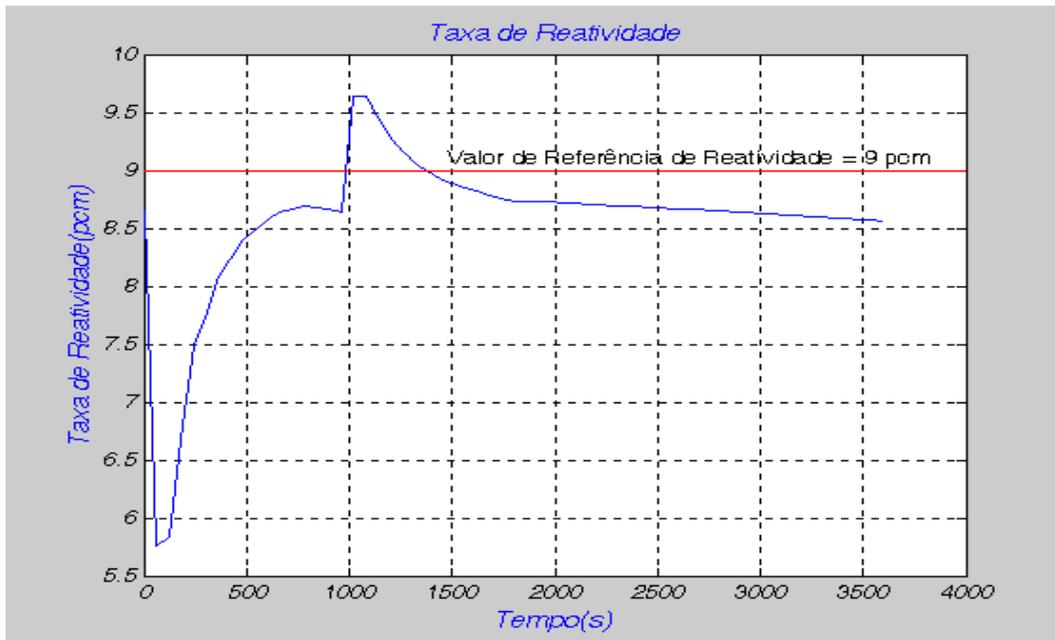


Figura 5.15.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.3.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 10 pcm

- Tempo para a criticalidade = 1920s = 32min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 441,21 ppm

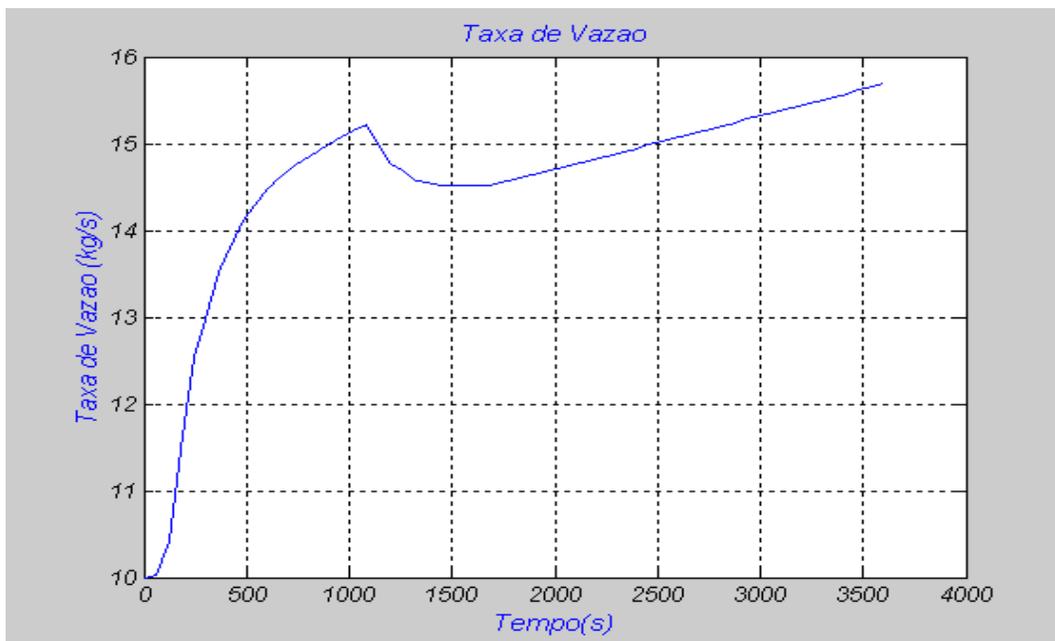


Figura 5.16.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

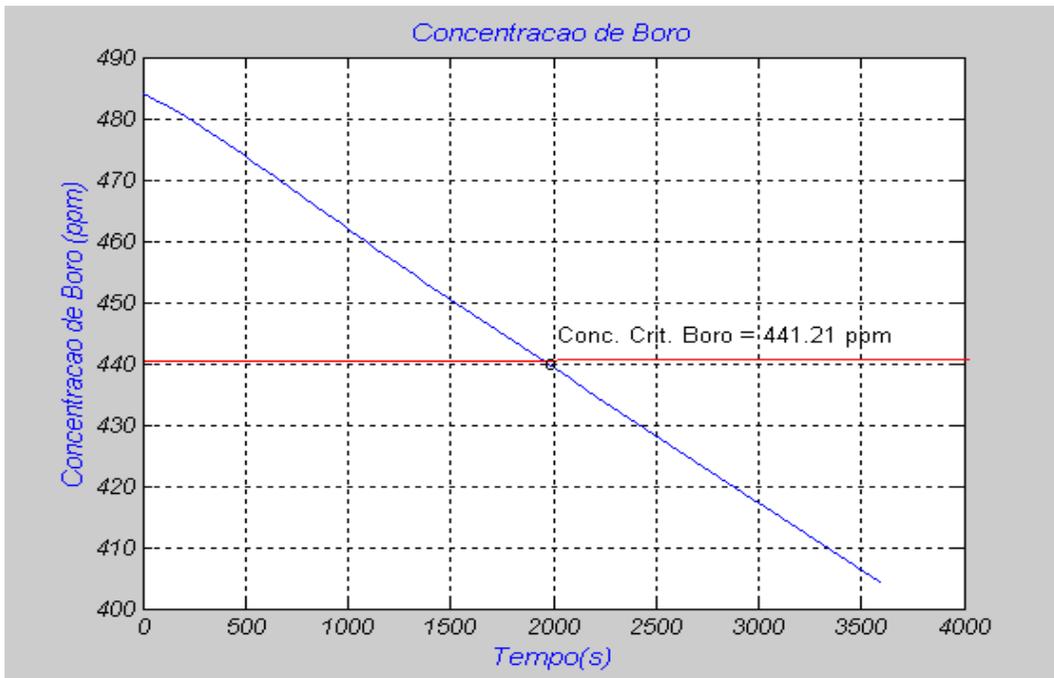


Figura 5.16.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

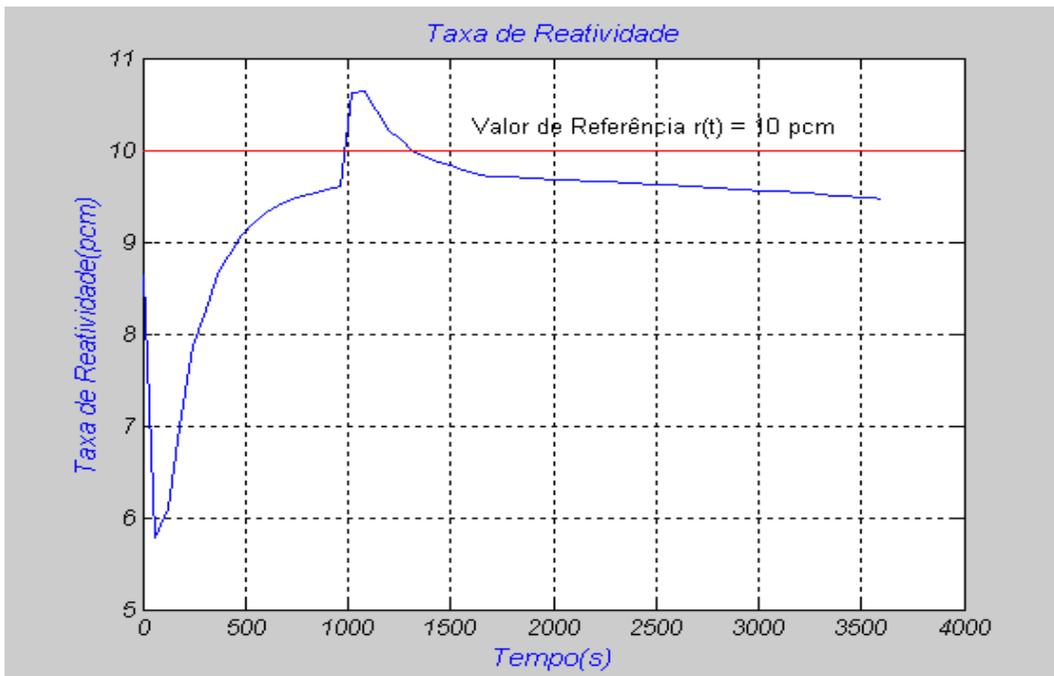


Figura 5.16.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.3.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 11 pcm

- Tempo para a criticalidade = 1920s = 32min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 441,21 ppm.

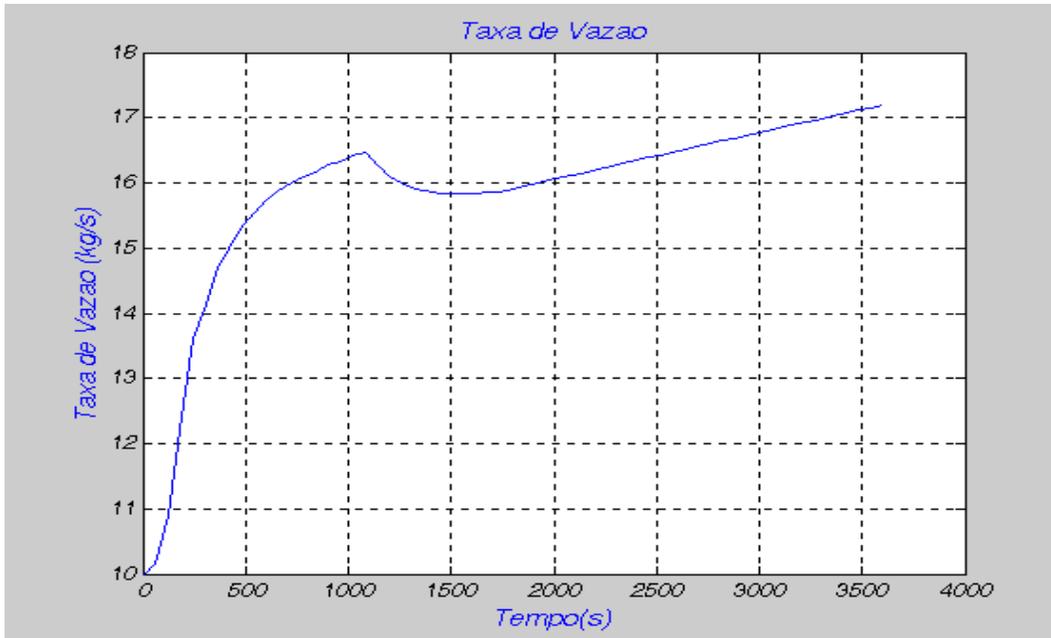


Figura 5.17.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

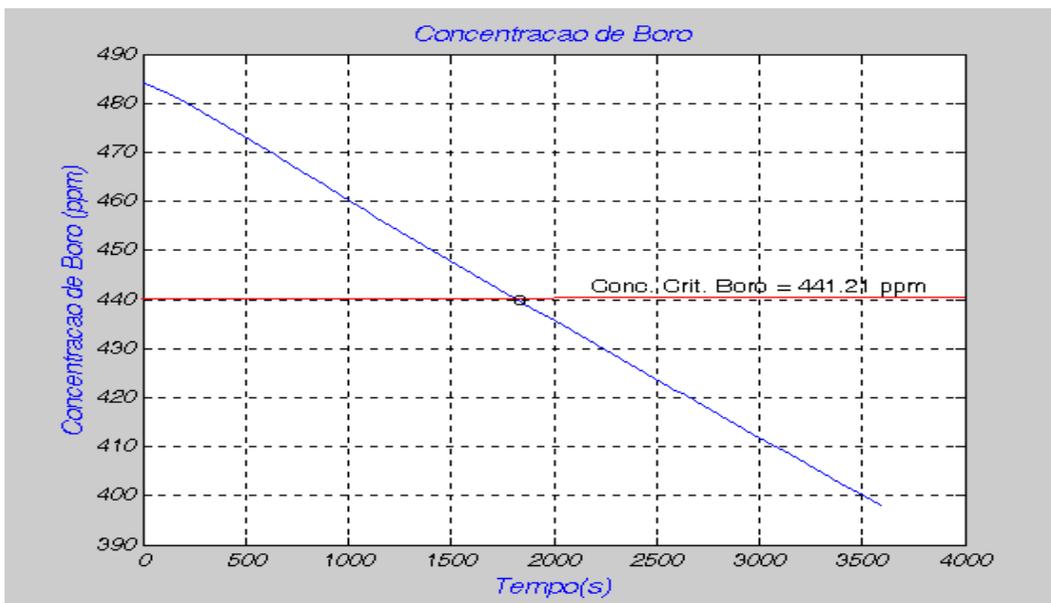


Figura 5.17.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

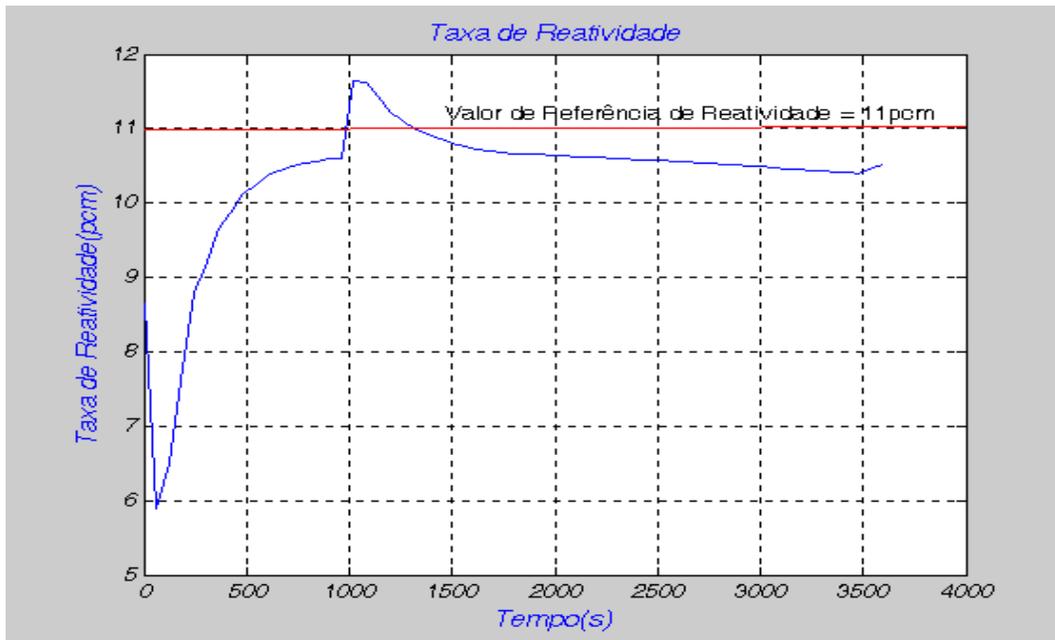


Figura 5.17.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

A fim de se ter uma melhor compreensão dos resultados, a tabela 5.12 mostra a comparação entre os resultados obtidos no REATIV A2 e o PREDCRIT com relação ao tempo que o operador leva para criticalizar o reator e a concentração crítica de boro estima (CCE). Nesta tabela também é possível comparar os valores da concentração de boro alcançada por esses sistemas e a análise manual da química da usina com referência as tolerâncias permitidas pelas Especificações Técnicas (FSAR, 2007).

Tabela 5.12 Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.

	REATIV A2	PREDCRIT		
Varição reatividade (pcm)	*	9	10	11
Tempo para criticalidade	36min	35min	32min	30min
Conc. Boro.Análise química (ppm)	461	461	461	461
Conc Boro estimada (ppm)	443	441.21	441.21	441.21

Obs 1 - Este valor não é disponibilizado devido ao fato de que o REATIV A2 não ser um sistema controlador e sim um programa que faz cálculos estáticos de balanço de reatividade.

5.3.2 Comentários do Segundo Caso

A respeito do desempenho do controlador preditivo neural para aplicação de 9, 10 e 11 *pcm* de reatividade, pôde-se observar que a variação da reatividade decorrente da quantidade de água injetada no Reator PWR assume um valor bem próximo do valor de referência durante todo processo de diluição do sistema primário para alcance da criticalidade do reator de Angra II, figuras 5.15.a e 5.15.c, 5.16.a e 5.16.c e 5.17.a e 5.17.c, nesta ordem. As oscilações que se observam (em torno de 0.5 *pcm*) são desprezíveis.

Para estes casos, com a utilização do PREDCRIT a criticalidade é realizada num tempo menor que aquele usado pelo operador/ REATIV A2 no passado, tabela 5.12.

Verifica-se que a concentração de boro crítica, figura 5.15.b, 5.16.b e 5.17.b apresenta um erro maior, porém desprezível ($< 2\text{ppm}$), quando comparada àquela obtida pelas estimativas de cálculo do REATIV A2 e em análise química manual no passado, quando da execução deste procedimento.

O tempo usado para cada uma destas três aplicações (9, 10 e 11 *pcm*) foi de 3600 segundos, estabelecidos no Simulink do Matlab (MATHWORKS, 2002).

Para estes casos o resultado da criticalização do reator é sensivelmente melhor. O reator ficaria crítico com aplicação do PREDCRIT um pouco antes do REATIV A2, o que representa um ganho razoável, porém o fator mais importante é dotar o operador de uma trajetória de criticalidade.

5.4. Terceiro caso – Desarme da Usina em 11/05/2007

Este caso foi testado para valores de referência de variação de reatividade, $r(t)$ de 25, 30 e 35 *pcm*. O desempenho do controlador a esta entrada é mostrado em gráfico de vazão de água desmineralizada (*kg/s*), de concentração de boro (*ppm*) e de variação de reatividade (*pcm*) em função do tempo (s), figuras 5.23.a, b, c, 5.24. a, b, c e 5.25. a, b, c. Ao final deste item, é disponibilizada a tabela 5.16 que faz uma comparação dos valores de concentração crítica de boro (CCE) do REATIV A2, PREDCRIT e análise manual do setor de química da usina. Os dados da usina são descritos na tabela 5.13 e na tabela 5.14.

Tabela 5.13 Condições da Usina no Desligamento – Caso 3

Trip da Usina de Angra II	11/05/2007 06:00h
Queima do ciclo	582,8 MWD/TMU
Profundidade de inserção Banco L	27 cm
Temperatura Média do SRR	308.5 °C
Potência do Reator	82%
Profundidade de inserção Banco D	58cm
Seqüência de movimentação do Banco D	2
Estratégia de Inserção do Banco D	01
Concentração de Boro	1054 ppm

Tabela 5.14 Condições da Usina na Criticalidade – Caso 3

Trip da Usina de Angra II	18/05/2007 08:30 h
Tempo do Reator desligado	170:30h
Profundidade de inserção Banco L	27cm
Temperatura Média do SRR	295°C
Potência do Reator	0 %
Profundidade de inserção Banco D	360 cm
Seqüência de movimentação do Banco D	2
Estratégia de Inserção do Banco D	02
Concentração de Boro	1622 ppm

5.4.1. Controle Preditivo Neural

O ajuste para o controlador preditivo neural para este caso tem as mesmas especificações e considerações das tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.7 do primeiro caso estudado. Já os dados da planta foram dispostos nas tabelas 5.13 e 5.14. As amostras de dados para treinamento da rede neural recursiva são mostradas na figura 5.18, a evolução dos erros no processo de treinamento são mostradas na figura 5.19. O que se verifica é o erro existente entre a saída do Reator PWR e a saída do modelo neural quando submetido ao mesmo estímulo de entrada. O resultado do treinamento é mostrado na tabela 5.15 e a comparação dos resultados do controlador preditivo neural com o REATIV A2 e análise química manual são mostradas na tabela 5.16.

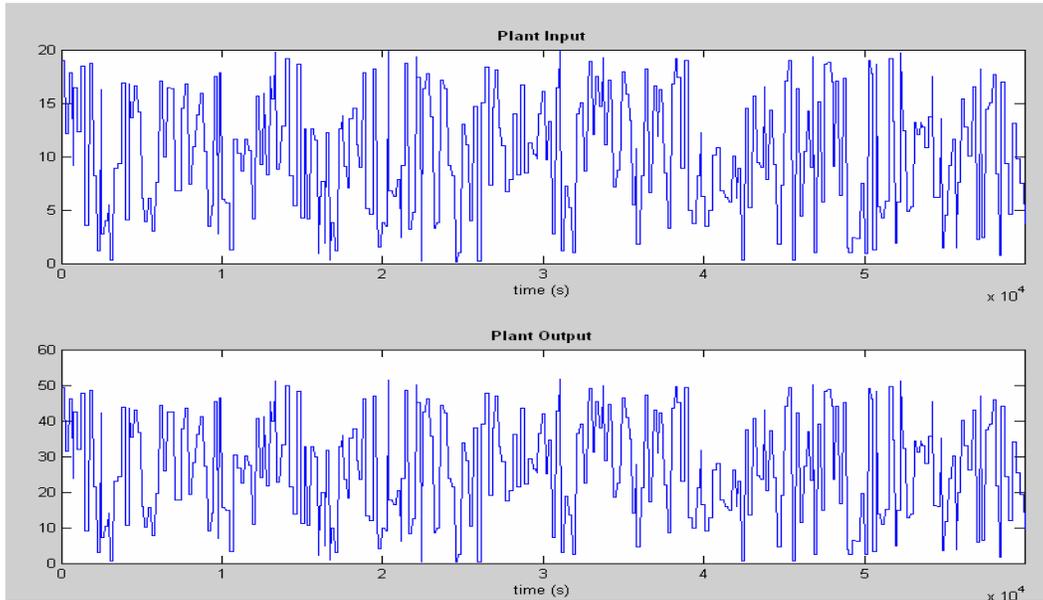


Figura 5.18. Amostras de dados para treinamento da rede.

Tabela 5.15. Resultado do treinamento.

Parada	Erro mínimo de validação
Épocas	207/1000
SSE* de treinamento	4,20883e-008
SSE de validação	4,02137e-008
SSE de teste	7,2779e-008

*SSE – Square Standard Error (Erro quadrático normalizado)

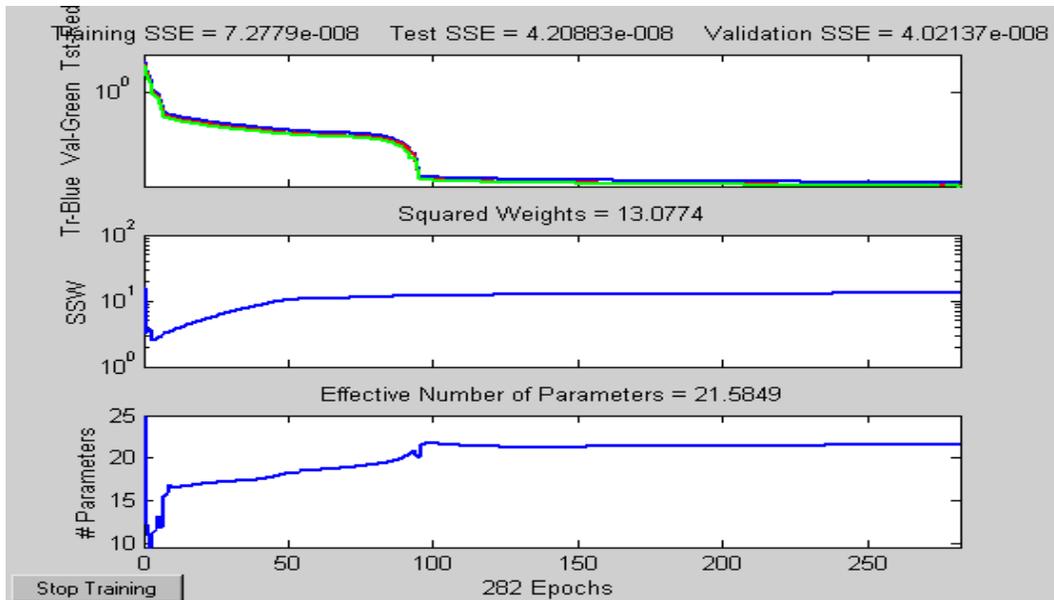


Figura 5.19 Evolução de erros no processo de treinamento

As figuras 5.20, 5.21, e 5.22 apresentam o desempenho da rede quando comparada ao modelo Reator PWR para os sinais relacionados aos dados de treinamento, de validação e de teste respectivamente. O que se verifica é o erro existente entre a saída do Reator PWR e a saída do modelo neural quando submetido ao mesmo estímulo de entrada. O resultado do treinamento é mostrado na tabela 5.15 e a comparação dos resultados do controlador preditivo neural com o REATIV A2 e análise química manual são mostradas na tabela 5.16.

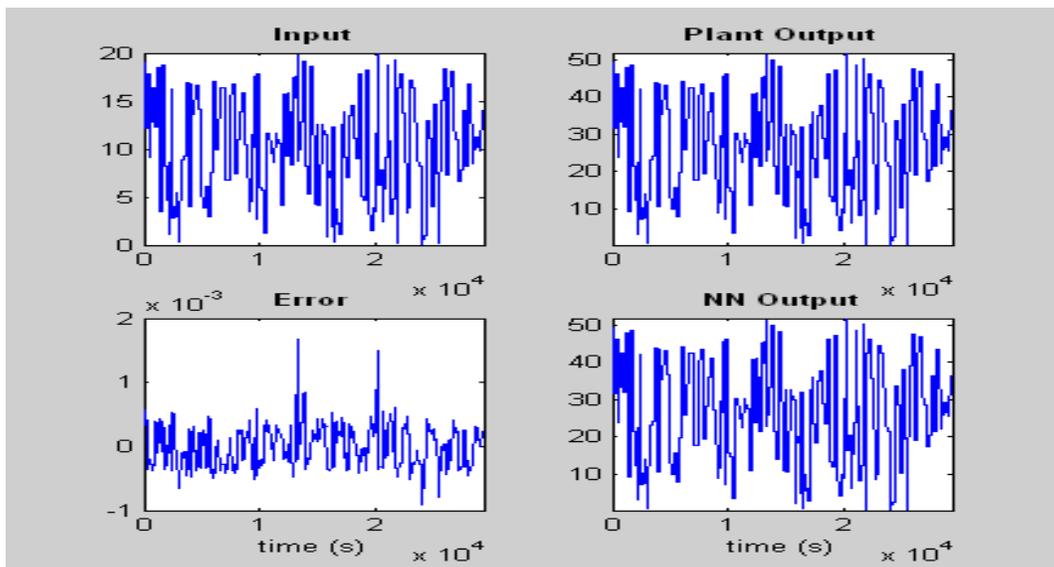


Figura 5.20 Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural

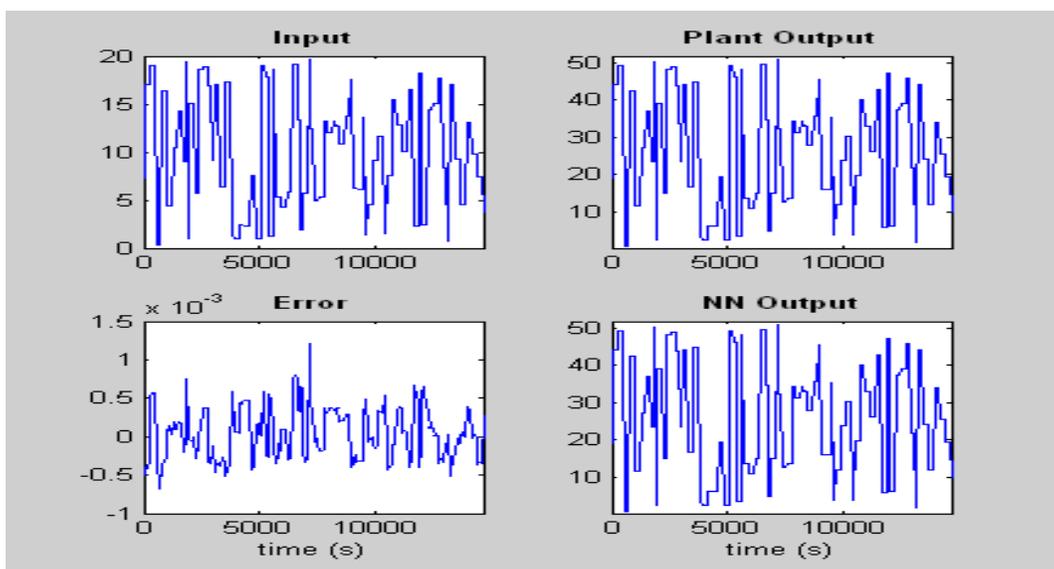


Figura 5.21 Dados de validação para o Controlador preditivo neural

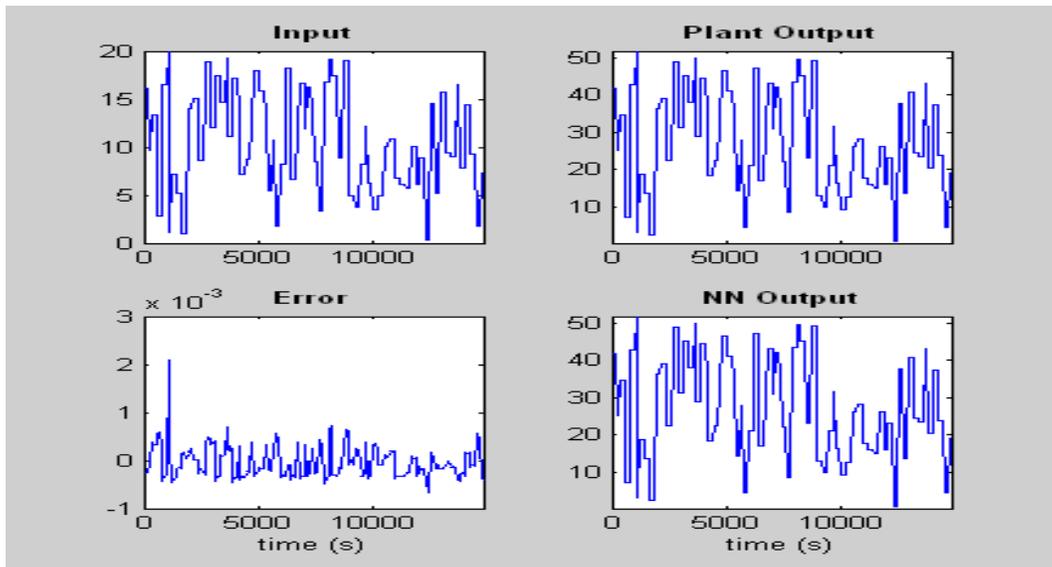


Figura 5.22 Dados de teste para o Controlador preditivo neural

Analisando a precisão do processo de treinamento da rede neural, verificou-se através das figuras 5.20, 5.21 e 5.22 que as respostas da rede as amostras de treinamento conduziram a um resultado satisfatório. O erro quadrático normalizado (SSE) (tabela 5.15 acima) alcançou um valor bem próximo de zero tanto para os dados de treinamento, teste e validação.

As figuras 5.23.a,b,c, 5.24.a,b,c e 5.25.a,b,c apresentam os resultados pelo PREDCRIT em função da aplicação dos valores de referência de reatividade de 25, 30 e 35 pcm, respectivamente. Estas figuras representam, nesta ordem, a trajetória de vazão de água desmineralizada a ser seguida pelo operador do reator para alcance da criticalidade, a concentração crítica de boro estimada e a variação de reatividade proveniente da ação de controle para os valores de referência de reatividade de 25, 30 e 35 pcm. A seguir é apresentado o comportamento do controlador para cada um desses valores de referência:

5.4.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 25 pcm

- Tempo para a criticalidade = 3420s = 57min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 1448,6 ppm

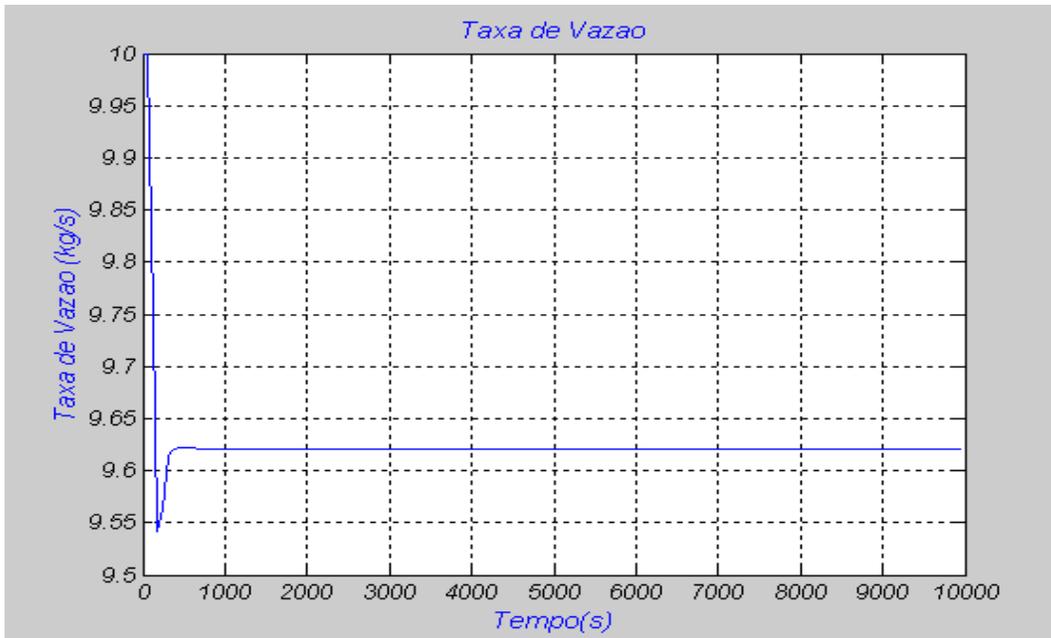


Figura 5.23.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

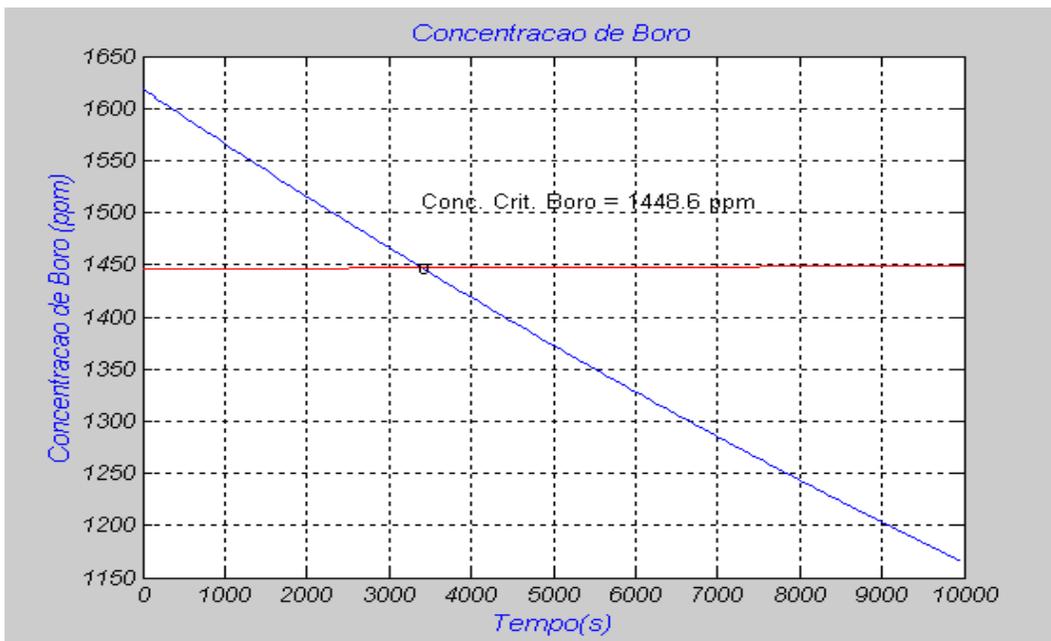


Figura 5.23.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

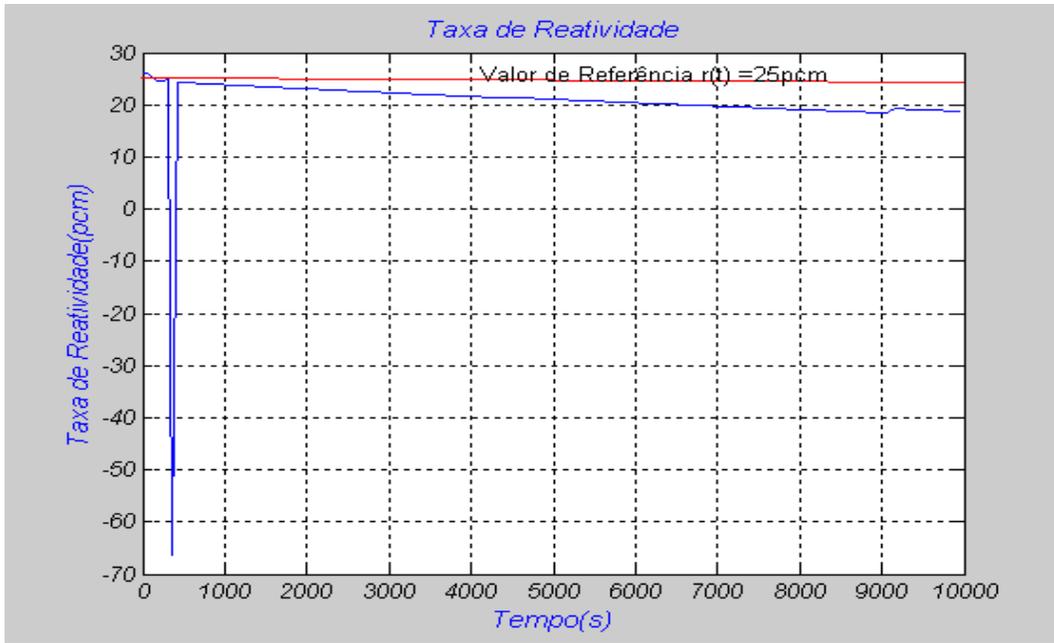


Figura 5.23.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.4.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 30 pcm

- Tempo para a criticidade = 2880s = 48min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticidade = 1448,6 ppm

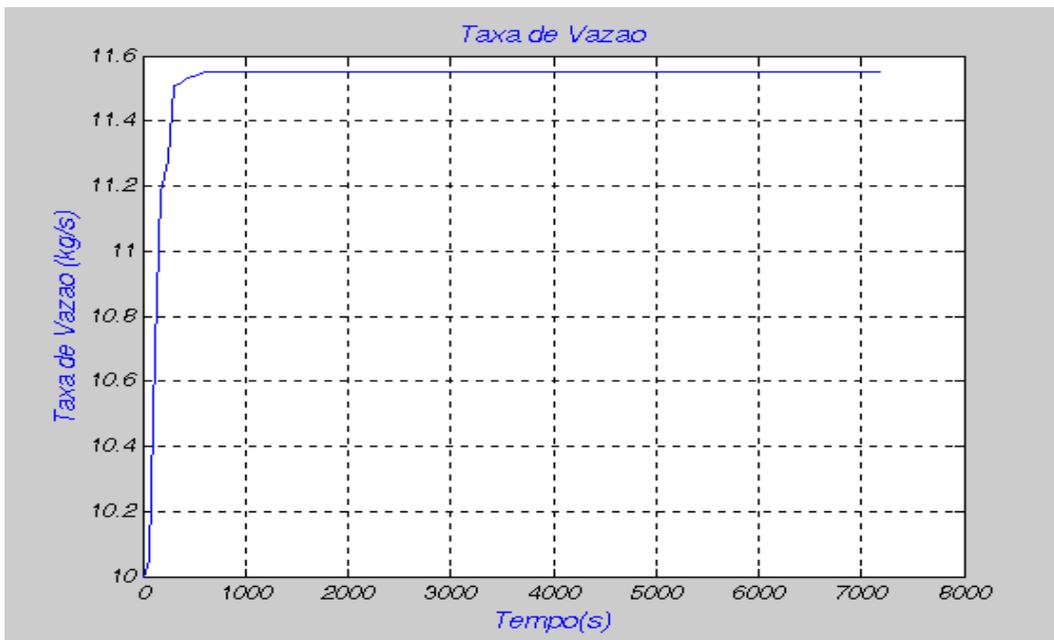


Figura 5.24.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

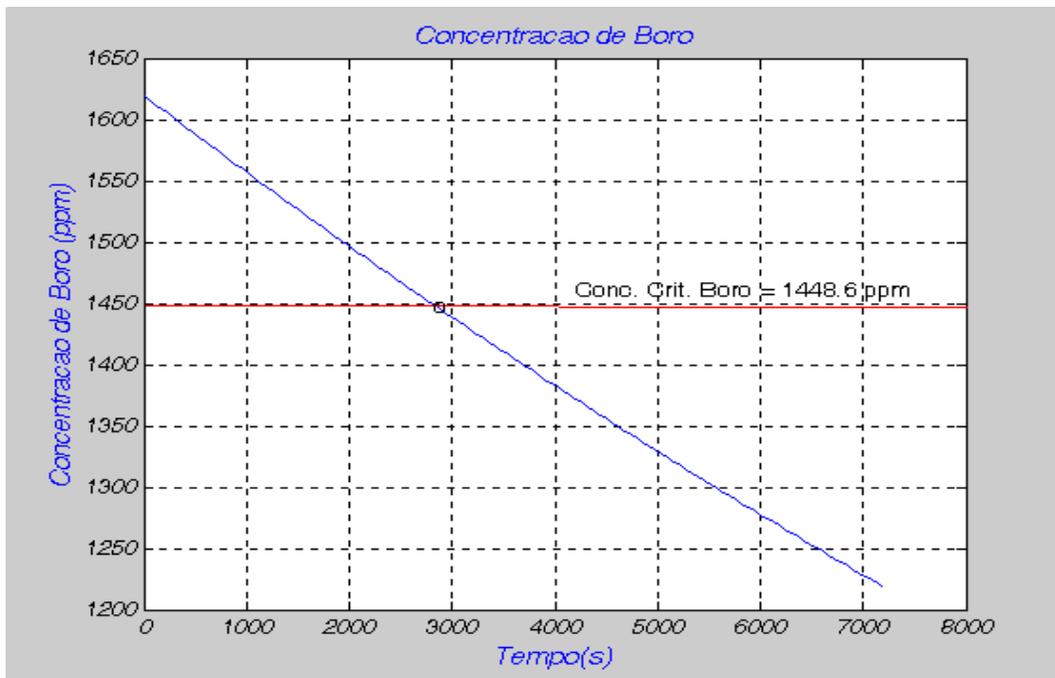


Figura 5.24.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

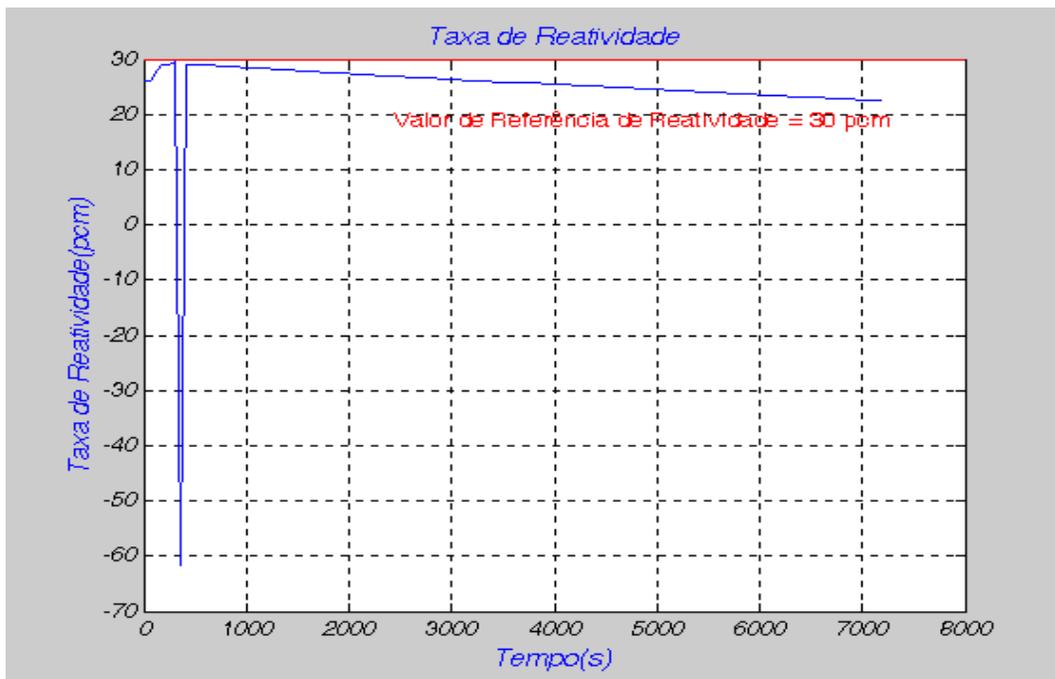


Figura 5.24.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.4.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 35 pcm

- Tempo para a criticalidade = 2460s = 41min,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 1448,6 ppm

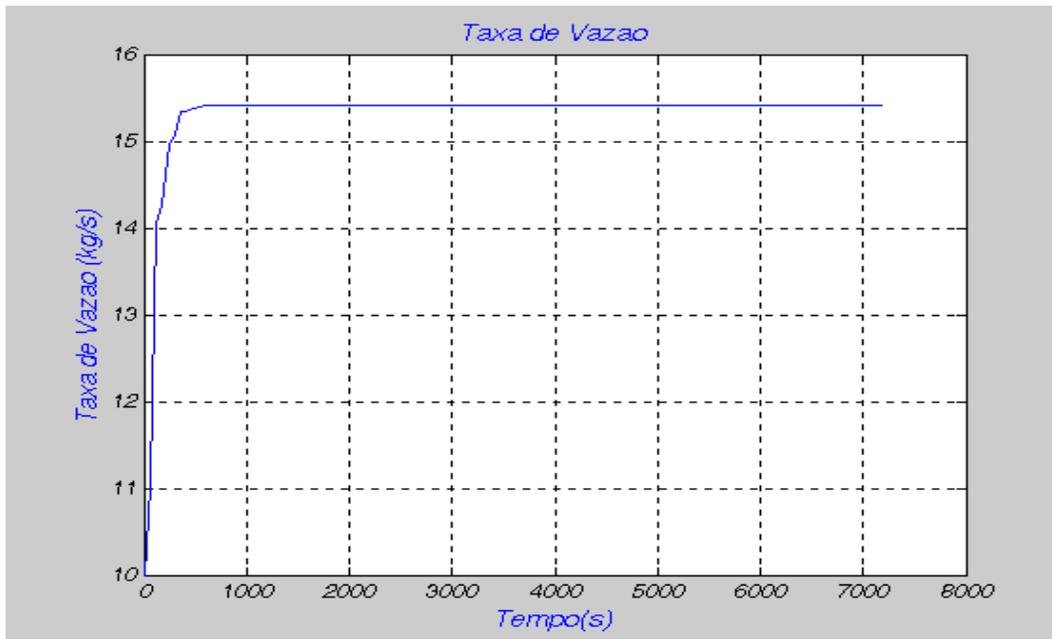


Figura 5.25.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

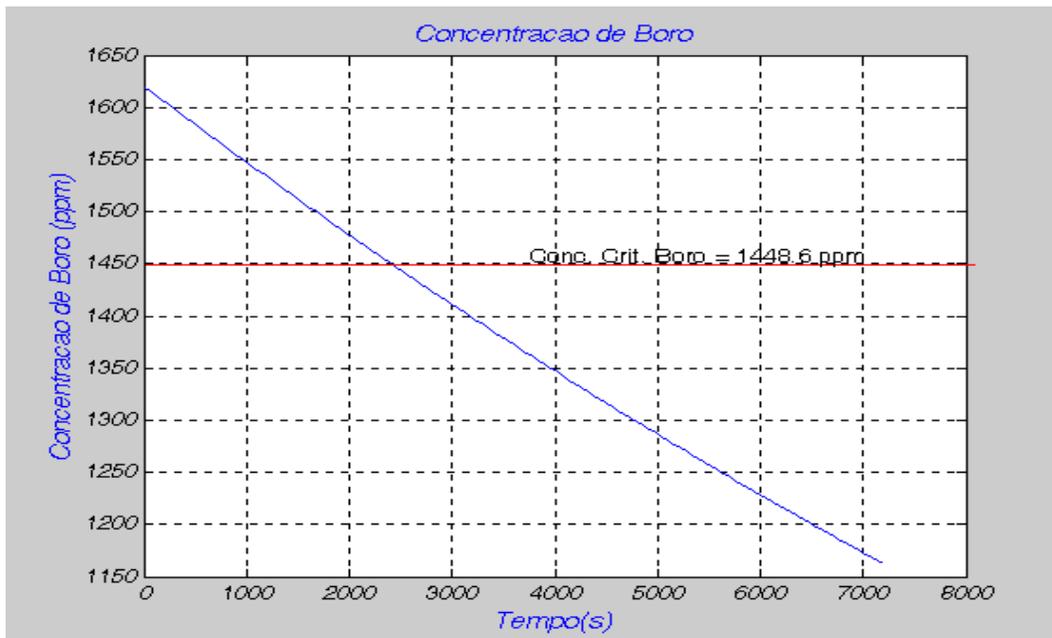


Figura 5.25.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

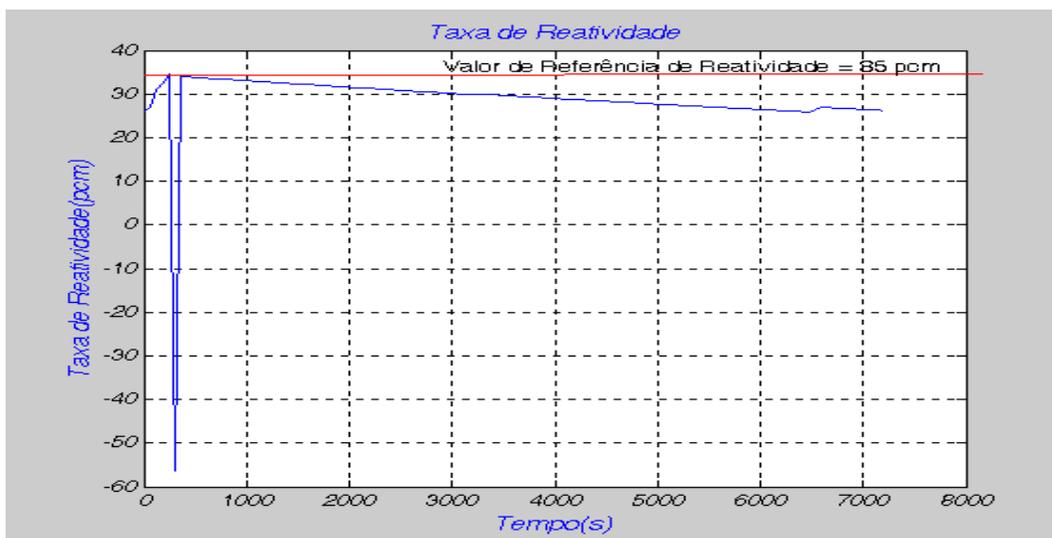


Figura 5.25.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

A tabela 5.16 mostra a comparação entre os resultados obtidos no REATIV A2 e o PREDCRIT com relação ao tempo que o operador leva para criticalizar o reator e a concentração crítica de boro estimada (CCE). Para os casos considerados, o resultado para 40 pcm é mostrado apenas para dar noção do espaço para otimização do processo. Outra comparação é feita com relação aos valores da concentração de boro alcançada por estes sistemas e a análise manual da química da usina com referência as tolerâncias permitidas pelas Especificações Técnicas (FSAR, 2007).

Tabela 5.16 Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.

Variação reatividade (pcm)	REATIV A2	PREDCRIT			
	Obs 1	25	30	35	40
Tempo para criticalidade	40min	57min	48min	41min	36min
Conc. Boro. Análise química (ppm)	1462	1462	1462	1462	1462
Conc Boro estimada REATIV (ppm)	1470	1448,6	1448.6	1448.6	1448.6

Obs 1 - Este valor não é disponibilizado devido ao fato de que o REATIV A2 não ser um sistema controlador e sim um programa que faz cálculos estáticos de balanço de reatividade.

5.4.2 Comentários do Terceiro Caso

A respeito do desempenho do controlador preditivo neural para aplicação de 25, 30 e 35 *pcm* de reatividade, pode-se observar que a variação da reatividade decorrente da quantidade de água injetada no Reator PWR assume um valor bem próximo do valor de referência durante todo processo de diluição do sistema primário para alcance da criticalidade do reator de Angra II, figuras 5.23.a e 5.23.c, 5.24.a e 5.24.c e 5.25.a e 5.25.c, nesta ordem.

O desvio observado nos gráficos 5.23.c, 5.24.c e 5.25.c em torno de 5 *pcm*, estabelecem uma variação de reatividade por minuto de 0,005%/minuto, o que representa uma variação muito pequena da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico. O que caracteriza uma boa resposta para a tarefa de criticalização.

Como pode ser observado na tabela 5.16, com a utilização do PREDCRIT (40 *pcm*) a criticalidade também foi realizada num tempo menor que aquele usado pelo operador/REATIV A2 no passado.

Verifica-se que a concentração de boro crítica, figura 5.23.b, 5.24.b e 5.25.b apresenta um erro maior, porém desprezível (< 5ppm), quando comparada àquela obtida pelas estimativas de cálculo do REATIV A2 e em análise química manual no passado, quando da execução deste procedimento.

O tempo usado para cada uma destas três aplicações (25, 30 e 35 *pcm*) foi de 7200 segundos, estabelecidos no Simulink do Matlab (MATHWORKS, 2002).

5.5. Quarto caso – Desarme da Usina em 07/08/2006

Este caso foi testado para os seguintes valores de referência de variação de reatividade $r(t)$ de 25, 30 e 35 *pcm* de reatividade. O desempenho do controlador é mostrado em gráfico de vazão de água desmineralizada (*kg/s*), de concentração de boro (*ppm*) e de variação de reatividade (*pcm*) em função do tempo (s), figuras 5.31.a,b,c, 5.32.a,b,c e 5.33.a,b,c. Para cada caso estudado são feitos comentários sobre o comportamento do controlador (PREDCRIT) para cada um dos valores de referência de reatividade aplicados, bem como entre os resultados obtidos pela aplicação deste

controlador e aqueles observados pelo uso do REATIV A2 no passado (item 5.5.2 deste trabalho). Vale lembrar que o REATIV A2 (REATIV A2, 2002) não é um sistema de controle e sim o programa que faz balanços de reatividade.

Por fim, a tabela 5.20 faz uma comparação dos valores de concentração crítica de boro (CCE) e o tempo de criticalização entre os sistemas REATIV A2 e PREDCRIT para os três valores de referência apresentados. Nesta mesma tabela, também, estão dispostos os resultados da análise química manual da concentração de boro, realizada pelo setor de química da usina no momento em que se criticalizou o reator. A análise deste resultado químico verifica se a concentração crítica de boro alcançada pelos sistemas REATIV A2 e PREDCRIT estão dentro das tolerâncias estabelecidas pelas especificações técnicas.

Os dados da usina são descritos nas tabelas 5.17 e 5.18 a seguir.

Tabela 5.17 Condições da Usina no Desligamento – Caso 4

Trip da Usina de Angra II	07/08/2006 13:20h
Queima do ciclo	6487,8 MWD/TMU
Profundidade de inserção Banco L	6 cm
Temperatura Média do SRR	308.5 °C
Potência do Reator	100%
Profundidade de inserção Banco D	26 cm
Seqüência de movimentação do Banco D	3
Estratégia de Inserção do Banco D	01
Concentração de Boro	533 ppm

Tabela 5.18 Condições da Usina na Criticalidade - Caso 4

Retorno da Usina de Angra II	08/08/2006 21:30 h
Tempo do Reator desligado	32:10 h
Profundidade de inserção Banco L	12 cm
Temperatura Média do SRR	296°C
Potência do Reator	0 %
Profundidade de inserção Banco D	360 cm
Seqüência de movimentação do Banco D	3
Estratégia de Inserção do Banco D	02
Concentração de Boro	1041 ppm

5.5.1. Controle Preditivo Neural

O ajuste para o controlador preditivo neural para este caso tem as mesmas especificações e considerações das tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.7 do primeiro caso estudado. Já os dados da planta foram dispostos nas tabelas 5.17 e 5.18. As amostras de dados para treinamento da rede neural recursiva são mostradas na figura 5.26, a evolução dos erros no processo de treinamento são mostradas na figura 5.27. As figuras 5.28, 5.29, e 5.30 apresentam o desempenho da rede quando comparada ao modelo Reator PWR para os sinais relacionados aos dados de treinamento, de validação e de teste respectivamente. O que se verifica é o erro existente entre a saída do Reator PWR e a saída do modelo neural quando submetido ao mesmo estímulo de entrada. O resultado do treinamento é mostrado na tabela 5.19 e a comparação dos resultados do controlador preditivo neural com o REATIV A2 e análise química manual são mostradas na tabela 5.20.

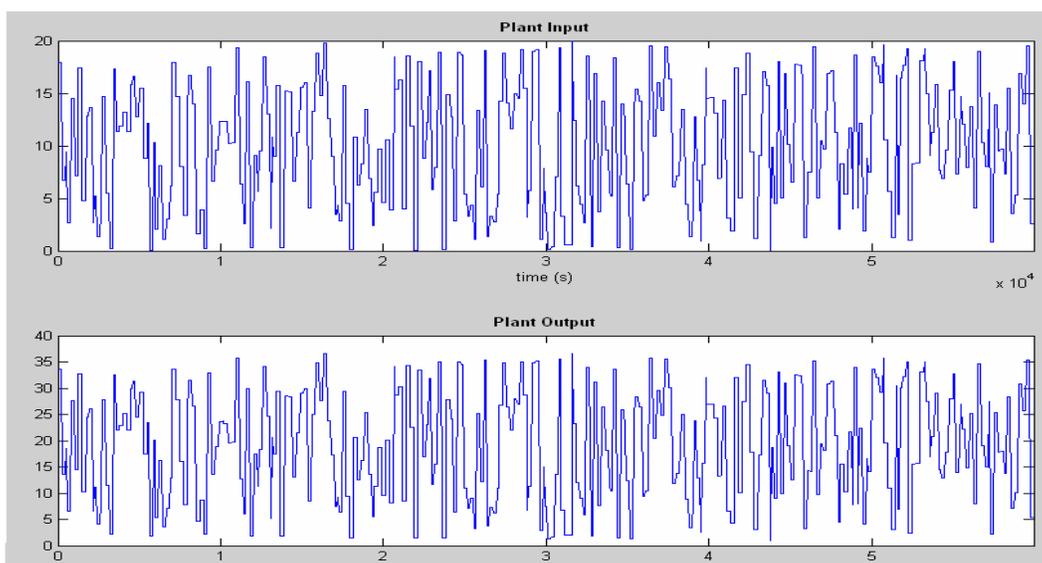


Figura 5.26 Amostras de dados para treinamento da rede.

Tabela 5.19. Resultado do treinamento.

Parada	Erro mínimo de validação
Épocas	210/1000
SSE* de treinamento	0.000252313
SSE de validação	4.67399e-006
SSE de teste	0.000829955

* SSE – Square Standard Error (Erro quadrático normalizado)

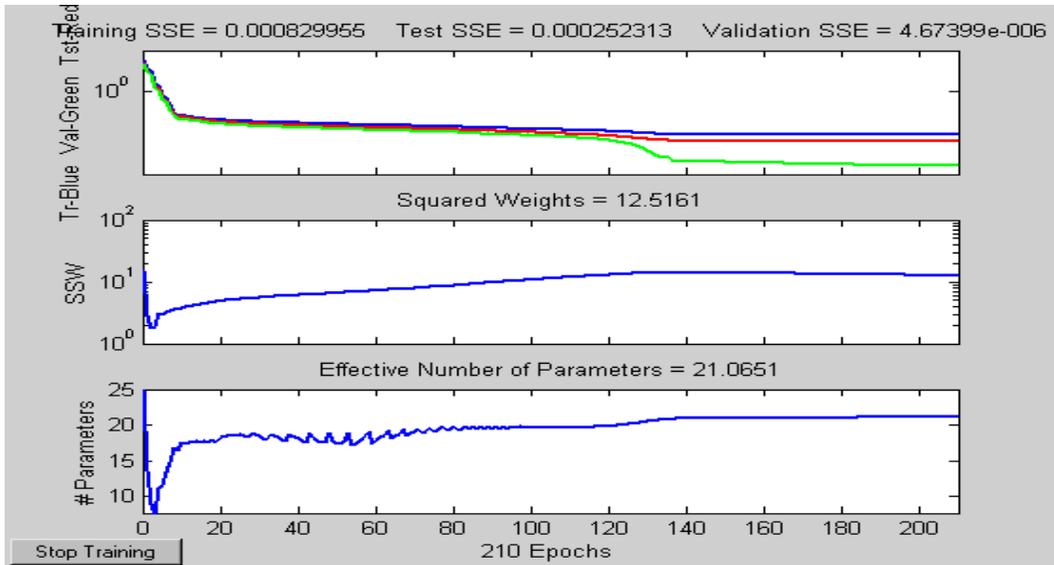


Figura 5.27 Evolução de erros no processo de treinamento

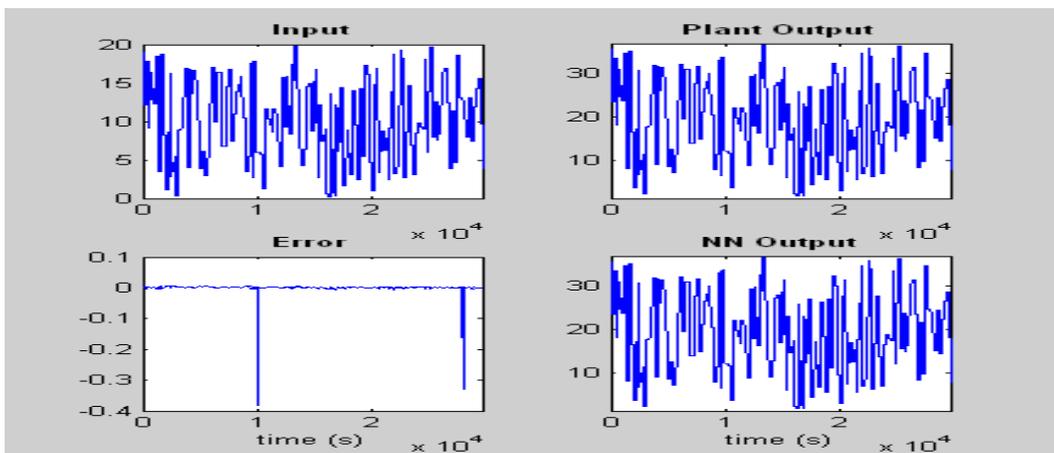


Figura 5.28 Dados de treinamento para o Controlador preditivo neural

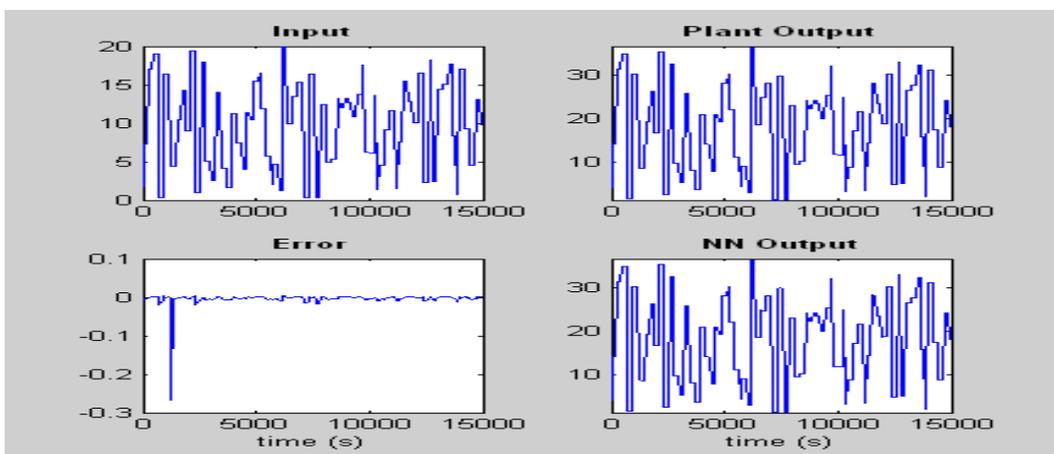


Figura 5.29 Dados de validação para o Controlador preditivo neural

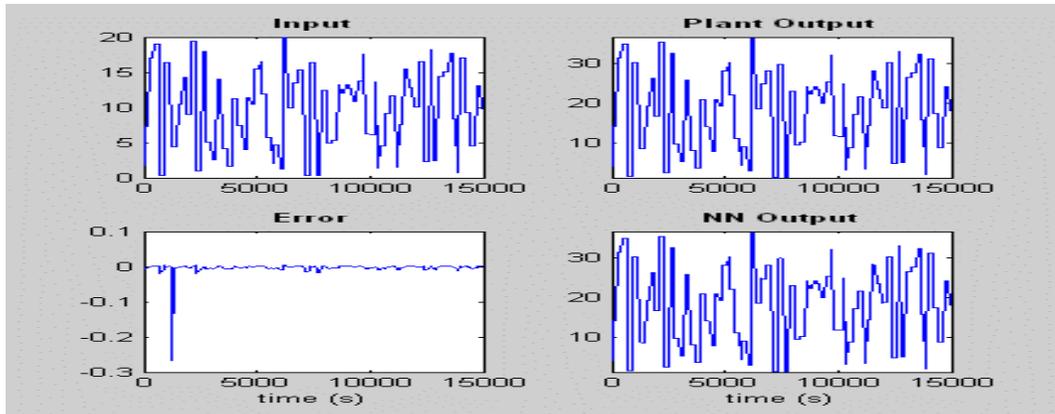


Figura 5.30 Dados de teste para o Controlador preditivo neural

As figuras 5.31.a,b,c, 5.32.a,b,c e 5.33.a,b,c representam, a trajetória de vazão de água desmineralizada a ser seguida pelo operador do reator para alcance da criticalidade, a concentração crítica de boro estimada e a variação de reatividade proveniente da ação de controle para valores de referência de reatividade de 25, 30 e 35 pcm. A seguir é apresentado o comportamento do controlador para esses valores de referência:

5.5.1.1. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 25 pcm

- Tempo para a criticalidade = 5640s = 1h 34min ,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 783,05 ppm

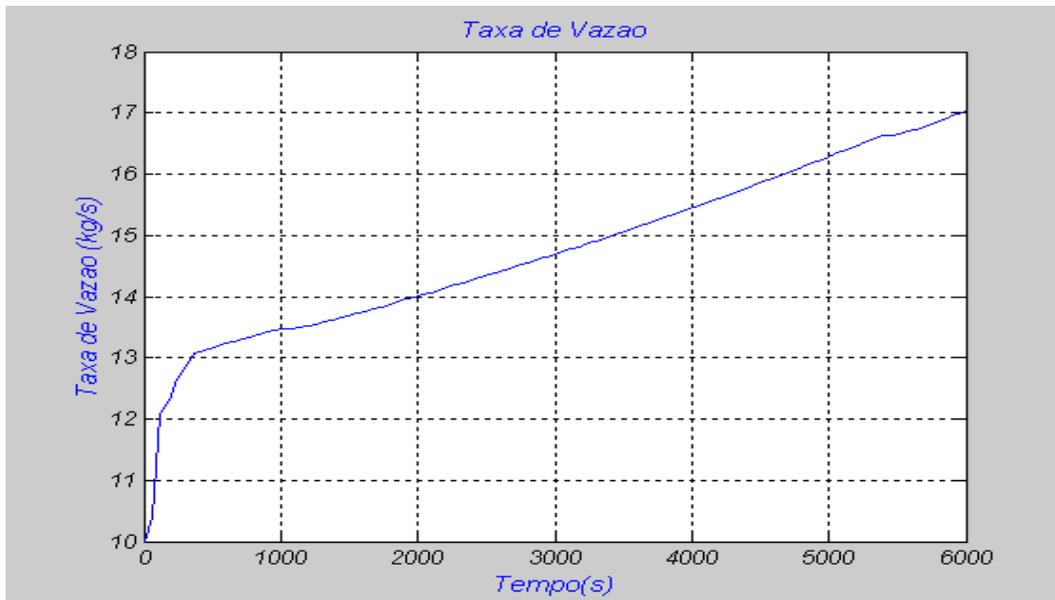


Figura 5.31.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

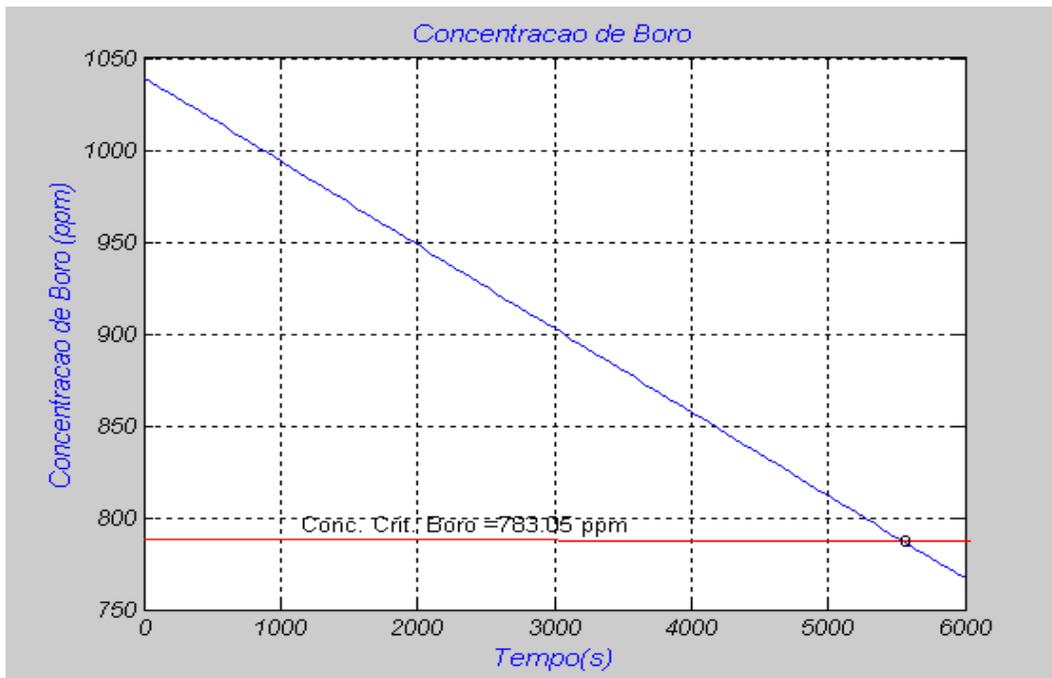


Figura 5.31.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

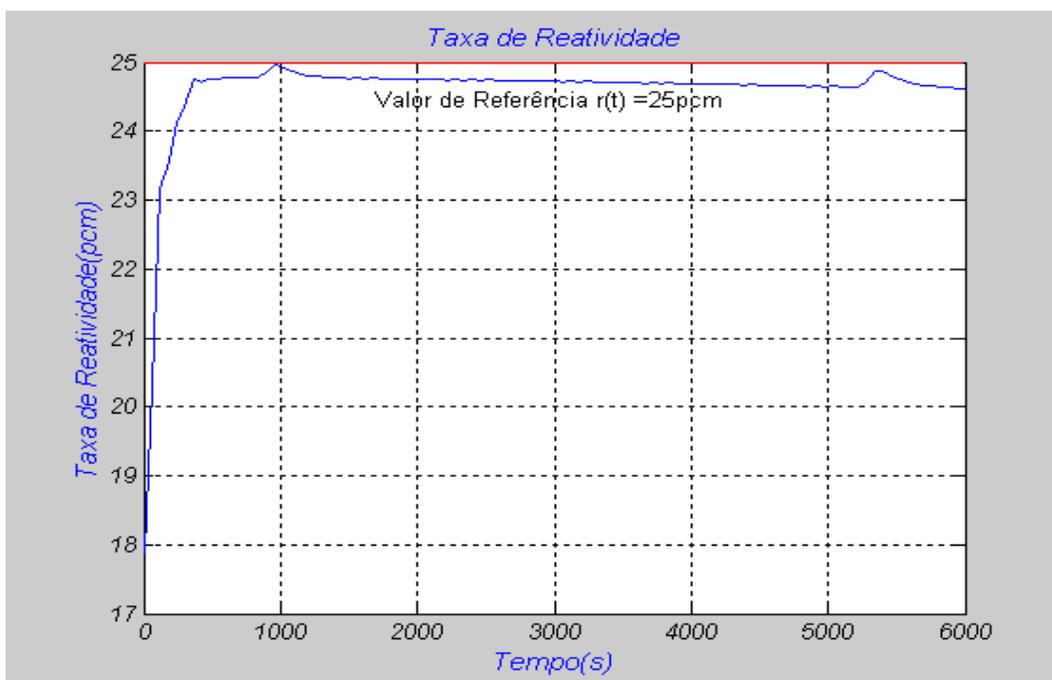


Figura 5.31.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.5.1.2. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 30 pcm

- Tempo para a criticalidade = 4680s = 1h 18min,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 783,05 ppm

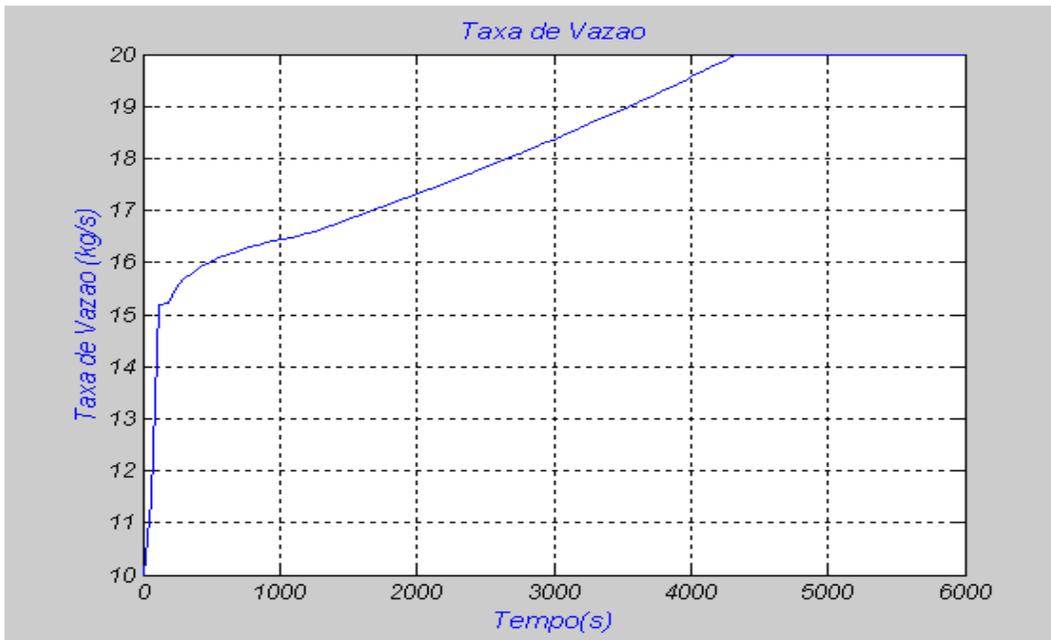


Figura 5.32.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

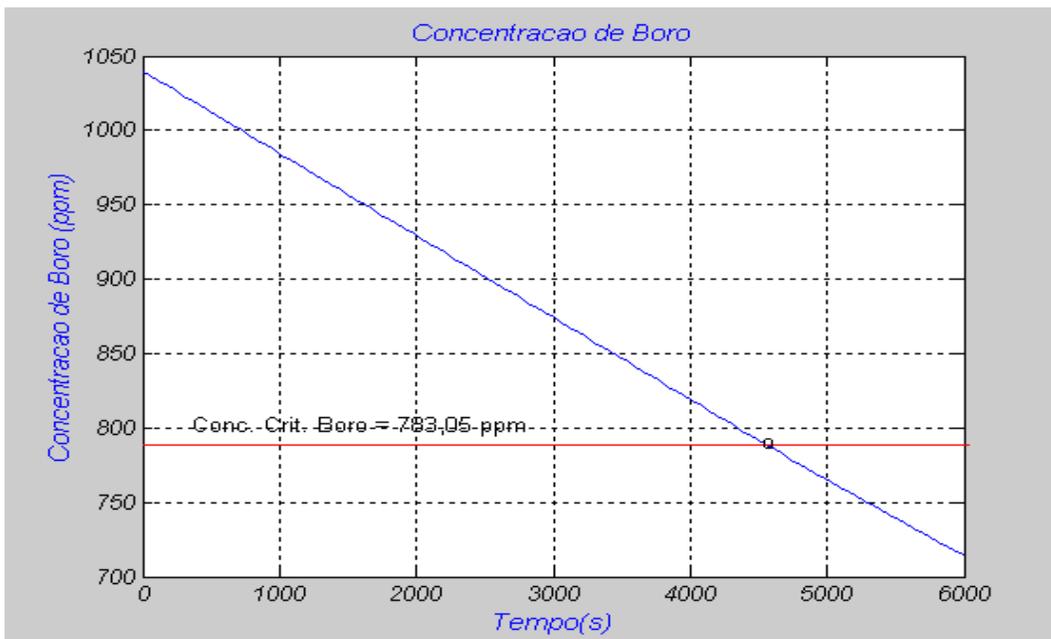


Figura 5.32.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

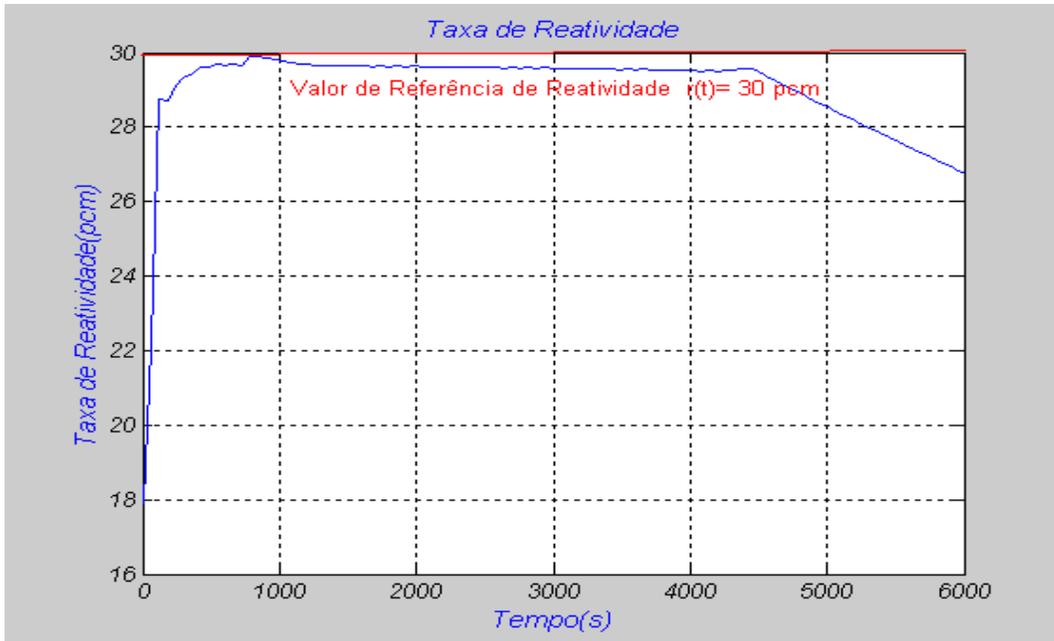


Figura 5.32.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

5.5.1.3. Valor de Referência de Reatividade ($\Delta\rho$) = 35 pcm

- Tempo para a criticalidade = 4100s = 1h 10min,
- Concentração de Boro final do SRR na Criticalidade = 783,05 ppm

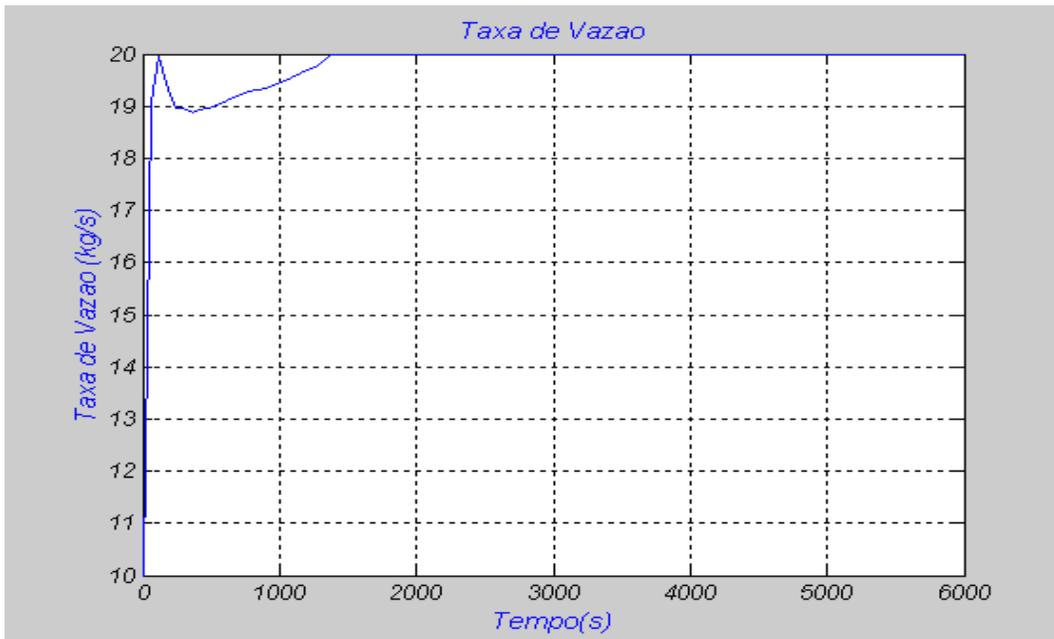


Figura 5.33.a Trajetória de vazão de água a ser seguida pelo operador do reator.

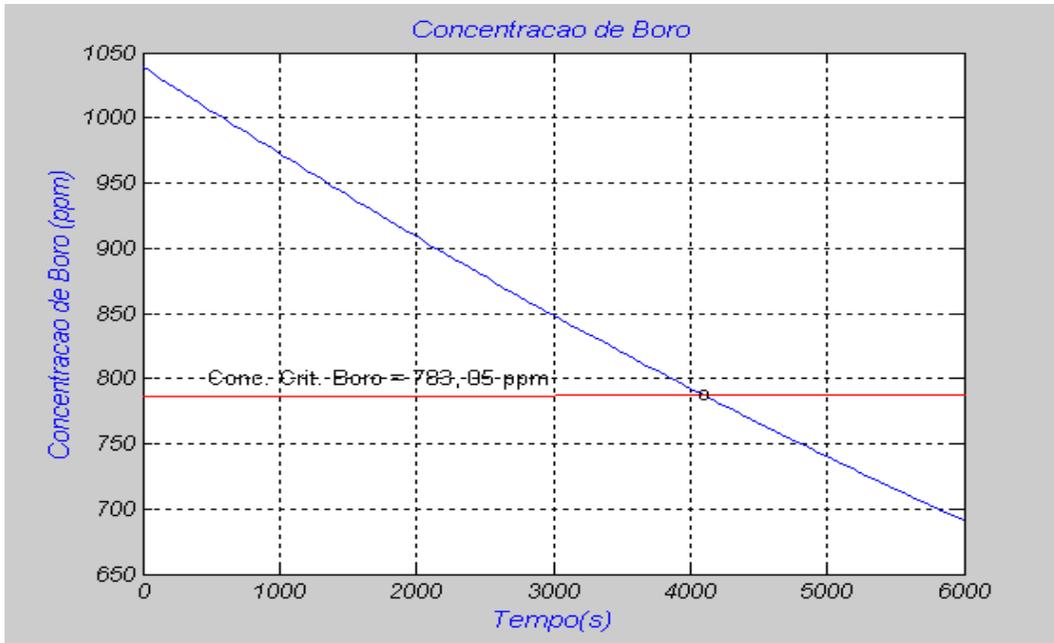


Figura 5.33.b Evolução da concentração de boro do SRR no decorrer do processo de Criticalização e concentração crítica de boro estimada.

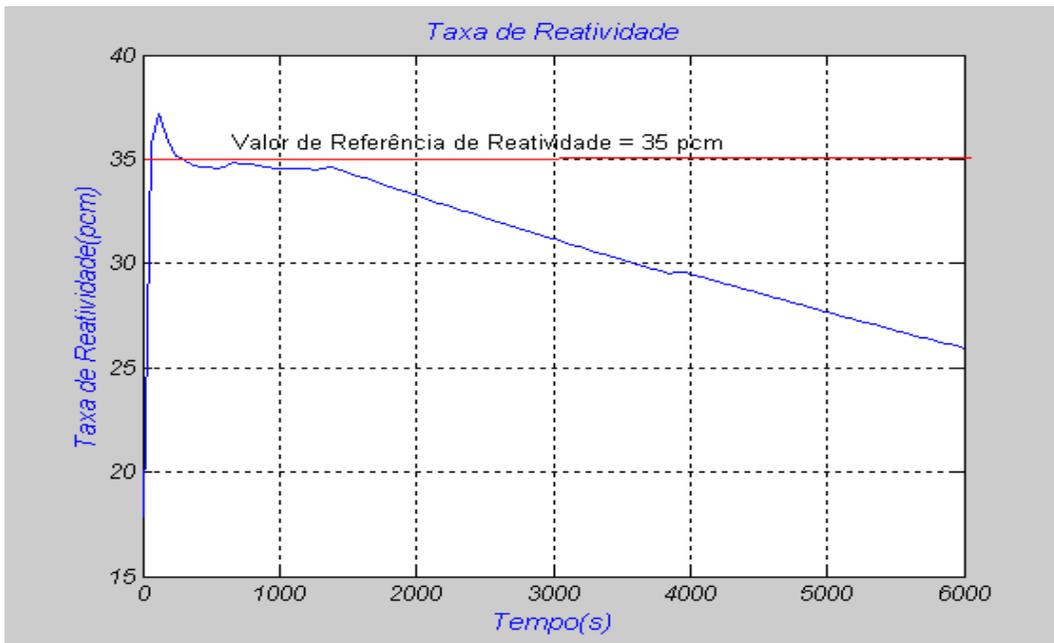


Figura 5.33.c Variação da reatividade durante atuação do controle.

A fim de se ter uma melhor compreensão dos resultados, a tabela 5.20 mostra a comparação entre os resultados obtidos no REATIV A2 e o PREDCRIT com relação ao

tempo que o operador leva para criticalizar o reator e a concentração crítica de boro estimada (CCE). Nesta tabela também é possível comparar os valores da concentração de boro alcançada por esses sistemas e a análise manual da química da usina com referência as tolerâncias permitidas pelas Especificações Técnicas (FSAR, 2007).

Tabela 5.20 Comparação dos resultados do PREDCRIT, REATIV A2 e análise química manual.

	REATIV A2	PREDCRIT		
Variação reatividade (pcm)	Obs 1	25	30	35
Tempo para criticalidade	1h 28min	1h34min	1h18min	1h10min
Conc. Boro.Análise química (ppm)	805	805	805	805
Conc Boro estimada REATIV (ppm)	792	783,05	783,05	783,05

Obs 1 - Este valor não é disponibilizado devido ao fato de que o REATIV A2 não ser um sistema controlador e sim um programa que faz cálculos estáticos de balanço de reatividade.

5.5.2. Comentários do 4º caso

A respeito do desempenho do controlador preditivo neural para aplicação a 25 pcm de reatividade, pode-se observar que a variação da reatividade decorrente da quantidade de água injetada no Reator PWR assume um valor bem próximo do valor de referência durante todo processo de diluição do sistema primário para alcance da criticalidade do reator de Angra II, figuras 5.31.a e 5.31.c. Isso revela que é possível desenvolver este procedimento de criticalidade a uma taxa relativa de variação de fluxo neutrônico constante - objetivo deste trabalho. Para este caso, com a utilização do PREDCRIT a criticalidade é realizada num tempo 6 minutos maior que aquele usado pelo operador/ REATIV A2 no passado, tabela 5.20. Esta situação está relacionada ao comportamento de cada operador do reator, isto é, a sua habilidade na tentativa de construir um procedimento ótimo de diluição do primário. Os desvios que se observam ($< 1\text{ pcm}$) são desprezíveis, correspondem a uma taxa de variação de reatividade a cada minuto de 0.001%/minuto.

Verifica-se que a concentração de boro crítica, figura 5.31.b apresenta um erro menor quando comparada àquela obtida pelas estimativas de calculo do REATIV A2 e em análise química manual no passado, quando da execução deste procedimento.

Para o valor de referência de 30 *pcm*, o PREDCRIT consegue manter a variação de reatividade sem oscilações consideráveis por todo tempo necessário para criticalizar o reator, figuras 5.32.a e 5.32.c. Observa-se que um valor quase constante da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico, isto é, a taxa de variação de reatividade é conseguido. O resultado apresentado pode ser usado para controle sem que a segurança do reator seja afetada. Para este caso o resultado da criticalização do reator gira em torno do alcançado pelas estimativas realizadas pelo REATIV A2. O reator ficaria crítico com aplicação do PREDCRIT 10 minutos antes. As observações para a concentração crítica de boro estimada, figura 5.32.b são as mesmas daquela para 25 *pcm* de reatividade.

Para o valor de referência de 35 *pcm*, o PREDCRIT consegue manter a variação de reatividade sem oscilações consideráveis por todo tempo necessário para criticalizar o reator, após este período ocorre uma redução gradativa da variação de reatividade em função do alcance do limite de abertura das válvulas de diluição do sistema primário, figuras 5.33.a e 5.33.c. Para o melhor resultado encontrado pelo PREDCRIT, a criticalidade é alcançada 18 minutos antes e ocorre com um valor de referência de 35 *pcm*. As observações para a concentração crítica de boro estimada, figura 5.33.b são as mesmas daquela para 25 *pcm* de reatividade.

Do exposto percebe-se que o PREDCRIT tem vantagens comparativas significativas relativas ao procedimento hoje adotado para criticalizar o reator de Angra II com a utilização do REATIV A2. O estabelecimento de uma trajetória de diluição do sistema primário com vista a manutenção da taxa de variação de reatividade, contribui diretamente para manutenção da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico. Com o PREDCRIT é possível saber como será o comportamento das variáveis envolvidas neste processo independente da habilidade do operador.

O tempo usado para cada uma destas três aplicações (25, 30 e 35 *pcm*) foi de 6000 segundos, estabelecidos no Simulink do Matlab (MATHWORKS, 2002).

5.6 Comentários adicionais sobre o PREDCRIT

A comparação entre o PREDCRIT e o REATIV A2 é apenas parcial, visto que este último não é um sistema de controle. O REATIV A2 faz uma estimativa dos cálculos de balanço de reatividade para a criticalidade.

Na prática o gráfico gerado pela variação da taxa de variação relativa de reatividade seria comparado aquele gerado pelas medições reais da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico executado pelo Sistema de Instrumentação Externa do Núcleo do Reator(JKT). Este sistema verifica como se comporta o fluxo neutrônico no interior, através da contabilização dos nêutrons que escapam do núcleo do reator durante o processo de fissão do urânio, daí o termo “Externa” (CFOL II - JKT, 1998).

A figura 5.34 mostra uma tela de criticalidade usada pelo operador do reator para acompanhamento deste procedimento na sala de controle da usina de Angra II. Nela estão contidas algumas variáveis para o acompanhamento da criticalidade, tais como:

- Período recíproco (taxa de variação relativa de fluxo neutrônico) faixa da fonte,
- Período recíproco (taxa de variação relativa de fluxo neutrônico) faixa da intermediária,
- Fluxo neutônico na faixa da fonte,
- Fluxo neutrônico na Faixa Intermediária,
- Pressão do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR),
- Temperatura média do Sistema de Refrigeração do Reator (SRR),
- Temperatura de entrada do reator loop 20 (SRR),
- Temperatura de saída do reator loop 20 (SRR),
- Posição do banco de controle na seqüência de movimentação,
- Fluxo de água desmineralizada (KBB/KBC),
- Medição da concentração de ácido bórico automática.

S2A2 - Sistema Integrado de Computadores de Angra 2 - ESTAÇÃO : EGA-08

AIMS

CJA60EP002BD01 - GRUPO DE PONTOS
ANA_10003 - PRIMÁRIO - CRITICALIDADE

10/11/2007 11:04:08

PONTO INSTRUMENTO GRUPO ANA_10003

Limpa Pontos Remove Ponto Atualiza

Instrumento	Descrição	Valor	U.E.	Limite Inferior	Limite Superior
KUA15CQ001 *A00	INSTR MONITORACAO ACIDO BORICO	443.682	MG/KG	0.000	1500.000
JKT01CX051C *A00	FLX FAIXA DA FONTE 1	0.000	E3_1/S	0.000	1000.000
JKT01CX053C *A00	FLX FAIXA DA FONTE 2	0.000	(E3)1/S	0.000	1000.000
JKT02CX901 *A00	FLX INDICADO FAIXA INTERMEDIARIA	5762.298	E-9A	0.008	20000.000
JRF10FX952A *A00	FLX MEDIO FAIXA DE POTENCIA	100.673	%	0.000	125.000
JKT01FX901 *A00	PERIODO INDICADO FAIXA DA FONTE	0.008	%/s	0.000	10.000
JKT02FX901 *A00	PERIODO IND FAIXA INTERMEDIARIA	0.158	%/s	0.000	10.000
JSA20FG514 *A00	POS D-QUADRUPLETE MOVENDO	26.907	cm	0.000	400.000
JTK00FT101 *A00	2.MAX TEMP MEDIA REFRIGERANTE	308.598	°C	265.000	315.000
JEF10CL001 *A00	L PRESSURIZADOR	7.858	m	1.750	11.450
JSA72FP401 *A00	PRESSAO ATUAL DO REFRIGERANTE	156.990	BAR	0.000	180.000
JTK00FF130 *A00	VAZAO MASSICA AGUA DMIN	0.051	KG/S	0.000	26.000
JTK00FF120 *A00	VAZAO MASSICA ACIDO BORICO	0.026	KG/S	0.000	16.000
KBA20CF001 *A00	F LINHA ALIMENTACAO TCY	8.839	KG/S	0.000	35.000
KBA41CF001A *A00	F INJ MONT TC RECUPERATIVO	7.868	KG/S	0.000	35.000
KBA20CL003 *A00	L TANQUE CONTROLE VOLUME	3.034	m	0.000	7.000
JEC20CT002 *A00	T REFR ENTRADA REATOR LOOP 20	293.000	°C	0.000	400.000
JEC20CT003 *A00	T REFR SAIDA REATOR LOOP 20	324.613	°C	0.000	400.000
LBA60FP001 *A00	P MAXIMA DE VAPOR PRINCIPAL	64.305	BAR	0.000	100.000
FAK50CT001 *A00	T PISC ELEM COMB	33.831	°C	0.000	100.000

10/11/07 11:02:41 - SICA sem M G F A B T STIFAP RESA SUB iniciada

Figura 5.34 Tela para acompanhamento da criticalidade do reator de Angra II

Capítulo 6

– Conclusões e Recomendações –

Neste trabalho realizou-se um estudo de um esquema de Controle Preditivo Neural (NN Predictive Controller) disponível no Simulink do Matlab (MATHWORKS, 2002), para utilização no processo de criticalização por diluição do SRR de Angra II após desarme. Foram considerados quatro casos reais de desarme do reator de Angra II ocorridos no ano de 2006 e 2007 (ciclo 6) para observação do comportamento do controlador. Para todos os casos estudados a ação de controle do NGPC mostrou ser adequada e eficaz.

A rede neural recursiva utilizada como modelo do processo representou de forma satisfatória o comportamento dinâmico do processo com uma quantidade de dados (amostras de treinamento) razoavelmente pequena. Esta situação não comprometeu a qualidade do controlador, visto que um número reduzido de pontos no padrão (1000 amostras) de treinamento poderia não garantir fidelidade à rede, prejudicando a robustez do controlador.

Os recursos computacionais existentes atualmente, velocidade de processamento e processamento paralelo, tornam o procedimento de geração dos dados de treinamento e início da ação de controle rápidos, o que faz do sistema de controle adotado uma ferramenta muito versátil para os cálculos de balanço de reatividade e monitoramento do núcleo em tempo real.

Para este trabalho, as amostras do modelo da planta e o controle foram feitas com intervalo de tempo de 60 segundos. A escolha deste tempo é considerada razoável para que o operador possa interagir de maneira eficiente, isto é, que ele consiga descrever a trajetória prevista pelo controlador preditivo com atuação direta nas válvulas de diluição do SRR.

A estratégia de controle preditivo adotada revelou-se satisfatória quando no início de vida (*BOL – Beginning of life*) e no meio de do ciclo de queima (*MDC – Middle of life*) tendo em vista que a concentração de boro presente no SRR ainda é considerável, isto é, o núcleo do reator ainda possui reatividade suficiente que ainda precisa ser compensada por

este absorvedor de neutrons. É importante observar que nas condições de final de vida (*EOL – End of Life*) as concentrações de boro presente no circuito primário do reator são significativamente baixas. Nestes casos qualquer estratégia de retorno da usina a potência requer um volume de água de diluição extremamente alto, o que pode tornar o processo inviável, devido ao efeito do envenenamento pelo Xenônio, que insere altas taxas de reatividade negativa. O teste sugere a necessidade de compensação com outros parâmetros que influenciam no balanço de reatividade. Situações em que há necessidade da utilização deste artifício são caracterizadas como operações de *Stretch -Out* (Alargamento do ciclo). Donde se conclui que o controle do balanço de reatividade não possui um resultado satisfatório e a parada para troca de elementos combustíveis se faz necessária.

O Controle Preditivo Neural (PREDCRIT) proposto, quando comparado aos procedimentos utilizados na Usina, seja pela utilização de cálculos manuais ou ainda pela utilização do REATIV- A2 (sistema que faz o balanço de reatividade para estimar a concentração crítica de boro), apresentou um desempenho superior. Neste ponto, a comparação que se faz é apenas em função dos cálculos, já que os sistemas existentes na usina não definem para o operador a trajetória de diluição do SRR a ser seguida para se chegar a criticalidade.

A explicação para as oscilações do controlador em torno do valor de referência de reatividade, além das peculiaridades do processo, como excesso de reatividade presente no núcleo para geração de potência nuclear, estão também associadas a variação que o processo sofre no tempo em seus parâmetros, sugerindo que a escolha de um sistema de controle com características adaptativas pode fornecer um resultado melhor e com isto reduzir estes desvios.

Com relação à concentração de boro que se obtém com o PREDCRIT quando comparadas aquela obtida por análise química percebe-se que a diferença existente entre uma e outra poderia ter sido reduzida caso fizessemos ajuste adequado no modelo simulado da planta (Reator PWR). A cada momento o balanço de reatividade é realizado entre o tempo atual e o tempo de retorno da planta. O correto seria o desenvolvimento de um laço variante no tempo que executasse esse balanço sempre em relação à amostragem da planta imediatamente anterior à atual. Esta ação faria com que a diferença entre a concentração de boro por análise química e concentração de boro estimada pelo PREDCRIT fosse cada vez

menores.

O estudo dos quatro casos com o uso de um controlador preditivo neural revelaram que é possível conduzir a tarefa de criticalizar o reator de Angra II sempre de maneira otimizada.

Pelo exposto nos comentários percebeu-se que o uso do PREDCRIT teve vantagens comparativas significativas relativas ao procedimento hoje adotado para criticalizar o reator de Angra II com a utilização do REATIV A2. O estabelecimento de uma trajetória de diluição do sistema primário com vista a manutenção da taxa de variação de reatividade contribui diretamente para manutenção da taxa de variação relativa de fluxo neutrônico. Assim, essa característica estabelecida pelo PREDCRIT permite avaliar previamente o comportamento das variáveis envolvidos no processo.

Finalizando, o processo de criticalidade do reator de Angra II é um procedimento variante no tempo. A utilização do controlador *NN Predictive Controller* disponível no Simulink do Matlab (MATHWORKS, 2002), embora satisfatória, acumula um pequeno retardo verificado pela diferença entre análise de boro manual feita pela química e o sistema PREDCRIT. Esta situação poderia ser contornada caso utilizássemos um controlador com características adaptativas. O que iria capturar melhor a dinâmica do processo.

Novos desafios no desenvolvimento do módulo controlador contemplam:

- Implementação do Controle Preditivo em hardware, isto é, com interface direta com o Sistema de Computador de Processo de Angra II, o que reduziria demanda de interação com o operador (Digitação de variáveis).
- A incorporação do Caso da Posição Crítica estima (PCE), não prevista neste trabalho. Indicativo da possibilidade de Generalização do Sistema PEDCRIT para qualquer tipo de estratégia de criticalização da Usina.
- Incorporação de outras variáveis para monitoramento processo junto ao controlador preditivo e conexões com ele, tais como : Fluxo Neutrônico na Faixa da Fonte (FF) e Faixa intermediária(FI), taxa de variação relativa de fluxo neutrônico tanto na FF quanto na FI., Concentração d e boro vista pelo Borômetro (equipamento presente

na Sala de Controle de Angra II).

- Utilização de novas estratégias de controle preditivo neural , como um controlador adaptativo.

Por fim, a abordagem feita embora considere apenas a comparação entre os procedimentos operacionais da Usina, e este por sua vez tem seus calculados avalizados por análise manual da Química da Usina, fica claro que em se aproximando desta análises o PEDCRIT demonstra ser uma ferramenta valiosa na condução do processo de criticalidade por diluição do Reator de Angra II.

Anexo 1

– Redes Neurais Artificiais –

A.1.1. Introdução

Redes neurais artificiais (RNAs) utilizadas em engenharia foram inspiradas nas redes neurais biológicas. Elas resultaram do desejo de se construir máquinas capazes de exibir comportamento inteligente, ou seja, com inteligência artificial. A inteligência artificial é definida como um campo da ciência da computação que visa reproduzir por meios computacionais as características normalmente atribuídas à inteligência humana, tais como: compreensão da linguagem, aprendizagem, raciocínio, dentre outras.

A origem das RNAs está baseada no neurônio biológico típico, formado basicamente por dendritos, o corpo celular e o axônio, que junto com outros neurônios podem ter muitas formas de conexão, com as mais variadas topologias, formando as redes neurais biológicas. Assim, a arquitetura de cada rede neural é baseada em blocos de construção similar que realizam o processamento de informação.

Assim, as RNAs podem ser mais adequadamente caracterizadas como modelos computacionais que têm propriedades particulares e habilidades para se adaptar ou aprender, para generalizar, para distribuir ou organizar dados, e cuja operação é baseada em processamento paralelo.

A primeira onda de interesse em RNAs, conhecidas também como modelos conexionistas ou processamento distribuído paralelo, emerge depois da introdução dos neurônios simplificados por McCulloch e Pitts em 1943. Estes neurônios foram apresentados como modelos de neurônios biológicos e como componentes conceituais para circuitos que podem desempenhar tarefas computacionais; eles tiveram grande repercussão quando foram propostos, pois se imaginava que poderiam servir de modelo para os processos decisórios mentais. No final da década de 1950, Rosenblatt na Universidade de Cornell, criou uma genuína rede de múltiplos neurônios do tipo discriminadores lineares e chamou esta rede de perceptron, sendo um perceptron uma rede com os neurônios dispostos

em camadas. Este pode ser considerado o primeiro modelo de redes neurais.

No ano 1969 foi publicado o livro *Perceptrons*, onde Minsky e Papert mostram as deficiências do modelo perceptron, levando à comunidade científica ao desencantamento em relação às RNAs; só alguns pesquisadores continuaram seus esforços no estudo, sendo os mais notáveis: Teuvo Kohonen, Stephen Grossberg, James Anderson, e Kunihiko Fukushima.

Apenas a partir dos anos oitenta quando alguns resultados teóricos importantes foram obtidos (como a apresentação do algoritmo de retropropagação do erro), e um aumento na capacidade de processamento de hardware foi desenvolvido, é que houve um ressurgimento do interesse pelas redes neurais artificiais. Este interesse foi refletido no número de pesquisadores, o aumento de financiamento, o número de conferências, e o número de periódicos associados às redes neurais.

Este anexo se concentra na explicação de uma das arquiteturas de RNAs mais comuns, o perceptron de múltiplas camadas (MLP) que é construída de componentes simples chamados de neurônios. Começaremos explicando o funcionamento do modelo de um neurônio com uma única entrada, que colocados em paralelo poderão produzir as chamadas camadas, que finalmente serão conectadas em série para formar a rede (para informação sobre outros tipos de redes consultar as referências (HAGAN, 1996), (HAYKIN, 1999) e (BISHOP, 1995)..

A.1.2. Modelo do Neurônio

Na figura A.1.1 é apresentado o modelo de um neurônio simples com uma única entrada. A entrada escalar p é transmitida por uma conexão que multiplica seu potencial por um peso escalar w para formar o produto $w.p$ que será um dos termos enviados para o somador; a outra entrada I , é multiplicada por um fator b chamado bias que é o segundo termo enviado para o somador. A saída do somador n , freqüentemente referida como a entrada da rede, vai para uma função de transferência f que produz a saída escalar do neurônio a (alguns autores utilizam o termo “função de ativação” em lugar de função de transferência e “offset” ao invés de bias).

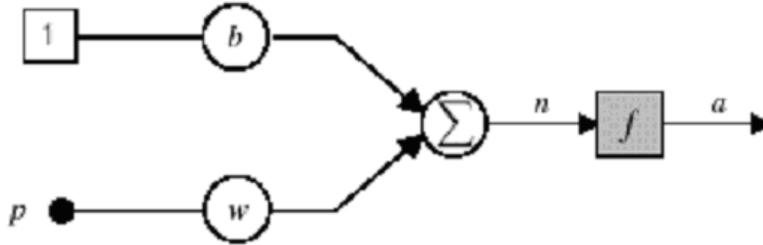


Figura A.1.1. Neurônio de uma única entrada.

A saída do neurônio é calculada da seguinte maneira:

$$a = f(w.p + b) \quad (\text{A.1.1})$$

A função de transferência tipicamente é escolhida pelo projetista, enquanto os parâmetros escalares w e b são ajustados por alguma regra de aprendizagem, de modo que a relação entrada/saída do neurônio cumpra com algum objetivo específico.

Assim, a idéia central das redes neurais é que tais parâmetros possam ser ajustados de modo que a rede exiba algum comportamento desejado e interessante para a realização de algum trabalho em particular. São muitas as funções de transferência utilizadas nas redes neurais, sendo que uma função linear ou não linear de n pode ser utilizada. Uma das mais comuns é a função sigmoideal, conhecida também como *S-shape*, é uma função semilinear, limitada e monotônica. É possível definir várias funções sigmoideais. As funções sigmoideais são encontradas na construção de diversos modelos nas mais variadas áreas. Uma das funções sigmoideais freqüentemente usadas é a função logística que pode ser visualizada na figura A.1.2.

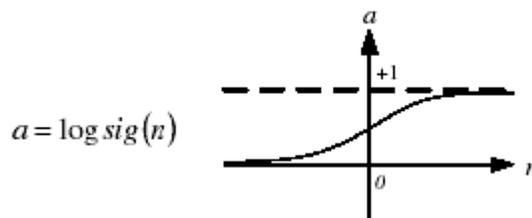


Figura A.1.2. Função de transferência logística.

$$\alpha = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (\text{A.1.2})$$

Esta função de transferência obtém o valor da entrada, podendo assumir valores entre mais e menos infinito, e limita a saída no intervalo de 0 a 1, de acordo à expressão:

A função de transferência logística é geralmente utilizada nas redes de múltiplas camadas, que são treinadas usando o algoritmo de retropropagação do erro conhecido como “*backpropagation*” (devido a esta função ser diferenciável). Tipicamente um neurônio tem mais de uma entrada. Na figura A.1.3 é mostrado um neurônio com R entradas. Cada uma das entradas individuais p_1, p_2, \dots, p_R tem seu correspondente peso $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$ na matriz de pesos W .

O neurônio tem um bias b que é somado com as entradas multiplicadas por seus respectivos pesos para formar a entrada total n :

$$n = w_{1,1}p_1 + w_{1,2}p_2 + \dots + w_{1,R}p_R + b \quad (\text{A.1.3})$$

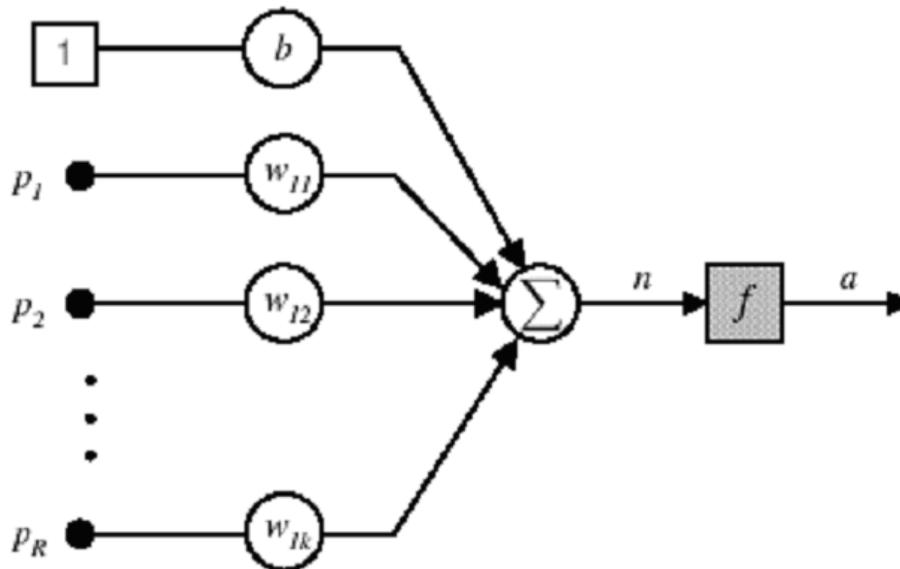


Figura A.1.3. Neurônio de múltiplas entradas

Na forma matricial, esta expressão pode ser escrita como:

$$n = Wp + b \quad (\text{A.1.4})$$

Onde a matriz W para o caso de um único neurônio é uma matriz $1 \times R$. Logo, a saída do neurônio pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\alpha = f(Wp + b) \quad (\text{A.1.5})$$

Na figura A.1.4 tem-se representado o neurônio na forma matricial.

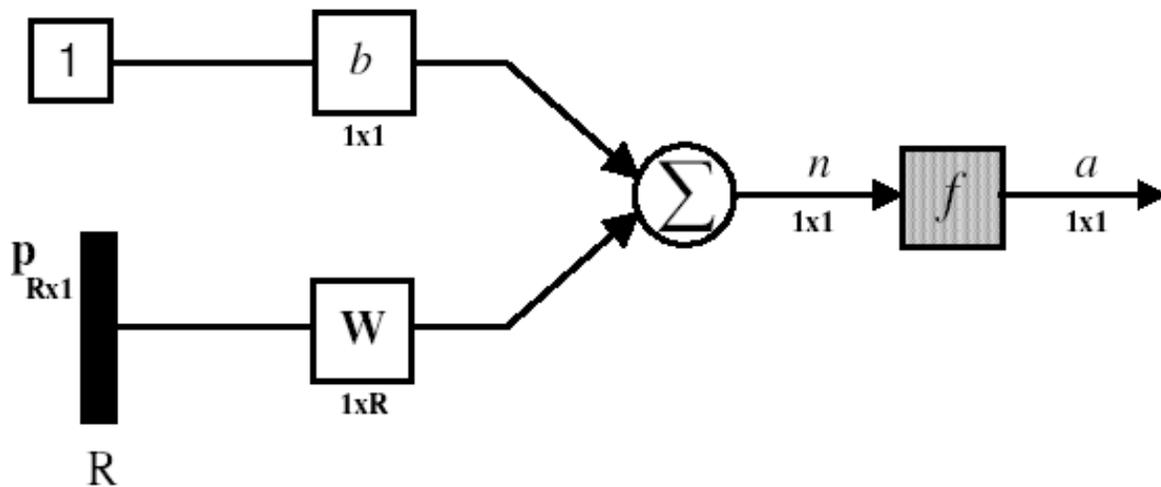


Figura A.1.4. Neurônio com R entradas, notação matricial.

O conjunto de elementos mostrados na figura A.1.4 representa uma camada de rede, ela inclui a combinação de pesos, a operação e soma o bias b e a função de transferência f ; o vetor de entradas p não está incluído na camada.

A.1.3. Arquiteturas de Rede

Geralmente um único neurônio com muitas entradas, não é suficiente para realizar uma tarefa. Precisa-se de mais de um neurônio operando em paralelo. Na figura A.1.5 é mostrada uma rede com uma única camada de S neurônios, cada uma das R entradas é conectada a cada neurônio e a matriz de pesos tem número de linhas igual ao número de neurônios.

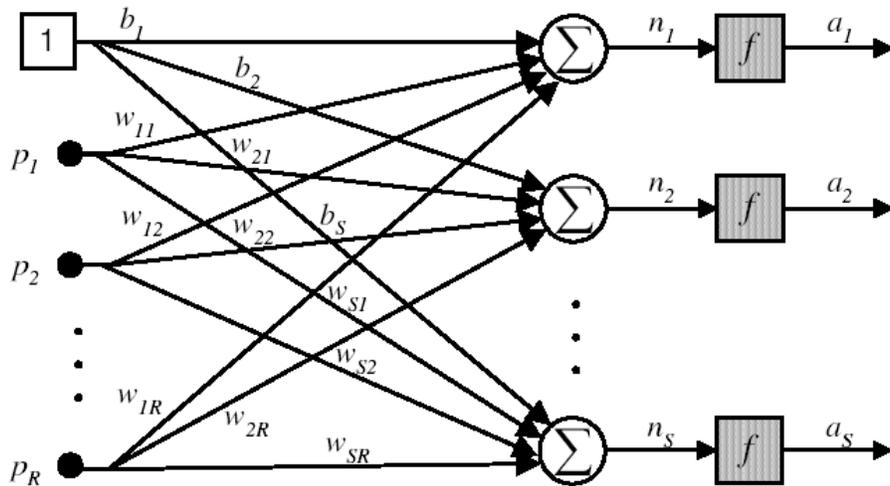


Figura A.1.5. Rede de uma camada com S neurônios

Uma camada pode ser definida completamente por meio de uma matriz de pesos W , os somadores, o vetor bias b , e os blocos das funções de transferência. Alguns autores se referem às entradas como uma outra camada, mas é comum que não sejam consideradas como tais.

As conexões entre as entradas e cada um dos neurônios são representadas de maneira coletiva pela matriz de pesos W . Nesta, os índices-linha de cada elemento indicam o neurônio destino associado com o peso, e os índices-coluna assinalam a entrada correspondente. Assim, os índices em $w_{3,2}$ indicam que este peso representa a conexão da segunda fonte de entrada para o terceiro neurônio.

$$W = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \dots & w_{1,R} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \dots & w_{2,R} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ w_{S,1} & w_{S,2} & \dots & w_{S,R} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.6})$$

Uma rede com S neurônios, R entradas, e uma camada intermediária pode ser resumida em notação matricial como ilustra a figura A.1.6 e a saída pode-se escrever da seguinte forma:

$$a = f(Wp + b) \quad (A.1.7)$$

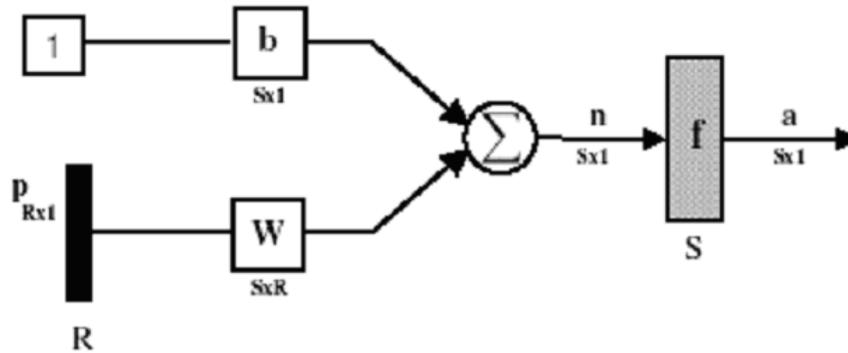


Figura A.1.6. Rede de uma camada com S neurônios, notação matricial.

A.1.4. Múltiplas Camadas de Neurônios

Consideremos uma rede com múltiplas camadas. Cada camada tem sua própria matriz de pesos W , o próprio vetor bias b , um vetor de entrada n e um vetor de saída a . Os índices sobrescritos identificam as camadas. Na figura A.1.7 é mostrada uma rede de 3 camadas com R entradas, S_1 neurônios na primeira camada, S_2 neurônios na segunda camada e S_3 neurônios na terceira camada. As saídas da primeira e segunda camada são entradas para as camadas dois e três respectivamente. Assim, a segunda camada pode ser vista como uma rede de uma camada só, com $R = S_1$ entradas, $S = S_2$ neurônios, e uma matriz de pesos W_2 com dimensão $S_2 \times S_1$.

Uma camada cuja saída seja a saída da rede é chamada de camada de saída. As outras camadas são chamadas de camadas intermediárias. Na figura A.1.7 é mostrada uma rede que tem uma camada de saída (camada 3) e duas camadas intermediárias (camadas 1 e 2).

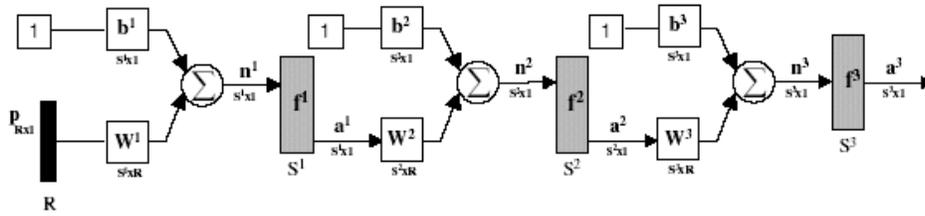


Figura A.1.7. Rede de três camadas.

Logo, a saída a^3 é expressa como:

$$\mathbf{a}^3 = \mathbf{f}^3(\mathbf{W}^3 \mathbf{f}^2(\mathbf{W}^2 \mathbf{f}^1(\mathbf{W}^1 \mathbf{p} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2) + \mathbf{b}^3) \quad (\text{A.1.8})$$

Redes de múltiplas camadas com pelo menos uma camada intermediária com função de ativação não linear do tipo sigmóide são conhecidas como redes MLP “*Multilayer Perceptron*”. Estas redes possuem um alto grau de conectividade.

A.1.5. Estilos de Treinamento

O aprendizado de uma rede é o resultado de apresentações repetidas de um conjunto de amostras (pares entrada-saída) de treinamento à rede. Cada apresentação de todo um conjunto de treinamento durante o processo de aprendizagem é chamada de *época*. O processo de aprendizagem é repetido época após época, até que um determinado critério de parada seja atingido.

Os estilos de treinamento de pesos e bias mais tradicionais são dois. Treinamento local ou incremental, e treinamento em lote ou *batch*. No treinamento local ou incremental os pesos e o bias da rede são atualizados imediatamente após à apresentação de cada entrada à rede. Entretanto, no treinamento em lote ou *batch* a atualização de pesos e bias da rede são feito só depois que todas as entradas forem apresentadas à rede (*época*).

A eficiência dos dois métodos depende do problema a ser tratado. Para maior detalhe consultar referência (HAYKIN, 1999).

A.1.6. Treinamento de Redes de Múltiplas Camadas

O processo de treinamento tem como propósito determinar e/ou selecionar os parâmetros da rede, pesos e bias, para um determinado problema. Originalmente, as redes de múltiplas camadas foram treinadas utilizando-se o algoritmo conhecido como *backpropagation*. Este algoritmo consiste basicamente de duas etapas:

Propagação positiva do sinal funcional onde todos os pesos da rede são mantidos fixos;

Propagação do erro em sentido contrário à propagação do sinal funcional, onde os pesos da rede são ajustados baseados no erro, característica pela qual este algoritmo é chamado de retropropagação do erro.

Dada uma rede de múltiplas camadas como a mostrada na figura A.1.7, pode se descrever o modelo mediante a equação A.1.9.

$$\mathbf{a}^{m+1} = \mathbf{f}^{m+1}(\mathbf{W}^{m+1}\mathbf{a}^m + \mathbf{b}^{m+1}) \text{ para } m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (\text{A.1.8})$$

Onde M é o número de camadas da rede, as entradas dos neurônios da primeira camada formam o vetor de entradas e as saídas dos neurônios da última camada são a saída da rede, ou seja: $\mathbf{a}^0 = \mathbf{p}$, $\mathbf{a} = \mathbf{a}^M$

O algoritmo *backpropagation* é um procedimento de otimização baseado no gradiente descendente que tem por objetivo minimizar o erro quadrático médio entre as saídas efetivas e as saídas desejadas.

Um conjunto de Q amostras chamadas padrões de treinamento é fornecido ao algoritmo, da forma: $\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\}$

Onde p_Q e t_Q são as entradas e saídas desejadas da rede respectivamente.

O algoritmo ajusta os parâmetros da rede para minimizar F que é a soma do erro quadrático calculado entre a saída da rede e a saída desejada para os Q padrões de treinamento.

$$F(x) = \sum_{q=1}^Q e_q^T e_q = \sum_{q=1}^Q (t_q - a_q)^T (t_q - a_q) \quad (\text{A.1.10})$$

O erro quadrático médio aproximado para uma única amostra k tem a forma:

$$F_I(x) = (t(k) - a(k))^T (t(k) - a(k)) \quad (\text{A.1.11})$$

A atualização dos pesos e bias podem ser feitas pelas seguintes equações:

$$w_{i,j}^m(k+1) = w_{i,j}^m(k) - \alpha \frac{\partial F_1}{\partial w_{i,j}^m} \quad (\text{A.1.12})$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha \frac{\partial F_1}{\partial w_{i,j}^m} \quad (\text{A.1.12})$$

Onde α é a taxa de aprendizagem.

As derivações parciais das equações acima são facilmente calculadas para uma rede linear com uma única camada, desde que o erro possa ser escrito como uma função linear explícita dos pesos da rede. Entretanto, para uma rede de múltiplas camadas, o erro não é uma função explícita dos pesos nas camadas intermediárias, portanto as mesmas derivadas parciais não são facilmente calculadas, sendo assim é necessário usar a regra da cadeia expressa por:

$$\frac{df(n(w))}{dw} = \frac{df(n)}{dn} \bullet \frac{dn(w)}{dw} \quad (\text{A.1.14})$$

Que, aplicado ao cálculo do gradiente do erro das equações A.1.12 e A.1.13, resulta nas equações A.1.15 e A.1.16.

$$\frac{\partial F_1}{\partial w_{i,j}^m} = \frac{\partial F_1}{\partial n_i^m} \bullet \frac{\partial n_i^m}{\partial w_{i,j}^m} \quad (\text{A.1.15})$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial b_i^m} = \frac{\partial F_1}{\partial n_i^m} \bullet \frac{\partial n_i^m}{\partial b_{i,j}^m} \quad (\text{A.1.16})$$

Da entrada total para a camada m:

$$n_i^m = \sum_{j=1}^{s^{m-1}} w_{i,j}^m a_j^{m-1} + b_i^m \quad (\text{A.1.17})$$

É calculado:

$$\frac{\partial n_i^m}{\partial w_{i,j}^m} = a_j^{m-1} \quad (\text{A.1.18})$$

$$\frac{\partial n_i^m}{\partial b_i^m} = 1 \quad (\text{A.1.19})$$

A sensibilidade de F_1 às mudanças da entrada total no neurônio i da camada m , é definida de acordo à equação A.1.20.

$$s_i^m = \frac{\partial F_1}{\partial n_i^m} \quad (\text{A.1.20})$$

Assim, de A.1.15, A.1.16, A.1.18, A.1.19 e A.1.20 são deduzidas as equações A.1.21 e A.1.22.

$$\frac{\partial F_1}{\partial w_{i,j}^m} = s_i^m a_j^{m-1} \quad (\text{A.1.21})$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial b_i^m} = s_i^m \quad (\text{A.1.22})$$

Portanto, as equações de atualização de pesos e bias aproximadas são expressas pelas equações A.1.23 e A.1.24.

$$w_{i,j}^m(k+1) = w_{i,j}^m(k) - \alpha s_i^m a_j^{m-1} \quad (\text{A.1.23})$$

$$b_i^m(k+1) = b_i^m(k) - \alpha s_i^m \quad (\text{A.1.24})$$

Em forma matricial:

$$W^m(k+1) = W^m(k) - \alpha s^m (a^{m-1})^T \quad (\text{A.1.25})$$

$$b^m(k+1) = b^m(k) - \alpha s^m \quad (\text{A.1.26})$$

O cálculo das sensibilidades é realizado (retropropagação), iniciando pela última camada e sendo propagadas por toda a rede até a primeira camada.

$$S^M \rightarrow S^{M-1} \rightarrow \Lambda \rightarrow S^2 \rightarrow S^1$$

Assim:

$$S^M = 2F^{M,M}(n^M)(t-a) \quad (\text{A.1.27})$$

$$S^m = F^{m,m}(n^m) (W^{m+1})^T S^{m+1}, m = M-1, \dots, 2 \quad (\text{A.1.28})$$

Onde:

$$F^m(n^m) = \begin{bmatrix} f'^m(n_1^m) & 0 & K & 0 \\ 0 & f'^m(n_2^m) & K & 0 \\ M & M & & M \\ 0 & 0 & K & f'^m(n_{S^m}^m) \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.29})$$

Para a derivação do resultado da equação A.1.29 ver referência (HAGAN, 1996). O algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt é também uma alternativa para minimizar o erro quadrático entre as saídas efetivas da rede e as saídas desejadas. Enquanto o *back-propagation* padrão utiliza a descida de gradiente como método de aproximação do mínimo da função erro, o algoritmo de Levenberg-Marquardt utiliza uma aproximação pelo método de Newton (LJUNG,2001). Esta aproximação é obtida a partir da modificação do método de Gauss-Newton introduzindo-se o parâmetro μ , conforme a equação:

$$\Delta w = -[J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (\text{A.1.30})$$

Onde J^T é a matriz identidade, e e é o erro calculado entre a saída da rede e a saída desejada e J é a matriz Jacobiana.

O parâmetro μ é multiplicado por um fator (β) toda vez que um passo resultar num aumento na função erro, que se deseja minimizar. Quando um passo resultar na diminuição do erro, μ é dividido pelo fator β . Isto significa dizer que, se houver uma convergência para o mínimo da função, μ é pequeno e o algoritmo se aproxima do método de Newton (passo $1/\mu$); no caso de não haver convergência, o método se aproxima da descida de gradiente. Assim, o parâmetro μ funciona como um fator de estabilização do treinamento, ajustando a aproximação de forma a utilizar a rápida convergência do método de Newton e evitando passos muito grandes que possam levar a um erro de convergência.

Assim, o algoritmo atualiza os pesos com base na equação A.1.31:

$$W^m(k+1) = W^m(k) - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e(k) \quad (\text{A.1.31})$$

A.1.7. Capacidade de Aproximação das Redes de Múltiplas Camadas

Embora o algoritmo *backpropagation* possa ser aplicado para redes com qualquer número de camadas, mostra-se que uma única camada intermediária é suficiente para aproximar uma função com descontinuidades finitas e precisão arbitrária (BAUCHSPIESS *et al*, 1997) e (PEDROSA,1999). Isto é, elas aproximam qualquer função não linear dado um conjunto de amostras suficientemente representativo da função, desde que utilizem-se funções de ativação não lineares nas unidades intermediárias (*the universal approximation theorem*). Assim, na maioria das aplicações é usada uma rede *feedforward* com uma única camada de unidades intermediárias com funções de ativação sigmoideal para as unidades.

Consideremos o exemplo dado na referência (NORGAARD *et al*, 2001) para observar a capacidade de aproximação de uma rede de duas camadas. Na figura A.1.8 é mostrada uma rede 1-2-1 com funções de transferência logística e linear para as duas camadas respectivamente (Equações A.1.32 e A.1.33):

$$f^1(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (\text{A.1.32})$$

$$f^2(n) = n \quad (\text{A.1.33})$$

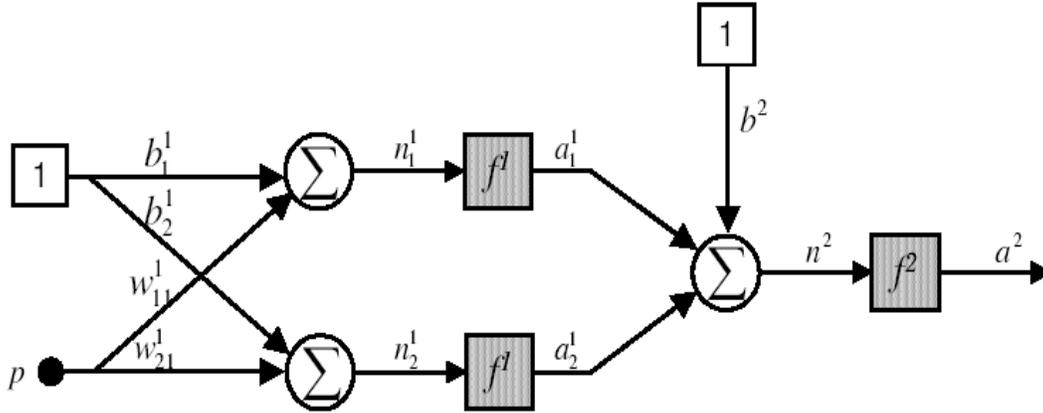


Figura A.1.8. Rede para aproximação de funções

Os valores nominais dos pesos e bias considerados para esta rede são os seguintes:

$$w_{1,1}^1 = 10, w_{2,1}^1 = 10, b_1^1 = -10, b_2^1 = 10, w_{1,1}^2 = 1, w_{1,2}^2 = 1, b^2 = 0.$$

A figura A.1.9 mostra a resposta da rede para estes parâmetros, o traçado da saída da rede a^2 e da entrada p varia no intervalo $[-2,2]$. Observe que a resposta consiste em dois níveis, um para cada um dos neurônios da primeira camada (HAGAN, 1999).

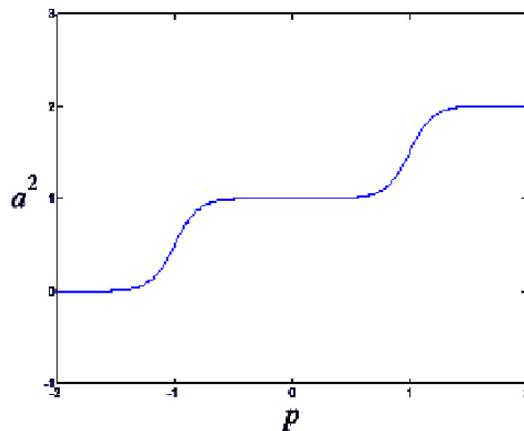


Figura A.1.9. Resposta da rede da figura A.1.8.

Ajustando os parâmetros da rede pode-se mudar a forma e o lugar de cada nível. Os centros dos níveis ocorrem onde a rede de entrada para um neurônio na primeira camada

$$n_1^1 = w_{1,1}^1 p + b_1^1 = 0 \quad p = -\frac{b_1^1}{w_{1,1}^1} = -\frac{-10}{10} = 1,$$

$$n_2^1 = w_{2,1}^1 p + b_2^1 = 0 \quad p = -\frac{b_2^1}{w_{2,1}^1} = \frac{-10}{10} = -1$$

A inclinação de cada nível também pode ser ajustada mudando os pesos da rede. A figura A.1.10 ilustra os efeitos das mudanças de parâmetros da resposta da rede. A resposta nominal é similar à da figura A.1.9, As outras curvas correspondem às respostas da rede quando os parâmetros são variados nos seguintes limites:

$$-1 \leq w_{1,1}^2 \leq 1, \quad -1 \leq w_{1,2}^2 \leq 1, \quad 0 \leq b_2^1 \leq 20, \quad -1 \leq b^2 \leq 1$$

A figura A.1.10(a) mostra como os bias da rede na primeira camada (intermediária) podem ser usados para alocar a posição dos níveis. As figuras A.1.10 (b) e A.1.10 (c) ilustram como os pesos determinam a inclinação dos níveis. O bias da segunda camada (saída) desloca a resposta inteira da rede para cima ou para baixo, como pode se ver na figura A.1.10 (d).

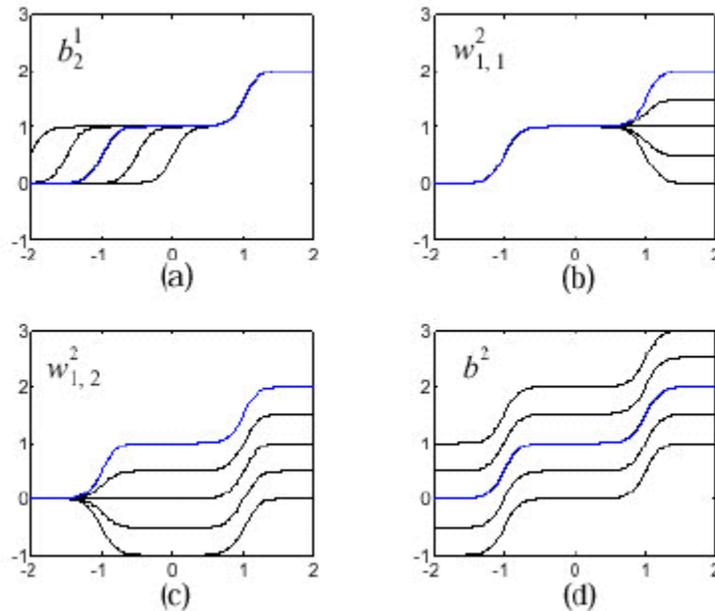


Figura A.1.10. Efeito da variação dos parâmetros na resposta da rede.

Neste exemplo pode se ver a flexibilidade da rede de múltiplas camadas. Este exemplo sugere ao leitor que com o uso de tais redes pode-se aproximar uma enormidade de funções desde que haja um número suficiente de neurônios na camada intermediária.

De fato, observou-se que uma rede com duas camadas, com funções de transferência sigmoidais na camada intermediária e linear na camada de saída, pode aproximar qualquer função de interesse com certo grau de exatidão, desde que unidades suficientes intermediárias estejam disponíveis. Cybenko, na referência (CYBENCO, 1989), afirma que uma rede MLP com uma única camada intermediária é capaz de realizar uma aproximação de função uniforme. Em Hornik, Stinchcombe e White (HORNIK, 1989), apresentam uma prova de que as redes MLP, com função de transferência sigmoideal na camada intermediária e função de transferência linear na camada de saída, são aproximadores universais, e Andrew Barron na referência (BARRON, 1992) mostra os seus resultados obtidos e defendem que as aproximações da rede neural com uma camada intermediária podem requerer menos parâmetros do que as técnicas convencionais. Pinkus dá uma revisão mais recente da potencialidade de aproximação de redes neurais na referência (PINKUS, 1999). Niyogi e Girosi, na referência (NIYOGI, 1999), desenvolvem limites no erro da aproximação de funções quando a rede é treinada com dados ruidosos.

A.1.8. Desenvolvimento de Aplicações

Os passos necessários para o desenvolvimento de aplicações utilizando redes neurais artificiais são os seguintes:

Primeiro passo: Coleta de dados

O primeiro passo do processo de desenvolvimento de redes neurais artificiais é a coleta de dados relativas ao problema. Os dados coletados devem ser significativos e cobrir amplamente o domínio do problema; não devem cobrir apenas as operações normais ou rotineiras, mas também as exceções e as condições nos limites do domínio do problema.

Segundo passo: Separação em conjuntos

O segundo passo do processo é a separação dos dados coletados em duas categorias bem definidas: dados de treinamento, que serão utilizados para o treinamento da rede, e dados de teste, que serão utilizados para verificar seu desempenho sob condições reais de utilização. Além dessa divisão, pode-se usar também uma subdivisão do conjunto de treinamento, criando um conjunto de validação, utilizado para verificar a eficiência da rede quanto a sua capacidade de generalização durante o treinamento, e podendo ser empregado como critério de parada do treinamento. (BISHOP, 1995)

Depois de determinados estes conjuntos, eles são geralmente colocados em ordem aleatória para prevenção de tendências associadas à ordem de apresentação dos dados. Além disso, pode ser necessário pré-processar estes dados, através de normalizações, escalonamentos e conversões de formato para torná-los mais apropriados à sua utilização na rede.

Terceiro passo: Configuração da rede

O terceiro passo é a definição da configuração da rede, que pode ser dividido em três etapas:

- Seleção do paradigma neural apropriado à aplicação.
- Determinação da topologia da rede a ser utilizada - o número de camadas, o número de unidades em cada camada, etc.
- Determinação de parâmetros do algoritmo de treinamento e funções de ativação.

Este passo tem um grande impacto na performance do sistema resultante.

Existem metodologias, "dicas" e "truques" na condução destas tarefas. Porém, normalmente estas escolhas são feitas de forma empírica.

Quarto passo: Treinamento da rede

O quarto passo é o treinamento da rede. Nesta fase, seguindo o algoritmo de treinamento escolhido, serão ajustados os pesos das conexões. É importante que os valores iniciais dos pesos da rede pode diminuir o tempo necessário para o treinamento. Normalmente, os valores iniciais dos pesos da rede são números aleatórios uniformemente distribuídos, em um intervalo definido.

A escolha errada destes pesos pode levar a uma saturação prematura. Quanto ao modo de treinamento, dependerá do problema a ser tratado. Uma boa característica do modo “*batch*” é que se tem uma melhor estimativa do vetor gradiente, o que torna o treinamento mais estável. Quanto ao tempo de treinamento, vários fatores podem influenciar a sua duração.

Porém, sempre será necessário utilizar algum critério de parada. O critério de parada do algoritmo “*backpropagation*” não é bem definido, e geralmente é utilizado um número máximo de ciclos. Mas, devem ser consideradas a taxa de erro médio por ciclo, e a capacidade de generalização da rede. Pode ocorrer que em um determinado instante do treinamento a generalização comece a degenerar, causando o problema de “*over-training*”, ou seja a rede diminui o erro médio do conjunto de dados do treinamento mas perde a capacidade de generalização.

O treinamento deve ser interrompido quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena, ou seja menor que um erro admissível. Assim, deve-se encontrar um ponto ótimo de parada com erro mínimo e capacidade de generalização máxima.

Quinto passo: Teste da rede

O quinto passo é o teste da rede. Durante esta fase o conjunto de teste é utilizado para determinar o desempenho da rede com dados que não foram previamente utilizados. O

desempenho da rede, medida nesta fase, é uma boa indicação de seu desempenho real.

Devem ser considerados ainda outros testes como análise do comportamento da rede utilizando entradas especiais e análise dos pesos atuais da rede, pois se existirem valores muito pequenos, as conexões associadas podem ser consideradas insignificantes e assim serem eliminadas (“*prunning*”). De modo inverso, valores substancialmente maiores que os outros poderiam indicar que houve “*over-training*” da rede.

Sexto passo: Integração da rede

Finalmente, com a rede treinada e avaliada, ela pode ser integrada em um sistema do ambiente operacional da aplicação. Para maior eficiência da solução, este sistema deverá conter facilidades de utilização como interface conveniente e facilidades de aquisição de dados através de planilhas eletrônicas, interfaces com unidades de processamento de sinais, ou arquivos padronizados. Uma boa documentação do sistema e o treinamento de usuários são necessários para o sucesso do mesmo.

Além disso, o sistema deve periodicamente monitorar seu desempenho e fazer a manutenção da rede quando for necessário, ou indicar aos projetistas a necessidade de retreinamento.

Anexo 2

-Métodos de Minimização -

A.2.1. Algoritmo de Levenberg-Marquardt

Visando minimizar o erro quadrático médio entre as saídas efetivas e as saídas desejadas, alguns algoritmos trabalham em conjunto com o backpropagation. Dentre eles, destaca-se o algoritmo Levenberg-Marquardt, que calcula as derivadas de segunda ordem do erro quadrático em relação aos pesos, o que vale dizer o mesmo que derivar o algoritmo backpropagation tradicional. Esta ação faz com que o treinamento seja mais rápido. Este algoritmo utiliza-se da matriz jacobiana para o cálculo da matriz hessiana, nos mesmos moldes do método Quasi-Newton, conforme (BARBOSA, 2005):

$$H = \frac{\partial^2 E_R(W)}{\partial W^2} \quad \text{A.2.1}$$

$$J = \frac{\partial e(W)}{\partial W} \quad \text{A.2.2}$$

sendo $e(W)$ definido como:

$$e(W) = \sum_{i=1}^n (y_i - y_d) \quad \text{A.2.3}$$

y_i representa a saída calculada e y_d a saída desejada.

O treinamento da rede neural depende da soma dos erros quadráticos, sendo assim, a matriz hessiana é calculada usando a matriz jacobiana como artifício, já que esta última é de cálculo mais simples:

$$H = J^T(W)J(W) \quad \text{A.2.4}$$

Os pesos são atualizados como é feito no método de Newton:

$$W(k+1) = W(k) - H^{-1}g_k$$

A.2.5

A parcela g_k vale:

$$g_k = 2J^T(W)e(W) \tag{A.2.6}$$

Combinando as equações anteriores, o algoritmo de Levenberg-Marquardt, atualiza os seus pesos, conforme a seguir:

$$W(k+1) = W(k) - [J^T(W)J(W) + \mu_k I]^{-1} J^T(W)e(W)$$

Sendo I a matriz identidade e μ_k a constante do algoritmo em questão (BARBOSA, 2005)

A.2.2. Algoritmo Backpropagation resiliente (RPROP)

O Rprop (Backpropagation resiliente) é um eficiente esquema de aprendizagem que executa a adaptação direta da atualização dos pesos sinápticos baseado na informação do gradiente local. Uma diferença crucial em relação ao algoritmo anterior é que o esforço da adaptação não é prejudicado pelo comportamento do gradiente. Para diminuir esse comportamento, é introduzido um valor de atualização Δ_{ij} para cada peso sináptico, que determina unicamente a amplitude da atualização do peso. Essa atualização adaptativa evolui durante o processo de treinamento baseada na visão local da função objetivo, E , de acordo com a seguinte regra de aprendizagem (RIEDMILLER, 1993):

$$\Delta_{ij}^{(t)} = \begin{cases} \eta^+ * \Delta_{ij}^{(t-1)} & \text{se } \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} > 0 \\ \eta^- * \Delta_{ij}^{(t-1)} & \text{se } \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} < 0 \\ \Delta_{ij}^{(t-1)} & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A.2.7

onde $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$ e t representa o número de épocas no treinamento em lote.

Seguindo a regra anterior, toda vez que a derivada parcial correspondente ao peso w_{ij} muda seu sinal em relação ao passo de tempo anterior, indica que a última atualização foi muito alta e o algoritmo passou por um mínimo local; então o valor de atualização Δ_{ij} é decrescido pelo fator de η^- . Caso a derivada mantenha o mesmo sinal, o valor atualização é incrementado de forma a acelerar a convergência.

Uma vez que o valor de atualização, Δ_{ij} , para cada peso é adaptado, a atualização dos pesos segue uma regra simples: se a derivada for positiva (aumentando o erro), o peso será reduzido pelo seu valor de atualização; caso a derivada seja negativa, o valor de atualização passará então a ser positivo (Riedmiller, 1993):

$$\Delta w_{ij}^{(t)} = \begin{cases} -\Delta_{ij}^{(t)} & \text{se } \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} > 0 \\ +\Delta_{ij}^{(t)} & \text{se } \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} < 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A.2.8

$$w_{ij}^{(t+1)} = w_{ij}^{(t)} + \Delta w_{ij}^{(t)}$$

A.2.9

No entanto, existe uma exceção: se a derivada parcial trocar de sinal, isto é o passo anterior for grande demais e o mínimo foi ultrapassado, então atualização do peso, Δw_{ij} , é revertido:

$$\Delta w_{ij}^{(t)} = -\Delta w_{ij}^{(t-1)} \text{ se } \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial w_{ij}} * \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} < 0 \quad \text{A.2.10}$$

Por causa disso, a derivada supostamente deverá mudar seu sinal novamente no passo seguinte, para evitar que ocorra uma punição novamente do valor de atualização, não deve haver adaptação do valor de atuação no passo posterior, e uma forma prática de evitar

isso é fazendo com que $\frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial w_{ij}} = 0$.

Os valores de atualização e os pesos somente são modificados depois que todo o conjunto de treinamento é apresentado à rede, o que caracteriza aprendizagem por lote ou batch (RIEDMILLER, 1993).

Inicialmente, todos o valores de ajuste são iguais à constante Δ_0 , que é um dos parâmetros do Rprop. Desde que Δ_0 determina diretamente a amplitude do primeiro ajuste dos pesos, ele pode ser escolhido de acordo com a magnitude dos pesos iniciais, por exemplo $\Delta_0=0,1$ (RIEDMILLER, 1993). A escolha desse valor não é crítica, já que seu valor é adaptado enquanto o treinamento ocorre (SILVA, 2002).

No treinamento da rede através do algoritmo Rprop, a fim de se evitar uma variação excessiva dos pesos, define-se um parâmetro para o valor máximo de ajuste, Δ_{\max} . De forma a evitar esse fenômeno o valor $\Delta_{\max} = 50$ foi sugerido por (RIEDMILLER, 1993). Os fatores de acréscimo e decréscimo são fixados em $\eta+=1,2$ e $\eta-=0,5$. Estes valores são baseados em considerações teóricas e empíricas. Sendo assim o número de parâmetros fica reduzido a dois, Δ_0 e Δ_{\max} (Riedmiller, 1993) e (Silva, 2002).

Anexo 3

-Tabelas do Reator PWR-

O Livro de Dados do Reator de Angra II (2PPR-11) apresenta os parâmetros operacionais relacionados a reatividade do reator dividido em 6 patamares de Queima. Para o ciclo atual esses patamares são estabelecidos em dias efetivos a plena potência (*EFPD – Effective Full Power Day*). Um dia efetivo a plena potência corresponde a uma queima de combustível de aproximadamente 36,4 KWd/KgU. A tabela A.3.1 mostra os patamares que são referidos no 2PPR-11, cujas tabelas e figuras são utilizadas para prever os estados operacionais do reator, bem como descrever se a evolução do ciclo de queima do combustível esta ocorrendo de acordo com o projetado.

Tabela A-3.1 Patamares de Queima do Livro de dados do Reator

Conjunto	EFPD	MWD/TMU
1	6	216
2	60	2162
3	120	4325
4	180	6487
5	240	8.663
6	348	12.871

A seguir apresentamos as tabelas de reatividade dos parâmetros que influenciam no balanço de reatividade do processo de criticalização e que foram utilizadas neste trabalho para o desenvolvimento do código computacional que simula o reator no senso da criticalidade.

Tabela A.3.2.A Valor integral do banco de controle D em seqüência (D10+D50+D40+D60) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 6 EFPD (216 MWD/TMU)

Banco D em Seqüência							
D ₁₀		D ₅₀ (D ₁₀ in)		D ₄₀ (D ₁₀ +D ₅₀ in)		D ₆₀ (D ₁₀ +D ₅₀ +D ₄₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-5	10	-361	10	-817	10	-1249
20	-13	20	-373	20	-828	20	-1262
30	-28	30	-425	30	-846	30	-1283
40	-47	40	-490	40	-871	40	-1313
60	-93	60	-493	60	-928	60	-1384
80	-140	80	-550	80	-984	80	-1455
100	-182	100	-602	100	-1036	100	-1519
120	-221	120	-648	120	-1081	120	-1574
140	-254	140	-688	140	-1121	140	-1622
160	-281	160	-722	160	-1155	160	-1661
180	-303	180	-748	180	-1181	180	-1691
200	-320	200	-768	200	-1202	200	-1713
220	-331	220	-782	220	-1215	220	-1729
240	-340	240	-793	240	-1225	240	-1740
260	-344	260	-799	260	-1232	260	-1747
280	-348	280	-804	280	-1236	280	-1752
300	-350	300	-807	300	-1238	300	-1754
320	-352	320	-809	320	-1240	320	-1758
340	-353	340	-810	340	-1241	340	-1757
350	-353	350	-810	350	-1241	350	-1757
360	-353	360	-810	360	-1241	360	-1757
370	-343	370	-810	370	-1241	370	-1757
385	-353	386	-810	385	-1241	385	-1757

Tabela A.3.2.B Valor integral do banco de controle D em seqüência (D10+D50+D40+D60) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 60 EFPD (2162 MWD/TMU)

Banco D em Seqüência							
D ₁₀		D ₅₀ (D ₁₀ in)		D ₄₀ (D ₁₀ +D ₅₀ in)		D ₆₀ (D ₁₀ +D ₅₀ +D ₄₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-7	10	-355	10	-824	10	-1242
20	-19	20	-371	20	-839	20	-1262
30	-38	30	-399	30	-863	30	-1285
40	-62	40	-436	40	-894	40	-1320
60	-119	60	-515	60	-963	60	-1400
80	-170	80	-583	80	-1026	80	-1475
100	-214	100	-640	100	-1078	100	-1537
120	-249	120	-687	120	-1120	120	-1588
140	-278	140	-724	140	-1154	140	-1627
160	-299	160	-753	160	-1179	160	-1657
180	-314	180	-773	180	-1197	180	-1677
200	-325	200	-788	200	-1210	200	-1692
220	-332	220	-798	220	-1218	220	-1701
240	-337	240	-804	240	-1224	240	-1708
260	-339	260	-808	260	-1227	260	-1711
280	-341	280	-811	280	-1230	280	-1714
300	-342	300	-813	300	-1232	300	-1715
320	-343	320	-814	320	-1232	320	-1716
340	-344	340	-815	340	-1232	340	-1717
350	-344	350	-815	350	-1232	350	-1717
360	-344	360	-825	360	-1232	360	-1717
370	-344	370	-815	370	-1232	370	-1717
385	-344	386	-831	385	-1232	385	-1717

Tabela A.3.2.C Valor integral do banco de controle D em seqüência (D10+D50+D40+D60) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 1200 EFPD (4325 MWD/TMU)

Banco D em Seqüência							
D ₁₀		D ₅₀ (D ₁₀ in)		D ₄₀ (D ₁₀ +D ₅₀ in)		D ₆₀ (D ₁₀ +D ₅₀ +D ₄₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-8	10	-358	10	-833	10	-1253
20	-21	20	-376	20	-849	20	-1270
30	-42	30	-407	30	-876	30	-1298
40	-69	40	-446	40	-911	40	-1334
60	-129	60	-529	60	-985	60	-1414
80	-183	80	-601	80	-1050	80	-1487
100	-228	100	-659	100	-1103	100	-1545
120	-263	120	-706	120	-1145	120	-1591
140	-290	140	-743	140	-1176	140	-1626
160	-309	160	-770	160	-1199	160	-1652
180	-322	180	-788	180	-1215	180	-1668
200	-331	200	-801	200	-1226	200	-1680
220	-337	220	-809	220	-1232	220	-1687
240	-341	240	-815	240	-1237	240	-1691
260	-343	260	-818	260	-1239	260	-1694
280	-344	280	-820	280	-1241	280	-1696
300	-345	300	-821	300	-1242	300	-1697
320	-346	320	-822	320	-1242	320	-1698
340	-346	340	-822	340	-1243	340	-1698
350	-346	350	-823	350	-1243	350	-1698
360	-346	360	-823	360	-1243	360	-1698
370	-346	370	-823	370	-1243	370	-1698
385	-346	386	-823	385	-1243	385	-1698

Tabela A.3.2.D Valor integral do banco de controle D em seqüência (D10+D50+D40+D60) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 180 EFPD (6487 MWD/TMU)

Banco D em Seqüência							
D ₁₀		D ₅₀ (D ₁₀ in)		D ₄₀ (D ₁₀ +D ₅₀ in)		D ₆₀ (D ₁₀ +D ₅₀ +D ₄₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-9	10	-361	10	-842	10	-1264
20	-23	20	-380	20	-860	20	-1280
30	-45	30	-411	30	-888	30	-1308
40	-72	40	-450	40	-923	40	-1343
60	-133	60	-533	60	-997	60	-1419
80	-188	80	-606	80	-1064	80	-1488
100	-232	100	-666	100	-1116	100	-1543
120	-267	120	-714	120	-1158	120	-1585
140	-294	140	-752	140	-1189	140	-1618
160	-313	160	-779	160	-1212	160	-1641
180	-326	180	-798	180	-1227	180	-1656
200	-334	200	-811	200	-1237	200	-1667
220	-345	220	-818	220	-1243	220	-1673
240	-347	240	-824	240	-1247	240	-1677
260	-347	260	-827	260	-1250	260	-1679
280	-348	280	-829	280	-1251	280	-1681
300	-348	300	-830	300	-1252	300	-1682
320	-348	320	-831	320	-1253	320	-1682
340	-348	340	-831	340	-1253	340	-1683
350	-348	350	-832	350	-1253	350	-1683
360	-348	360	-832	360	-1253	360	-1683
370	-348	370	-832	370	-1253	370	-1683
385	-348	386	-832	385	-1253	385	-1683

Tabela A.3.2.E Valor integral do banco de controle D em seqüência (D10+D50+D40+D60) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 240 EFPD (8650 MWD/TMU)

Banco D em Seqüência							
D ₁₀		D ₅₀ (D ₁₀ in)		D ₄₀ (D ₁₀ +D ₅₀ in)		D ₆₀ (D ₁₀ +D ₅₀ +D ₄₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-10	10	-362	10	-851	10	-1270
20	-23	20	-381	20	-868	20	-1286
30	-44	30	-411	30	-895	30	-1311
40	-71	40	-449	40	-930	40	-1343
60	-131	60	-530	60	-977	60	-1413
80	-184	80	-603	80	-1002	80	-1475
100	-229	100	-664	100	-1066	100	-1525
120	-264	120	-714	120	-1118	120	-1565
140	-292	140	-753	140	-1160	140	-1595
160	-312	160	-782	160	-1192	160	-1617
180	-325	180	-802	180	-1216	180	-1631
200	-335	200	-817	200	-1232	200	-1641
220	-340	220	-825	220	-1242	220	-1648
240	-344	240	-832	240	-1249	240	-1652
260	-347	260	-835	260	-1253	260	-1654
280	-348	280	-837	280	-1256	280	-1656
300	-349	300	-838	300	-1258	300	-1657
320	-349	320	-839	320	-1258	320	-1657
340	-349	340	-839	340	-1259	340	-1657
350	-350	350	-840	350	-1259	350	-1657
360	-350	360	-840	360	-1259	360	-1658
370	-350	370	-840	370	-1259	370	-1658
385	-350	386	-840	385	-1259	385	-1658

Tabela A.3.2.F Valor integral do banco de controle D em seqüência (D10+D50+D40+D60) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 348 EFPD (12525 MWD/TMU)

Banco D em Seqüência							
D ₁₀		D ₅₀ (D ₁₀ in)		D ₄₀ (D ₁₀ +D ₅₀ in)		D ₆₀ (D ₁₀ +D ₅₀ +D ₄₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-12	10	-382	10	-861	10	-1307
20	-29	20	-404	20	-883	20	-1325
30	-55	30	-438	30	-916	30	-1352
40	-86	40	-480	40	-957	40	-1387
60	-154	60	-567	60	-1041	60	-1457
80	-215	80	-645	80	-1115	80	-1518
100	-263	100	-706	100	-1172	100	-1564
120	-299	120	-754	120	-1215	120	-1599
140	-325	140	-788	140	-1246	140	-1624
160	-343	160	-812	160	-1266	160	-1641
180	-353	180	-826	180	-1278	180	-1651
200	-360	200	-836	200	-1286	200	-1657
220	-363	220	-841	220	-1291	220	-1661
240	-366	240	-844	240	-1293	240	-1663
260	-366	260	-846	260	-1295	260	-1665
280	-368	280	-847	280	-1296	280	-1665
300	-368	300	-847	300	-1296	300	-1666
320	-368	320	-848	320	-1296	320	-1666
340	-368	340	-848	340	-1296	340	-1666
350	-368	350	-848	350	-1296	350	-1666
360	-368	360	-848	360	-1296	360	-1666
370	-368	370	-848	370	-1296	370	-1666
385	-367	386	-845	385	-1294	385	-1664

Tabela A.3.3.A Valor integral do banco de controle D em seqüência (D20+D60+D30+D50) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 6 EFPD (216 MWD/TMU).

Banco D em Seqüência							
D ₂₀		D ₆₀ (D ₂₀ in)		D ₃₀ (D ₂₀ +D ₆₀ in)		D ₅₀ (D ₂₀ +D ₆₀ +D ₃₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-5	10	-316	10	-846	10	-1192
20	-12	20	-328	20	-855	20	-1201
30	-25	30	-348	30	-870	30	-1218
40	-44	40	-376	40	-891	40	-1240
60	-86	60	-442	60	-940	60	-1289
80	-127	80	-511	80	-985	80	-1333
100	-164	100	-573	100	-1025	100	-1371
120	-196	120	-629	120	-1061	120	-1403
140	-224	140	-678	140	-1092	140	-1431
160	-247	160	-721	160	-1118	160	-1454
180	-266	180	-756	180	-1138	180	-1471
200	-280	200	-783	200	-1154	200	-1484
220	-290	220	-803	220	-1164	220	-1493
240	-296	240	-817	240	-1173	240	-1500
260	-301	260	-826	260	-1177	260	-1504
280	-304	280	-833	280	-1181	280	-1507
300	-306	300	-836	300	-1183	300	-1509
320	-308	320	-839	320	-1185	320	-1510
340	-308	340	-840	340	-1186	340	-1511
350	-309	350	-841	350	-1186	350	-1511
360	-309	360	-841	360	-1186	360	-1512
370	-309	370	-841	370	-1187	370	-1512
385	-309	385	-841	385	-1186	385	-1512

Tabela A.3.3.B Valor integral do banco de controle D em seqüência (D₂₀+D₆₀+D₃₀+D₅₀) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 60 EFPD (2162 MWD/TMU).

Banco D em Seqüência							
D ₂₀		D ₆₀ (D ₂₀ in)		D ₃₀ (D ₂₀ +D ₆₀ in)		D ₅₀ (D ₂₀ +D ₆₀ +D ₃₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]
10	-7	10	-327	10	-831	10	-1181
20	-17	20	-342	20	-842	20	-1193
30	-35	30	-368	30	-863	30	-1214
40	-59	40	-402	40	-890	40	-1242
60	-116	60	-481	60	-950	60	-1300
80	-160	80	-557	80	-1002	80	-1351
100	-199	100	-621	100	-1044	100	-1391
120	-231	120	-674	120	-1079	120	-1424
140	-276	140	-717	140	-1107	140	-1450
160	-290	160	-750	160	-1128	160	-1469
180	-300	180	-784	180	-1143	180	-1482
200	-306	200	-792	200	-1154	200	-1492
220	-290	220	-803	220	-1160	220	-1497
240	-310	240	-811	240	-1065	240	-1502
260	-313	260	-816	260	-1068	260	-1504
280	-315	280	-820	280	-1070	280	-1506
300	-316	300	-821	300	-1072	300	-1507
320	-316	320	-823	320	-1072	320	-1508
340	-317	340	-823	340	-1073	340	-1508
350	-317	350	-824	350	-1073	350	-1509
360	-317	360	-824	360	-1073	360	-1509
370	-317	370	-824	370	-1073	370	-1509
385	-317	385	-824	385	-1082	385	-1509

Tabela A.3.3.C Valor integral do banco de controle D em seqüência (D₂₀+D₆₀+D₃₀+D₅₀) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 120 EFPD (4325 MWD/TMU).

Banco D em Seqüência							
D ₂₀		D ₆₀ (D ₂₀ in)		D ₃₀ (D ₂₀ +D ₆₀ in)		D ₅₀ (D ₂₀ +D ₆₀ +D ₃₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]
10	-8	10	-338	10	-817	10	-1174
20	-20	20	-354	20	-830	20	-1187
30	-39	30	-381	30	-852	30	-1209
40	-66	40	-417	40	-881	40	-1238
60	-123	60	-498	60	-945	60	-1298
80	-174	80	-573	80	-1000	80	-1349
100	-215	100	-34	100	-1045	100	-1390
120	-248	120	-684	120	-1080	120	-1422
140	-274	140	-723	140	-1107	140	-1446
160	-292	160	-752	160	-1127	160	-1464
180	-304	180	-771	180	-1141	180	-1475
200	-313	200	-786	200	-1150	200	-1483
220	-318	220	-794	220	-1155	220	-1488
240	-322	240	-800	240	-1160	240	-1491
260	-324	260	-803	260	-1161	260	-1494
280	-326	280	-806	280	-1163	280	-1495
300	-326	300	-807	300	-1164	300	-1496
320	-327	320	-808	320	-1165	320	-1496
340	-327	340	-808	340	-1165	340	-1497
350	-327	350	-809	350	-1165	350	-1497
360	-328	360	-809	360	-1165	360	-1497
370	-328	370	-809	370	-1165	370	-1497
385	-328	385	-809	385	-1165	385	-1497

Tabela A.3.3.D Valor integral do banco de controle D em seqüência (D₂₀+D₆₀+D₃₀+D₅₀) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 180 EFPD (6487 MWD/TMU).

Banco D em Seqüência							
D ₂₀		D ₆₀ (D ₂₀ in)		D ₃₀ (D ₂₀ +D ₆₀ in)		D ₅₀ (D ₂₀ +D ₆₀ +D ₃₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	Δρ [pcm]
10	-8	10	-347	10	-805	10	-1168
20	-21	20	-364	20	-819	20	-1181
30	-42	30	-392	30	-842	30	-1204
40	-69	40	-426	40	-872	40	-1232
60	-128	60	-505	60	-836	60	-1291
80	-180	80	-576	80	-992	80	-1342
100	-223	100	-636	100	-1038	100	-1383
120	-257	120	-683	120	-1074	120	-1415
140	-283	140	-719	140	-1101	140	-1439
160	-301	160	-745	160	-1121	160	-1456
180	-314	180	-764	180	-1135	180	-1467
200	-323	200	-776	200	-1144	200	-1475
220	-328	220	-784	220	-1150	220	-1480
240	-332	240	-789	240	-1154	240	-1483
260	-334	260	-792	260	-1156	260	-1485
280	-335	280	-794	280	-1157	280	-1486
300	-336	300	-795	300	-1158	300	-1487
320	-336	320	-796	320	-1159	320	-1488
340	-336	340	-797	340	-1159	340	-1488
350	-337	350	-797	350	-1160	350	-1488
360	-337	360	-798	360	-1160	360	-1488
370	-337	370	-796	370	-1160	370	-1488
385	-337	385	-796	385	-1160	385	-1488

Tabela A.3.3.E Valor integral do banco de controle D em seqüência (D₂₀+D₆₀+D₃₀+D₅₀) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 240 EFPD (8663 MWD/TMU).

Banco D em Seqüência							
D ₂₀		D ₆₀ (D ₂₀ in)		D ₃₀ (D ₂₀ +D ₆₀ in)		D ₅₀ (D ₂₀ +D ₆₀ +D ₃₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-9	10	-357	10	-787	10	-1156
20	-22	20	-373	20	-802	20	-1169
30	-42	30	-399	30	-824	30	-1190
40	-69	40	-432	40	-853	40	-1217
60	-127	60	-504	60	-915	60	-1273
80	-180	80	-571	80	-971	80	-1323
100	-224	100	-625	100	-1017	100	-1363
120	-259	120	-670	120	-1055	120	-1395
140	-287	140	-704	140	-1084	140	-1419
160	-308	160	-730	160	-1106	160	-1438
180	-321	180	-747	180	-1120	180	-1450
200	-331	200	-759	200	-1031	200	-1458
220	-337	220	-767	220	-1037	220	-1463
240	-341	240	-722	240	-1041	240	-1467
260	-343	260	-775	260	-1044	260	-1469
280	-345	280	-773	280	-1046	280	-1470
300	-346	300	-778	300	-1046	300	-1471
320	-346	320	-779	320	-1047	320	-1472
340	-347	340	-779	340	-1047	340	-1472
350	-347	350	-780	350	-1048	350	-1472
360	-309	360	-780	360	-1049	360	-1473
370	-309	370	-780	370	-1048	370	-1473
385	-309	385	-780	385	-1048	385	-1473

Tabela A.3.3.F Valor integral do banco de controle D em seqüência (D₂₀+D₆₀+D₃₀+D₅₀) em função da altura do núcleo, em função da queima do ciclo - 348 EFPD (12871 MWD/TMU).

Banco D em Seqüência							
D ₂₀		D ₆₀ (D ₂₀ in)		D ₃₀ (D ₂₀ +D ₆₀ in)		D ₅₀ (D ₂₀ +D ₆₀ +D ₃₀ in)	
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-11	10	-376	10	-782	10	-1167
20	-27	20	-394	20	-799	20	-1182
30	-52	30	-423	30	-826	30	-1205
40	-82	40	-458	40	-859	40	-1232
60	-149	60	-553	60	-931	60	-1289
80	-209	80	-600	80	-994	80	-1338
100	-257	100	-653	100	-1045	100	-1376
120	-294	120	-693	120	-1083	120	-1405
140	-320	140	-722	140	-1111	140	-1424
160	-338	160	-742	160	-1130	160	-1438
180	-349	180	-754	180	-1141	180	-1446
200	-356	200	-762	200	-1149	200	-1451
220	-359	220	-766	220	-1153	220	-1454
240	-362	240	-769	240	-1155	240	-1456
260	-363	260	-770	260	-1157	260	-1457
280	-364	280	-771	280	-1158	280	-1457
300	-364	300	-772	300	-1158	300	-1458
320	-365	320	-772	320	-1158	320	-1458
340	-365	340	-772	340	-1158	340	-1458
350	-365	350	-772	350	-1158	350	-1458
360	-365	360	-772	360	-1158	360	-1458
370	-365	370	-771	370	-1158	370	-1458
385	-363	385	-769	385	-1156	385	-1456

Tabela A.3.4 Valor Integral do Banco de Controle L+D em função da Altura do Núcleo e da Queima do Ciclo

Queima (MWD/TMU)	216	2162	4325	6497	8650	12525
Concentração de Xe.	Xe=0	Xe=Equilíbrio de HFP				
Ciclo (EFPD)	6	60	120	180	240	348
Passo de Inserção (cm)	$\Delta\rho$ [pcm]	$\Delta\rho$ [pcm]	$\Delta\rho$ [pcm]	$\Delta\rho$ [pcm]	$\Delta\rho$ [pcm]	$\Delta\rho$ [pcm]
10	-84	-118	-133	-141	-141	-176
20	-190	-260	-294	-309	-307	-381
30	-325	-435	-491	-511	-500	-627
40	-446	-580	-653	-675	-658	-837
60	-603	-747	-838	-867	-849	-1110
80	-708	-844	-943	-977	-966	-1278
100	-802	-924	-1026	-1066	-1063	-1411
120	-894	-999	-1103	-1147	-1152	-1525
140	-991	-1078	-1183	-1231	-1242	-1635
160	-1095	-1160	-1265	-1317	-1335	-1742
180	-1215	-1257	-1361	-1415	-1440	-1856
200	-1352	-1369	-1470	-1527	-1559	-1978
220	-1520	-1510	-1607	-1666	-1705	-2123
240	-1730	-1689	-1783	-1842	-1889	-2301
260	-2011	-1936	-2024	-2085	-2140	-2541
280	-2400	-2287	-2368	-2431	-2496	-2883
300	-2976	-2823	-2897	-2961	-3041	-3410
320	-3864	-3667	-2897	-3804	-3897	-4257
340	-5250	-5009	-5072	-5146	-5253	-5616
350	-6149	-5881	-5940	-6013	-6124	-6600
360	-7063	-6787	-6840	-6907	-7009	-7404
370	-7235	-7226	-7258	-7297	-7321	-7494
385	-7222	-7206	-7234	-7267	-7288	-7436

Tabela A.3.5.A Valor integral da reatividade do boro em função da concentração de boro, temperatura do moderador e queima do ciclo - 6 EFPD (216 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Temperatura do Moderador °C				
CB (ppm)	50	100	200	295,1	309,7
10	0	0	0	0	0
200	-2118	-2050	-1849	-1565	-1492
400	-4323	-4183	-3774	-3175	-3045
600	-6507	-6296	-5680	-4779	-4584
800	-8670	-8390	-7569	-6369	-6109
1000	-10816	-10466	-9442	-7946	-7622
1200	-12944	-12526	-11299	-9509	-9122
1400	-14326	-14570	-13142	-11060	-10609
1600	-17152	-16598	-14972	-12599	-12082

Tabela A.3.5.B Valor integral da reatividade do boro em função da concentração de boro, temperatura do moderador e queima do ciclo - 60 EFPD (2162 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Temperatura do Moderador °C				
CB (ppm)	50	100	200	295,1	309,7
10	0	0	0	0	0
200	-2143	-2070	-1863	-1564	-1500
400	-4373	-4224	-3801	-3192	-3061
600	-6578	-6356	-5719	-4804	-4607
800	-8763	-8467	-7619	-6400	-6138
1000	-10928	-10560	-9502	-7982	-7656
1200	-13076	-12635	-11370	-9550	-9161
1400	-15206	-14893	-13222	-11107	-10653
1600	-17319	-16735	-15059	-12650	-12133

Tabela A.3.5.C Valor integral da reatividade do boro em função da concentração de boro, temperatura do moderador e queima do ciclo - 120 EFPD (4325 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Temperatura do Moderador °C				
CB (ppm)	50	100	200	295,1	309,7
10	0	0	0	0	0
200	-2180	-2104	-1890	-1585	-1520
400	-4445	-4291	-3855	-3236	-3103
600	-6685	-6454	-5799	-4868	-4669
800	-8904	-8595	-7723	-6484	-6220
1000	-11101	-10717	-9630	-8086	-7755
1200	-13280	-12820	-11520	-9673	-9279
1400	-15439	-14906	-13394	-11247	-10788
1600	-17582	-16974	-15252	-12808	-12886

Tabela A.3.5.D Valor integral da reatividade do boro em função da concentração de boro, temperatura do moderador e queima do ciclo - 180 EFPD (6487 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Temperatura do Moderador °C				
CB (ppm)	50	100	200	295,1	309,7
10	0	0	0	0	0
200	-2224	-2146	-1926	-1616	1550
400	-4535	-4375	-3927	-3297	3163
600	-6819	-6573	5907	-4960	-4759
800	-9080	-8761	-7869	-6606	-6338
1000	-11319	-10922	-9765	-8236	-7903
1200	-13538	-13063	-11730	-9852	-9453
1400	-15737	-15185	-13636	-11454	-10990
1600	-17918	-17289	-15526	-13041	-12513

Tabela A.3.5.E Valor integral da reatividade do boro em função da concentração de boro, temperatura do moderador e queima do ciclo - 240 EFPD (8663 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Temperatura do Moderador °C				
CB (ppm)	50	100	200	295,1	309,7
10	0	0	0	0	0
200	-2275	-2194	-1970	-1655	-1588
400	-4639	-4474	-4017	-3377	-3241
600	-6975	-6728	-6041	5080	-4876
800	-9288	-6959	-8044	-6765	-6494
1000	-11577	-11168	-10029	-8434	-8097
1200	-13846	-13336	-11994	-10088	-9685
1400	-16093	-15525	-13942	-11727	-11258
1600	-18332	-17675	-15874	-13332	-12818

Tabela A.3.5.F Valor integral da reatividade do boro em função da concentração de boro, temperatura do moderador e queima do ciclo - 348 EFPD (12871 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Temperatura do Moderador °C				
CB (ppm)	50	100	200	295,1	309,7
10	0	0	0	0	0
200	-2377	-2292	-2057	-1732	-1663
400	-4845	-4671	-4194	-3531	-3392
600	-7283	-7023	-6305	-5311	-5100
800	-9695	-9349	-7395	-7071	-6790
1000	-12083	-11651	-10463	-8813	-8464
1200	-14446	-13931	-12510	-10538	-10121
1400	-16789	-16190	-14539	-12247	-11763
1600	-19109	-18428	-16550	-13940	-13389

Tabela A.3.6 Valor integral da reatividade de potência (doppler) em função da potência do reator e da queima do combustível.

$\Delta\rho$ (pcm)	Queima do Combustível (MWd/TMU)					
$\Delta\rho$ (pcm)	Queima do Combustível (MWd/TMU)					
Potência Nuclear (%)	216	2162	4325	6487	8650	12525
0	0	0	0	0	0	0
20	-395	-418	-439	-446	-447	-499
40	-715	-752	-787	-802	-808	-904
60	-1006	-1053	-1100	-1124	-1140	-1276
80	-1291	-1345	-1404	-1440	-1472	-1644
100	-1578	-1641	-1714	-1766	-1817	-2029

Tabela A.3.7.A Valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo - 6 EFPD (216 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Concentração de Boro (ppm)						
TM °C	10	200	400	600	800	1000	1200
309,7	0	0	0	0	0	0	0
295,1	+651	+587	+521	+456	+391	+327	+264
200	+3265	+2907	+2537	+2169	+1806	+1445	+1087
100	+4849	+4291	+3711	+3137	+2569	+2004	+1445
50	+5414	+4788	+4137	+3492	+2853	+2220	1592

Tabela A.3.7.B Valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo - 60 EFPD (2162 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Concentração de Boro (ppm)						
TM °C	10	200	400	600	800	1000	1200
309,7	0	0	0	0	0	0	0
295,1	+661	+597	+531	+465	+400	+335	+272
200	+3306	+2943	+2567	+2194	+1825	+1460	+1098
100	+4897	+4291	+3724	+3198	+2568	+1993	+1423
50	+5462	+4819	+4151	+3490	+2837	+2190	+1547

Tabela A.3.7.C Valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo - 120 EFPD (4325 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Concentração de Boro (ppm)						
TM °C	10	200	400	600	800	1000	1200
309,7	0	0	0	0	0	0	0
295,1	+677	+612	+545	+478	+412	+347	+283
200	+3382	+3012	+2630	+2251	+1878	+1507	+1140
100	+5009	+4425	+3820	+3223	+2633	+2047	+1466
50	+5585	+4927	+4244	+3569	+2901	+2239	+1584

Tabela A.3.7.D Valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo - 180 EFPD (6487 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Concentração de Boro (ppm)						
TM °C	10	200	400	600	800	1000	1200
309,7	0	0	0	0	0	0	0
295,1	+689	+624	+555	+488	+421	+356	+290
200	+3442	+3066	+2678	2294	+1914	+1538	+1165
100	+5099	+4703	3886	+3278	+2676	+2080	+1489
50	+5687	+5013	+4315	+3627	+2945	+1171	+1603

Tabela A.3.7.E Valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo - 240 EFPD (8663 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Concentração de Boro (ppm)						
TM °C	10	200	400	600	800	1000	1200
309,7	0	0	0	0	0	0	0
295,1	+705	+638	+569	+501	+434	+367	+301
200	+3521	+3140	+2745	+2356	+1971	+1589	1211
100	+5221	+4616	+3988	+3369	+2727	+2150	+1550
50	+5828	+5141	+4430	+3729	+3034	+2348	+1667

Tabela A.3.7.F Valor integral da reatividade da temperatura do moderador em função da temperatura, concentração de boro e queima do ciclo - 348 EFPD (12871 MWD/TMU).

$\Delta\rho$ (pcm)	Concentração de Boro (ppm)						
TM °C	10	200	400	600	800	1000	1200
309,7	0	0	0	0	0	0	0
295,1	+746	+677	+606	+535	+465	+397	+329
200	+3724	+3330	+2922	+2519	+2119	+1725	+1335
100	+5526	+4897	+4247	+3603	+2967	+2338	+1716
50	+6169	+5455	+4716	+3986	+3264	2550	1884

Tabela A.3.8 Valor integral da reatividade do xenônio após a partida do reator para diversos níveis de potência..

$\Delta\rho$ [pcm]	Potência Nuclear				
Tempo (Horas)	10%	30%	50%	82%	100%
0	0	0	0	0	0
1	-7	-18	-35	-55	-66
2	-21	-51	-99	-155	-184
3	-40	-98	-185	-284	-334
4	-64	-153	-256	-432	-603
5	-91	-216	-397	-588	-679
6	-120	-283	-513	-748	-857
7	-151	-353	-631	-907	-1031
8	-184	-424	-749	-1062	-1199
9	-217	-496	-865	-1210	-1359
10	-250	-567	-978	-1351	-1508
11	-283	-637	-1086	-1483	-1648
12	-315	-705	-1189	-1607	-1777
13	-347	-771	-1286	-1722	-1896
14	-379	-834	-1378	-1828	-2005
15	-409	-894	-1464	-1925	-2105
16	-438	-952	-1544	-2015	-2196
17	-466	-1006	-1619	-2097	-2279
18	-493	-1058	-1688	-2172	-2354
19	-519	-1106	-1752	-2241	-2423
20	-544	-1151	-1811	-2303	-2485
25	-649	-1338	-2041	-2538	-2717
30	-727	-1466	-2188	-2681	-2857
35	-783	-1552	-2279	-2768	-2941
40	-822	-1608	-2335	-2819	-2991
45	-849	-1644	-2370	-2850	-3021
50	-867	-1667	-2390	-2869	-3039

Tabela A.3.8 Valor integral da reatividade do xenônio após a partida do reator para diversos níveis de potência (Continuação)

60	-888	-1690	-2410	-2886	-3056
70	-897	-1699	-2417	-2892	-3056
80	-900	-1703	-2420	-2895	-3062
90	-902	-1704	-2421	-2895	-3064
100	-903	-1705	-2421	-2896	-3065

Tabela A.3.9 Valor integral da reatividade do xenônio versus tempo, após desligamento do reator partindo de diversos níveis de potência em equilíbrio de xenônio.

$\Delta\rho$ [ρ_{cm}]	Potência do Reator com Xenônio em Equilíbrio				
Tempo (Horas)	100%	82%	50%	30%	10%
0	-3065	-2896	-2421	-1891	-903
1	-3597	-3305	-2624	-1982	-914
2	-4016	-3624	-2775	-2044	-916
3	-4337	-3864	-2882	-2081	-912
4	-4575	-4038	-2951	-2097	-902
5	-4741	-4154	-2987	-2096	-887
6	-4847	-4222	-2997	-2080	-868
7	-4901	-4249	-2984	-2052	-846
8	-4912	-4242	-2951	-2014	-822
9	-4886	-4206	-2803	-1967	-795
10	-4830	-4146	-2843	-1915	-768
11	-4749	-4066	-2772	-1857	-739
12	-4647	-3971	-2693	-1796	-710
13	-4530	-3863	-2608	-1732	-681
14	-4400	-3746	-2518	-1666	-651
15	-4259	-3621	-2425	-1599	-622
16	-4112	-3491	-2330	-1531	-593
17	-3960	-3357	-2234	-1464	-564
18	-3804	-3222	-2138	-1397	-537
19	-3647	-3086	-2042	-1332	-510
20	-3490	-2950	-1948	-1267	-483
25	-2734	-2302	-1506	-971	-365
30	-2079	-1746	-1134	-727	-271
35	-1548	-1297	-839	-535	-198
40	-1134	-949	-612	-389	-143
45	-821	-687	-441	-279	-102
50	-589	-492	-315	-199	-73
60	-297	-248	-158	-100	-36
70	-147	-122	-78	-49	-18
80	-72	-60	-38	-24	-9
90	-35	-29	-18	-11	-4
100	-17	-14	-9	-5	-2

Tabela A.3.10 Valor integral da reatividade do samário em função do tempo após redução de potência do reator, para vários níveis de potência partindo do samário em equilíbrio.

$\Delta\rho$ [pcm]	Redução de Potência do Reator de 100% para:				
	Tempo (horas)	0%	10%	30%	50%
0	-796	-796	-796	-796	-796
5	-828	-824	-818	-812	-802
10	-857	-851	-838	-826	-807
15	-884	-875	-857	-839	-811
20	-910	-898	-874	-851	-815
25	-934	-919	-890	-862	-819
30	-956	-938	-904	-871	-822
35	-977	-957	-917	-880	-825
40	-997	-974	-930	-888	-828
45	-1016	-990	-941	-896	-830
50	-1033	-1005	-951	-902	-832
60	-1064	-1031	-969	-913	-835
70	-1092	-1064	-954	-922	-837
80	-1116	-1074	-996	-929	-839
90	-1137	-1090	-1006	-934	-840
100	-1156	-1105	-1014	-938	-840
200	-1253	-1164	-1026	-929	-831
300	-1280	-1158	-993	-895	-817
400	-1287	-1136	-955	-865	-808
500	-1289	-1111	-922	-843	-803
600	-1289	-1087	-895	-828	-800
700	-1290	-1065	-874	-817	-798
800	-1290	-1044	-857	-810	-797
900	-1290	-1025	-844	-806	-797
1000	-1290	-1007	-834	-803	-797

Tabela A.3.11 Valor diferencial do boro vs. queima do combustível vs. temperatura do moderador

Queima (MWD/TMU)	Quente (309,5°C) em potência, Xn em Equilíbrio"	Quente (295,1°C) Zero de Potência, sem Xn
200	-7.69	-7.91
2200	-7.79	-7.97
4300	-7.97	-8.11
9700	-8.65	-8.70

Anexo 4

– Código Computacional do Reator PWR –

```
function [sys,x0,str,ts] = reativ_pwr_02(tempo,xestado,uvazao,flag, passo, PlotPotencia,
PlotBancoL, PlotBancoDS14, PlotBancoDS23, PlotModerador, PlotConcBoro,
PlotXenonioP, PlotXenonioT, PlotSamario)
reativ_glb
switch flag
case 0
[sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes (passo, PlotPotencia, PlotBancoL, PlotBancoDS14,
PlotBancoDS23, PlotModerador, PlotConcBoro, PlotXenonioP, PlotXenonioT,
PlotSamario );
case 3
sys = mdlOutputs(tempo,xestado,uvazao, passo);
case { 1, 2, 4, 9 }
sys = [];
otherwise
error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
return
function [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes (passo, PlotPotencia, PlotBancoL,
PlotBancoDS14, PlotBancoDS23, PlotModerador, PlotConcBoro, PlotXenonioP,
PlotXenonioT, PlotSamario)
reativ_glb
m_Reator.Passo = passo;
mDisplay.CalculoRoInicial = 1;
mDisplay.CalculoRoTotal_T1 = 1;
mDisplay.CalculoRoTotal_T2 = 1;
mDisplay.Potencia = PlotPotencia;
mDisplay.BancoL = PlotBancoL;
```

```

mDisplay.BancoDS14 = PlotBancoDS14;
mDisplay.BancoDS23 = PlotBancoDS23;
mDisplay.Moderador = PlotModerador;
mDisplay.ConcBoro = PlotConcBoro;
mDisplay.XenonioP = PlotXenonioP;
mDisplay.XenonioT = PlotXenonioT;
mDisplay.Samario = PlotSamario;
reativ_ini (passo);
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 2; % dynamically sized
sizes.NumInputs = 1; % dynamically sized
sizes.DirFeedthrough = 0; % has direct feedthrough
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
str = [];
x0 = [];
ts = [passo 0]; % sample time
return
return
function [sys] = mdlOutputs(tempo, xestado, uvazao, passo)
reativ_glb
[DeltaRo, ConcBoro] = Diluicao (tempo,xestado,uvazao, passo);
sys = [DeltaRo, ConcBoro];
return
function [DeltaRo, ConcBoro] = Diluicao (tempo, xestado, uvazao, passo)
reativ_glb
m_Reator.Ro_Anter = m_Reator.Ro_Total;
m_Reator.Tempo = m_Reator.Tempo_T1 + tempo/3600;
TaxaVazao = uvazao;

```

```

MassaAgua = TaxaVazao * m_Reator.Passo;
m_Reator.ConcBoro = m_Reator.ConcBoro * exp(-MassaAgua/292000);
m_Reator = CalcularRoTotal_Tx(m_Reator);
DeltaRo = m_Reator.Ro_Total - m_Reator.Ro_Anter;
ConcBoro = m_Reator.ConcBoro;
return
function [] = reativ_ini(passo)
reativ_glb
CarregaTabelaPotencia
CarregaTabelaBancoL
CarregaTabelaBancoD_S14
CarregaTabelaBancoD_S23
CarregaTabelaModerador
CarregaTabelaConcBoro
CarregaTabelaXenonio
CarregaTabelaSamario
m_Reator.Potencia = 100;
m_Reator.PotenciaTrip = 100;
m_Reator.Queima = 8213.9;
m_Reator.TempMedia = 308.8;
m_Reator.PosBancoL = 8;
m_Reator.PosBancoD = 29;
m_Reator.SeqMovim = 2;
m_Reator.Estrategia = 1;
m_Reator.Reducao = 0;
m_Reator.ConcBoro = 367;
m_Reator.Tempo_DT0 = 101; % Maior que 100
m_Reator.Tempo_DT1 = 22 + 24/60;
m_Reator.Tempo = 0;
m_Reator.Tempo_T0 = 0;
m_Reator.Tempo_T1 = NaN;

```

```

m_Reator = CalcularRoTotal_T0 (m_Reator);
m_Reator.Ro_TotalT0 = m_Reator.Ro_Total;
if mDisplay.CalculoRoInicial == 1, m_Reator, end
m_Reator.Potencia = 0; % Nova potencia
m_Reator.TempMedia = 295.1; % Nova temperatura media - fornecida
m_Reator.PosBancoL = 8; % Nova PosBancoL - fornecida
m_Reator.PosBancoD = 360; % Nova PosBancoD - fornecida
m_Reator.SeqMovim = 2; % Nova SeqMov - fornecida
m_Reator.Estrategia = 2; % Nova Estrategia - fornecida
m_Reator.ConcBoro = 875; % Nova concentracao de boro - fornecida
m_Reator.Tempo_T1 = m_Reator.Tempo_T0 + m_Reator.Tempo_DT1;
m_Reator.Tempo = m_Reator.Tempo_T1;
m_Reator = CalcularRoTotal_Tx(m_Reator);
m_Reator.Ro_TotalT1_CB = m_Reator.Ro_Total;
m_Reator.Ro_TotalT1_SB = m_Reator.Ro_TotalT1_CB - m_Reator.Ro_ConcBoro;
if mDisplay.CalculoRoTotal_T1 == 1, m_Reator, end
m_Reator.Ro_TotalT2 = m_Reator.Ro_TotalT0 - m_Reator.Ro_TotalT1_SB;
m_Reator.Ro_ConcBoroT2 = m_Reator.Ro_ConcBoro /
finterpol_FatorBoro(m_Reator.TempMedia, m_Reator.Queima);
if mDisplay.CalculoRoTotal_T2 == 1, m_Reator, end
return
function [m_Reator] = CalcularRoTotal_T0(m_Reator)
m_Reator.Ro_Potencia = finterpol_Potencia (m_Reator.Potencia , m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_Moderador = finterpol_Moderador(m_Reator.ConcBoro ,
m_Reator.TempMedia , m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_BancoL = finterpol_BancoL (m_Reator.PosBancoL, m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_BancoD = finterpol_BancoD (m_Reator.SeqMovim ,
m_Reator.Estrategia, m_Reator.PosBancoD, m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_ConcBoro = finterpol_ConcBoro (m_Reator.ConcBoro ,
m_Reator.TempMedia , m_Reator.Queima);
mDuracao = m_Reator.Tempo_DT0;

```

```

mPotencia = m_Reator.PotenciaTrip;
if mDuracao >= 100, mDuracao = 100; end
if mPotencia == 0
m_Reator.Ro_Xenonio = finterpol_Xenonio_T(mDuracao, mPotencia);
else
m_Reator.Ro_Xenonio = finterpol_Xenonio_P(mDuracao, mPotencia);
end
mReducao = m_Reator.Reducao;
mDuracao = 0; %m_Reator.Tempo_DT0;
m_Reator.Ro_Samario = finterpol_Samario(mDuracao, mReducao);
m_Reator.Ro_Total = m_Reator.Ro_Potencia + m_Reator.Ro_Moderador +
m_Reator.Ro_BancoL + m_Reator.Ro_BancoD + m_Reator.Ro_ConcBoro +
m_Reator.Ro_Xenonio + m_Reator.Ro_Samario;
return
function [m_Reator] = CalcularRoTotal_Tx(m_Reator)
m_Reator.Ro_Potencia = finterpol_Potencia (m_Reator.Potencia, m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_Moderador = finterpol_Moderador(m_Reator.ConcBoro,m_Reator.TempMedia, m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_BancoL = finterpol_BancoL (m_Reator.PosBancoL, m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_BancoD = finterpol_BancoD (m_Reator.SeqMovim,
m_Reator.Estrategia, m_Reator.PosBancoD, m_Reator.Queima);
m_Reator.Ro_ConcBoro = finterpol_ConcBoro (m_Reator.ConcBoro,
m_Reator.TempMedia, m_Reator.Queima);
mDuracao = m_Reator.Tempo - m_Reator.Tempo_T0;
mPotencia = m_Reator.PotenciaTrip;
if mDuracao >= 100, mDuracao = 100; end
m_Reator.Ro_Xenonio = finterpol_Xenonio_T(mDuracao, mPotencia);
mDuracao = m_Reator.Tempo - m_Reator.Tempo_T0;
mPotencia = m_Reator.Potencia;
m_Reator.Ro_Samario = finterpol_Samario(mDuracao, mPotencia);

```

```

m_Reator.Ro_Total = m_Reator.Ro_Potencia + m_Reator.Ro_Moderador +
m_Reator.Ro_BancoL + m_Reator.Ro_BancoD + m_Reator.Ro_ConcBoro +
m_Reator.Ro_Xenonio + m_Reator.Ro_Samario;
return
function [] = CarregaTabelaPotencia ()
global mDisplay
global TabPotencia
mTabela = [
[0 0 0 0 0 0 0 ]
[20 -395 -418 -439 -446 -447 -499]
[40 -715 -752 -787 -802 -808 -904]
[60 -1006 -1053 -1100 -1124 -1140 -1276]
[80 -1291 -1345 -1404 -1440 -1472 -1644]
[100 -1578 -1641 -1714 -1766 -1817 -2029]
];
TabPotencia.Potencia = mTabela(:,1);
TabPotencia.Queima = [216 2162 4325 6487 8650 12525];
TabPotencia.Reativ = mTabela(:,2:7);
if mDisplay.Potencia == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade de Potencia');
hxlabel = xlabel('Tempo');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ(:,1), 'blue' )
plot (TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ(:,2), 'green')
plot (TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ(:,3), 'red' )
plot (TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ(:,4), 'y+-' )
plot (TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ(:,5), 'black')
plot (TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ(:,6), 'black')
return

```

```

end
return
function [mroPotencia] = finterpol_Potencia(PotReator, QueimaCiclo)
global TabPotencia
mroPotencia = interp2(TabPotencia.Queima, TabPotencia.Potencia, TabPotencia.Reativ,
QueimaCiclo, PotReator);
return
function [] = CarregaTabelaBancoL ()
global mDisplay
global TabBancoL
mTabela = [
[ 0 0 0 0 0 0 0 ]
[10 -84 -118 -133 -141 -141 -176 ]
[20 -190 -260 -294 -309 -307 -381 ]
[30 -325 -435 -491 -511 -500 -627 ]
[40 -446 -580 -653 -675 -658 -837 ]
[60 -603 -747 -838 -867 -849 -1110]
[80 -708 -844 -943 -977 -966 -1278]
[100 -802 -924 -1026 -1066 -1063 -1411]
[120 -894 -999 -1103 -1147 -1152 -1525]
[140 -991 -1078 -1183 -1231 -1242 -1635]
[160 -1095 -1160 -1265 -1317 -1335 -1742]
[180 -1215 -1257 -1361 -1415 -1440 -1856]
[200 -1352 -1369 -1470 -1527 -1559 -1978]
[220 -1520 -1510 -1607 -1666 -1705 -2123]
[240 -1730 -1689 -1783 -1842 -1889 -2301]
[260 -2011 -1936 -2024 -2085 -2140 -2541]
[280 -2400 -2287 -2368 -2431 -2496 -2883]
[300 -2976 -2823 -2897 -2961 -3041 -3410]
[320 -3864 -3667 -3735 -3804 -3897 -4257]
[340 -5250 -5009 -5072 -5146 -5253 -5616]

```

```

[350 -6149 -5881 -5940 -6013 -6124 -6500]
[360 -7063 -6787 -6840 -6907 -7009 -7404]
[370 -7235 -7226 -7258 -7297 -7321 -7494]
[385 -7222 -7206 -7234 -7267 -7288 -7435]];
TabBancoL.Posicao = mTabela(:,1);
TabBancoL.Queima = [216 2162 4325 6487 8650 12525];
TabBancoL.Reativ = mTabela(:,2:7);
if mDisplay.BancoL == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral de Posicao do Banco L');
hxlabel = xlabel('Posicao de Insercao');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ(:,1), 'blue' )
plot (TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ(:,2), 'green')
plot (TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ(:,3), 'red' )
plot (TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ(:,4), 'y+-' )
plot (TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ(:,5), 'black')
plot (TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ(:,6), 'black')
return
end
return
function [mroBancoL] = finterpol_BancoL(Posicao, Queima)
global TabBancoL
end
mroBancoL = interp2(TabBancoL.Queima, TabBancoL.Posicao, TabBancoL.Reativ,
Queima, Posicao);
return
function [] = CarregaTabelaBancoD_S14 ()
global mDisplay
global TabBancoD_S14

```

Tabela_21A = [
[10 -5 10 -361 10 -817 10 -1249]
[20 -13 20 -373 20 -828 20 -1262]
[30 -28 30 -396 30 -846 30 -1283]
[40 -47 40 -425 40 -871 40 -1313]
[60 -93 60 -490 60 -928 60 -1384]
[80 -140 80 -550 80 -984 80 -1455]
[100 -182 100 -602 100 -1036 100 -1519]
[120 -221 120 -648 120 -1081 120 -1574]
[140 -254 140 -688 140 -1121 140 -1622]
[160 -281 160 -722 160 -1155 160 -1661]
[180 -303 180 -748 180 -1181 180 -1691]
[200 -320 200 -768 200 -1202 200 -1713]
[220 -331 220 -782 220 -1215 220 -1729]
[240 -340 240 -793 240 -1225 240 -1740]
[260 -344 260 -799 260 -1232 260 -1747]
[280 -348 280 -804 280 -1236 280 -1752]
[300 -350 300 -807 300 -1238 300 -1754]
[320 -352 320 -809 320 -1240 320 -1756]
[340 -353 340 -810 340 -1241 340 -1757]
[350 -353 350 -810 350 -1241 350 -1757]
[360 -353 360 -810 360 -1241 360 -1757]
[370 -353 370 -810 370 -1241 370 -1757]
[385 -353 385 -810 385 -1241 385 -1757]]];

Tabela_21B = [
[10 -7 10 -355 10 -824 10 -1242]
[20 -19 20 -371 20 -839 20 -1262]
[30 -38 30 -399 30 -863 30 -1285]
[40 -62 40 -436 40 -894 40 -1320]
[60 -119 60 -515 60 -963 60 -1400]
[80 -170 80 -583 80 -1026 80 -1475]

[100 -214 100 -640 100 -1078 100 -1537]
[120 -249 120 -687 120 -1120 120 -1588]
[140 -278 140 -724 140 -1154 140 -1627]
[160 -299 160 -753 160 -1179 160 -1657]
[180 -314 180 -773 180 -1197 180 -1677]
[200 -325 200 -788 200 -1210 200 -1692]
[220 -332 220 -798 220 -1218 220 -1701]
[240 -337 240 -804 240 -1224 240 -1708]
[260 -339 260 -808 260 -1227 260 -1711]
[280 -341 280 -811 280 -1230 280 -1714]
[300 -342 300 -813 300 -1230 300 -1715]
[320 -343 320 -814 320 -1232 320 -1716]
[340 -344 340 -815 340 -1232 340 -1717]
[350 -344 350 -815 350 -1232 350 -1717]
[360 -344 360 -825 360 -1232 360 -1717]
[370 -344 370 -815 370 -1232 370 -1717]
[385 -344 385 -831 385 -1232 385 -1717]];

Tabela_21C = [

[10 -8 10 -358 10 -833 10 -1253]
[20 -21 20 -376 20 -849 20 -1270]
[30 -42 30 -407 30 -876 30 -1298]
[40 -69 40 -446 40 -911 40 -1334]
[60 -129 60 -529 60 -985 60 -1414]
[80 -183 80 -601 80 -1050 80 -1487]
[100 -228 100 -659 100 -1103 100 -1545]
[120 -263 120 -706 120 -1145 120 -1591]
[140 -290 140 -743 140 -1176 140 -1626]
[160 -309 160 -770 160 -1199 160 -1652]
[180 -322 180 -788 180 -1215 180 -1668]
[200 -331 200 -801 200 -1226 200 -1680]
[220 -337 220 -809 220 -1232 220 -1687]

[240 -341 240 -815 240 -1237 240 -1691]
[260 -343 260 -818 260 -1239 260 -1694]
[280 -344 280 -820 280 -1241 280 -1696]
[300 -345 300 -821 300 -1242 300 -1697]
[320 -346 320 -822 320 -1242 320 -1698]
[340 -346 340 -822 340 -1243 340 -1698]
[350 -346 350 -823 350 -1243 350 -1698]
[360 -346 360 -823 360 -1243 360 -1698]
[370 -346 370 -823 370 -1243 370 -1698]
[385 -346 385 -823 385 -1243 385 -1698]];

Tabela_21D = [

[10 -9 10 -361 10 -842 10 -1264]
[20 -23 20 -380 20 -860 20 -1280]
[30 -45 30 -411 30 -888 30 -1308]
[40 -72 40 -450 40 -923 40 -1343]
[60 -133 60 -533 60 -997 60 -1419]
[80 -188 80 -606 80 -1064 80 -1488]
[100 -232 100 -666 100 -1116 100 -1543]
[120 -267 120 -714 120 -1158 120 -1585]
[140 -294 140 -752 140 -1189 140 -1618]
[160 -313 160 -779 160 -1212 160 -1641]
[180 -326 180 -798 180 -1227 180 -1656]
[200 -334 200 -811 200 -1237 200 -1667]
[220 -343 220 -818 220 -1243 220 -1673]
[240 -345 240 -824 240 -1247 240 -1677]
[260 -347 260 -827 260 -1250 260 -1679]
[280 -347 280 -829 280 -1251 280 -1681]
[300 -348 300 -830 300 -1252 300 -1682]
[320 -348 320 -831 320 -1253 320 -1682]
[340 -348 340 -831 340 -1253 340 -1683]
[350 -348 350 -832 350 -1253 350 -1683]

[360 -348 360 -832 360 -1253 360 -1683]
[370 -348 370 -832 370 -1253 370 -1683]
[385 -348 385 -832 385 -1253 385 -1683]]];

Tabela_21E = [

[10 -10 10 -362 10 -851 10 -1270]
[20 -23 20 -381 20 -868 20 -1286]
[30 -44 30 -411 30 -895 30 -1311]
[40 -71 40 -449 40 -930 40 -1343]
[60 -131 60 -530 60 -977 60 -1413]
[80 -184 80 -603 80 -1002 80 -1475]
[100 -229 100 -664 100 -1066 100 -1525]
[120 -264 120 -714 120 -1118 120 -1565]
[140 -292 140 -753 140 -1160 140 -1595]
[160 -312 160 -782 160 -1192 160 -1617]
[180 -325 180 -802 180 -1216 180 -1631]
[200 -335 200 -817 200 -1232 200 -1641]
[220 -340 220 -825 220 -1242 220 -1648]
[240 -344 240 -832 240 -1249 240 -1652]
[260 -347 260 -835 260 -1253 260 -1654]
[280 -348 280 -837 280 -1256 280 -1656]
[300 -349 300 -838 300 -1258 300 -1657]
[320 -349 320 -839 320 -1258 320 -1657]
[340 -349 340 -839 340 -1259 340 -1657]
[350 -350 350 -840 350 -1259 350 -1657]
[360 -350 360 -840 360 -1259 360 -1658]
[370 -350 370 -840 370 -1259 370 -1658]
[385 -350 385 -840 385 -1259 385 -1658]]];

Tabela_21F = [

[10 -12 10 -382 10 -861 10 -1307]
[20 -29 20 -404 20 -883 20 -1325]
[30 -55 30 -438 30 -916 30 -1352]

```

[40 -86 40 -480 40 -957 40 -1387]
[60 -154 60 -567 60 -1041 60 -1457]
[80 -215 80 -645 80 -1115 80 -1518]
[100 -263 100 -706 100 -1172 100 -1564]
[120 -299 120 -754 120 -1215 120 -1599]
[140 -325 140 -788 140 -1246 140 -1624]
[160 -343 160 -812 160 -1266 160 -1641]
[180 -353 180 -826 180 -1278 180 -1651]
[200 -360 200 -836 200 -1286 200 -1657]
[220 -363 220 -841 220 -1291 220 -1661]
[240 -366 240 -844 240 -1293 240 -1663]
[260 -366 260 -846 260 -1295 260 -1665]
[280 -368 280 -847 280 -1296 280 -1665]
[300 -368 300 -847 300 -1296 300 -1666]
[320 -368 320 -848 320 -1296 320 -1666]
[340 -368 340 -848 340 -1296 340 -1666]
[350 -368 350 -848 350 -1296 350 -1666]
[360 -368 360 -848 360 -1296 360 -1666]
[370 -368 370 -848 370 -1296 370 -1666]
[385 -367 385 -845 385 -1294 385 -1664]];
TabBancoD_S14.Posicao = Tabela_21A(:,1);
TabBancoD_S14.Estrategia = [1 2 3 4];
TabBancoD_S14.Queima = [216 2162 4325 6487 8650 12525];
TabBancoD_S14.Reativ = zeros(23, 4, 6);
TabBancoD_S14.Reativ (:,:,1) = Tabela_21A(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S14.Reativ (:,:,2) = Tabela_21B(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S14.Reativ (:,:,3) = Tabela_21C(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S14.Reativ (:,:,4) = Tabela_21D(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S14.Reativ (:,:,5) = Tabela_21E(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S14.Reativ (:,:,6) = Tabela_21F(:,[2 4 6 8]);
if mDisplay.BancoDS14 == 1

```

```

hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral do Banco D - Sequencia 1/4');
hxlabel = xlabel('Posicao de Insercao');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
return
end
return
function [] = CarregaTabelaBancoD_S23 ()
global mDisplay
global TabBancoD_S23
Tabela_22A = [
[10 -5 10 -316 10 -846 10 -1192]
[20 -12 20 -328 20 -855 20 -1201]
[30 -25 30 -348 30 -870 30 -1218]
[40 -44 40 -375 40 -891 40 -1240]
[60 -86 60 -442 60 -940 60 -1289]
[80 -127 80 -511 80 -985 80 -1333]
[100 -164 100 -573 100 -1025 100 -1371]
[120 -196 120 -629 120 -1061 120 -1403]
[140 -224 140 -678 140 -1092 140 -1431]
[160 -247 160 -721 160 -1118 160 -1454]
[180 -266 180 -756 180 -1138 180 -1471]
[200 -280 200 -783 200 -1154 200 -1484]
[220 -290 220 -803 220 -1164 220 -1493]
[240 -296 240 -817 240 -1173 240 -1500]
[260 -301 260 -826 260 -1177 260 -1504]
[280 -304 280 -833 280 -1181 280 -1507]
[300 -306 300 -836 300 -1183 300 -1509]
[320 -308 320 -839 320 -1185 320 -1510]
[340 -308 340 -840 340 -1186 340 -1511]

```

[350 -309 350 -841 350 -1186 350 -1511]
[360 -309 360 -841 360 -1186 360 -1512]
[370 -309 370 -841 370 -1187 370 -1512]
[385 -309 385 -841 385 -1186 385 -1512]]];

Tabela_22B = [

[10 -7 10 -327 10 -831 10 -1181]
[20 -17 20 -342 20 -842 20 -1193]
[30 -35 30 -368 30 -863 30 -1214]
[40 -59 40 -402 40 -890 40 -1242]
[60 -116 60 -481 60 -950 60 -1300]
[80 -160 80 -557 80 -1002 80 -1351]
[100 -199 100 -621 100 -1044 100 -1391]
[120 -231 120 -674 120 -1079 120 -1424]
[140 -257 140 -717 140 -1107 140 -1450]
[160 -276 160 -750 160 -1128 160 -1469]
[180 -290 180 -774 180 -1143 180 -1482]
[200 -300 200 -792 200 -1154 200 -1492]
[220 -306 220 -803 220 -1160 220 -1497]
[240 -310 240 -811 240 -1065 240 -1502]
[260 -313 260 -816 260 -1068 260 -1504]
[280 -315 280 -820 280 -1070 280 -1506]
[300 -316 300 -821 300 -1072 300 -1507]
[320 -316 320 -823 320 -1072 320 -1508]
[340 -317 340 -823 340 -1073 340 -1508]
[350 -317 350 -824 350 -1073 350 -1509]
[360 -317 360 -824 360 -1073 360 -1509]
[370 -317 370 -824 370 -1073 370 -1509]
[385 -317 385 -824 385 -1082 385 -1509]]];

Tabela_22C = [

[10 -8 10 -338 10 -817 10 -1174]
[20 -20 20 -354 20 -830 20 -1187]

[30 -39 30 -381 30 -852 30 -1209]
[40 -66 40 -417 40 -881 40 -1238]
[60 -123 60 -498 60 -945 60 -1298]
[80 -174 80 -573 80 -1000 80 -1349]
[100 -215 100 -634 100 -1045 100 -1390]
[120 -248 120 -684 120 -1080 120 -1422]
[140 -274 140 -723 140 -1107 140 -1446]
[160 -292 160 -752 160 -1127 160 -1464]
[180 -304 180 -771 180 -1141 180 -1475]
[200 -313 200 -786 200 -1150 200 -1483]
[220 -318 220 -794 220 -1155 220 -1488]
[240 -322 240 -800 240 -1160 240 -1491]
[260 -324 260 -803 260 -1161 260 -1494]
[280 -326 280 -806 280 -1163 280 -1495]
[300 -326 300 -807 300 -1164 300 -1496]
[320 -327 320 -808 320 -1165 320 -1496]
[340 -327 340 -808 340 -1165 340 -1497]
[350 -327 350 -809 350 -1165 350 -1497]
[360 -328 360 -809 360 -1165 360 -1497]
[370 -328 370 -809 370 -1165 370 -1497]
[385 -328 385 -809 385 -1165 385 -1497]];

Tabela_22D = [

[10 -8 10 -347 10 -805 10 -1168]
[20 -21 20 -364 20 -819 20 -1181]
[30 -42 30 -392 30 -842 30 -1204]
[40 -69 40 -426 40 -872 40 -1232]
[60 -128 60 -505 60 -836 60 -1291]
[80 -180 80 -576 80 -992 80 -1342]
[100 -223 100 -636 100 -1038 100 -1383]
[120 -257 120 -683 120 -1074 120 -1415]
[140 -283 140 -719 140 -1101 140 -1439]

[160 -301 160 -745 160 -1121 160 -1456]
[180 -314 180 -764 180 -1135 180 -1467]
[200 -323 200 -776 200 -1144 200 -1475]
[220 -328 220 -784 220 -1150 220 -1480]
[240 -332 240 -789 240 -1154 240 -1483]
[260 -334 260 -792 260 -1156 260 -1485]
[280 -335 280 -794 280 -1157 280 -1486]
[300 -336 300 -795 300 -1158 300 -1487]
[320 -336 320 -796 320 -1159 320 -1488]
[340 -336 340 -797 340 -1159 340 -1488]
[350 -337 350 -797 350 -1160 350 -1488]
[360 -337 360 -798 360 -1160 360 -1488]
[370 -337 370 -796 370 -1160 370 -1488]
[385 -337 385 -796 385 -1160 385 -1488]];

Tabela_22E = [

[10 -9 10 -357 10 -787 10 -1156]
[20 -22 20 -373 20 -802 20 -1169]
[30 -42 30 -399 30 -824 30 -1190]
[40 -69 40 -432 40 -853 40 -1217]
[60 -127 60 -504 60 -915 60 -1273]
[80 -180 80 -571 80 -971 80 -1323]
[100 -224 100 -625 100 -1017 100 -1363]
[120 -259 120 -670 120 -1055 120 -1395]
[140 -287 140 -704 140 -1084 140 -1419]
[160 -308 160 -730 160 -1106 160 -1438]
[180 -321 180 -747 180 -1120 180 -1450]
[200 -331 200 -759 200 -1031 200 -1458]
[220 -337 220 -767 220 -1037 220 -1463]
[240 -341 240 -722 240 -1041 240 -1467]
[260 -343 260 -775 260 -1044 260 -1469]
[280 -345 280 -773 280 -1046 280 -1470]

[300 -346 300 -778 300 -1046 300 -1471]
[320 -346 320 -779 320 -1047 320 -1472]
[340 -347 340 -779 340 -1047 340 -1472]
[350 -347 350 -780 350 -1048 350 -1472]
[360 -347 360 -780 360 -1049 360 -1473]
[370 -347 370 -780 370 -1048 370 -1473]
[385 -347 385 -780 385 -1048 385 -1473]];

Tabela_22F = [

[10 -11 10 -376 10 -782 10 -1167]
[20 -27 20 -394 20 -799 20 -1182]
[30 -52 30 -423 30 -826 30 -1205]
[40 -82 40 -458 40 -859 40 -1232]
[60 -149 60 -533 60 -931 60 -1289]
[80 -209 80 -600 80 -994 80 -1338]
[100 -257 100 -653 100 -1045 100 -1376]
[120 -294 120 -693 120 -1083 120 -1405]
[140 -320 140 -722 140 -1111 140 -1424]
[160 -338 160 -742 160 -1130 160 -1438]
[180 -349 180 -754 180 -1141 180 -1446]
[200 -356 200 -762 200 -1149 200 -1451]
[220 -359 220 -766 220 -1153 220 -1454]
[240 -362 240 -769 240 -1155 240 -1456]
[260 -363 260 -770 260 -1157 260 -1457]
[280 -364 280 -771 280 -1158 280 -1457]
[300 -364 300 -772 300 -1158 300 -1458]
[320 -365 320 -772 320 -1158 320 -1458]
[340 -365 340 -772 340 -1158 340 -1458]
[350 -365 350 -772 350 -1158 350 -1458]
[360 -365 360 -772 360 -1158 360 -1458]
[370 -365 370 -771 370 -1158 370 -1458]
[385 -363 385 -769 385 -1156 385 -1456]];

```

TabBancoD_S23.Posicao = Tabela_22A(:,1);
TabBancoD_S23.Estrategia = [1 2 3 4];
TabBancoD_S23.Queima = [216 2162 4325 6487 8650 12525];
TabBancoD_S23.Reativ = zeros(23, 4, 6);
TabBancoD_S23.Reativ (:,:,1) = Tabela_22A(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S23.Reativ (:,:,2) = Tabela_22B(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S23.Reativ (:,:,3) = Tabela_22C(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S23.Reativ (:,:,4) = Tabela_22D(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S23.Reativ (:,:,5) = Tabela_22E(:,[2 4 6 8]);
TabBancoD_S23.Reativ (:,:,6) = Tabela_22F(:,[2 4 6 8]);
if mDisplay.BancoDS23 == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral do Banco D - Sequencia 2/3');
hxlabel = xlabel('Posicao de Insercao');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
return
end
return
function [mroBancoD] = finterpol_BancoD(SeqMov, Estrategia, PosBanco, Queima)
global TabBancoD_S14
global TabBancoD_S23
if (SeqMov == 1 | SeqMov == 4)
mroBancoD = interp3(TabBancoD_S14.Estrategia, TabBancoD_S14.Posicao,
TabBancoD_S14.Queima, TabBancoD_S14.Reativ, Estrategia, PosBanco, Queima);
return
end
mroBancoD = interp3(TabBancoD_S23.Estrategia, TabBancoD_S23.Posicao,
TabBancoD_S23.Queima, TabBancoD_S23.Reativ, Estrategia, PosBanco, Queima);
return
return

```

```

function [] = CarregaTabelaModerador ()
global mDisplay
global TabModerador
TabModerador.Tabela33A.Queima = [216  2162  4325  6487  8650  12525];
TabModerador.Tabela33A.Fator = [-28.0 -32.8 -39.0 -45.2 -51.3 -63.6];
TabModerador.Tabela33B.Queima = [216  2162  4325  6487  8650  12525];
TabModerador.Tabela33B.Fator = [-5.4  -9.4  -14.1 -18.7 -23.1 -32.4];
if mDisplay.Moderador == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Fator do Moderador - Condição do Núcleo: HFP, Xe= Equil');
hxlabel = xlabel('Queima');
hylabel = ylabel('Fator');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabModerador.Tabela33A.Queima, TabModerador.Tabela33A.Fator)
hcf = figure; hold on
htitle = title('Fator do Moderador - Condição do Núcleo: HZP, Xe=0');
hxlabel = xlabel('Queima');
hylabel = ylabel('Fator');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabModerador.Tabela33B.Queima, TabModerador.Tabela33B.Fator)
end
Tabela32A = [
[309.7  0  0  0  0  0  0  0  0 ],
[295.1 +651 +587 +521 +456 +391 +327 +264 ],
[200  +3265 +2907 +2537 +2169 +1806 +1445 +1087],
[100  +4849 +4291 +3711 +3137 +2569 +2004 +1445],
[50  +5414 +4788 +4137 +3492 +2853 +2220 +1592],
];
Tabela32B = [
[309.7  0  0  0  0  0  0  0  0 ]
[295.1 +661 +597 +531 +465 +400 +335 +272 ]

```

[200 +3306 +2943 +2567 +2194 +1825 +1460 +1098]
[100 +4897 +4327 +3734 +3198 +2568 +1993 +1423]
[50 +5462 +4819 +4151 +3490 +2837 +2190 +1547]
];

Tabela32C = [
[309.7 0 0 0 0 0 0 0]
[295.1 +677 +612 +545 +478 +412 +347 +283]
[200 +3382 +3012 +2630 +2251 +1878 +1507 +1140]
[100 +5009 +4425 +3820 +3223 +2633 +2047 +1466]
[50 +5585 +4927 +4244 +3569 +2901 +2239 +1584]
];

Tabela32D = [
[309.7 0 0 0 0 0 0 0]
[295.1 +689 +624 +555 +488 +421 +356 +290]
[200 +3442 +3066 +2678 +2294 +1914 +1538 +1165]
[100 +5099 +4703 +3886 +3278 +2676 +2080 +1489]
[50 +5687 +5013 +4315 +3627 +2945 +2271 +1603]
];

Tabela32E = [
[309.7 0 0 0 0 0 0 0]
[295.1 +705 +638 +569 +501 +434 +367 +301]
[200 +3521 +3140 +2745 +2356 +1971 +1589 +1211]
[100 +5221 +4616 +3988 +3369 +2727 +2150 +1550]
[50 +5828 +5141 +4430 +3729 +3034 +2348 +1667]
];

Tabela32F = [
[309.7 0 0 0 0 0 0 0]
[295.1 +746 +677 +606 +535 +465 +397 +329]
[200 +3724 +3330 +2922 +2519 +2119 +1725 +1335]
[100 +5526 +4897 +4247 +3603 +2967 +2338 +1716]
[50 +6169 +5455 +4716 +3986 +3264 +2550 +1844]
];

```

];
TabModerador.TempMedia = [309.7 295.1 200 100 50];
TabModerador.ConcBoro = [10 200 400 600 800 1000 1200];
TabModerador.Queima = [216 2162 4325 6487 8663 12871];
TabModerador.Reativ = zeros(5, 7, 6);
TabModerador.Reativ(:, :, 1) = Tabela32A(:, 2:8);
TabModerador.Reativ(:, :, 2) = Tabela32B(:, 2:8);
TabModerador.Reativ(:, :, 3) = Tabela32C(:, 2:8);
TabModerador.Reativ(:, :, 4) = Tabela32D(:, 2:8);
TabModerador.Reativ(:, :, 5) = Tabela32E(:, 2:8);
TabModerador.Reativ(:, :, 6) = Tabela32F(:, 2:8);
if mDisplay.Moderador == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral de Temperatura do Moderador');
hxlabel = xlabel('Temperatura');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
return
end
return
function [mroFatorModerador] = finterpol_FatorModerador(Queima);
global TabFatorModerador
mroFatorModerador = interp2(TabFatorBoro.TempMedia,
TabFatorBoro.Queima, TabFatorBoro.Fator, TempMedia, Queima);
return
function [mroTemperatura] = finterpol_Moderador(ConcBoro, TempMedia, Queima)
global TabModerador
if ConcBoro < 10 , ConcBoro = 10; end
if ConcBoro > 1200, ConcBoro = 1200; end
mroTemperatura = interp3(TabModerador.ConcBoro, TabModerador.TempMedia,
TabModerador.Queima, TabModerador.Reativ, ConcBoro, TempMedia, Queima);

```

```

return
function [] = CarregaTabelaConcBoro ()
global mDisplay
global TabFatorBoro
global TabConcBoro
mTabela25 = [
[216   -7.61  -7.81]
[2162  -7.73  -7.89]
[4325  -7.94  -8.04]
[8650  -8.50  -8.51]
[12525 -9.13  -9.05]];
TabFatorBoro.Queima = mTabela25(:,1); % Define o numero de linhas
TabFatorBoro.TempMedia = [309.5 295.1]; % Define o numero de colunas
TabFatorBoro.Fator = mTabela25(:,2:3); % Define a matriz de valores
if mDisplay.ConcBoro == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Valor Dif do Boro x Temp Media Moderador x Queima');
hxlabel = xlabel('Queima');
hylabel = ylabel('Fator de Boro');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabFatorBoro.Queima, TabFatorBoro.Fator)
end
Tabela24A = [
[10  0  0  0  0  0 ]
[200 -2118 -2050 -1849 -1555 -1492 ]
[400 -4323 -4183 -3774 -3175 -3045 ]
[600 -6507 -6296 -5680 -4779 -4584 ]
[800 -8670 -8390 -7569 -6369 -6109 ]
[1000 -10816 -10466 -9442 -7946 -7622 ]
[1200 -12944 -12526 -11299 -9509 -9122 ]
[1400 -14326 -14570 -13142 -11060 -10609]

```

[1600 -17152 -16598 -14972 -12599 -12082]];

Tabela24B = [

[10 0 0 0 0 0]

[200 -2143 -2070 -1863 -1564 -1500]

[400 -4373 -4224 -3801 -3192 -3061]

[600 -6578 -6356 -5719 -4804 -4607]

[800 -8763 -8467 -7619 -6400 -6138]

[1000 -10928 -10560 -9502 -7982 -7656]

[1200 -13076 -12635 -11370 -9550 -9161]

[1400 -15206 -14893 -13222 -11107 -10653]

[1600 -17319 -16735 -15059 -12650 -12133]];

Tabela24C = [

[10 0 0 0 0 0]

[200 -2180 -2104 -1890 -1585 -1520]

[400 -4445 -4291 -3855 -3236 -3103]

[600 -6685 -6454 -5799 -4868 -4669]

[800 -8904 -8595 -7723 -6484 -6220]

[1000 -11101 -10717 -9630 -8086 -7755]

[1200 -13280 -12820 -11520 -9673 -9279]

[1400 -15439 -14906 -13394 -11247 -10788]

[1600 -17582 -16974 -15252 -12808 -12286]];

Tabela24D = [

[10 0 0 0 0 0]

[200 -2224 -2146 -1926 -1616 -1550]

[400 -4535 -4375 -3927 -3297 -3163]

[600 -6819 -6573 -5907 -4960 -4759]

[800 -9080 -8761 -7869 -6606 -6338]

[1000 -11319 -10922 -9765 -8236 -7903]

[1200 -13538 -13063 -11730 -9852 -9453]

[1400 -15737 -15185 -13636 -11454 -10990]

[1600 -17918 -17289 -15526 -13041 -12513]];

```

Tabela24E = [
[10 0 0 0 0 0 ]
[200 -2275 -2194 -1970 -1655 -1588 ]
[400 -4639 -4474 -4017 -3377 -3241 ]
[600 -6975 -6728 -6041 -5080 -4876 ]
[800 -9288 -6959 -8044 -6765 -6494 ]
[1000 -11577 -11168 -10029 -8434 -8097 ]
[1200 -13846 -13336 -11994 -10088 -9685 ]
[1400 -16093 -15525 -13942 -11727 -11258]
[1600 -18322 -17675 -15874 -13352 -12818]];
Tabela24F = [
[10 0 0 0 0 0 ]
[200 -2377 -2292 -2057 -1732 -1663 ]
[400 -4845 -4671 -4194 -3531 -3392 ]
[600 -7283 -7023 -6305 -5311 -5100 ]
[800 -9695 -9349 -7395 -7071 -6790 ]
[1000 -12083 -11651 -10463 -8813 -8464 ]
[1200 -14446 -13931 -12510 -10538 -10121]
[1400 -16789 -16190 -14539 -12247 -11763]
[1600 -19109 -18428 -16550 -13940 -13389]];
TabConcBoro.ConcBoro = [10 200 400 600 800 1000 1200 1400 1600];
TabConcBoro.TempMedia = [50 100 200 295.1 309.7];
TabConcBoro.Queima = [216 2162 4325 6487 8650 12525];
TabConcBoro.Reativ = zeros(9, 5, 6);
TabConcBoro.Reativ (:,:,1) = Tabela24A(:,2:6);
TabConcBoro.Reativ (:,:,2) = Tabela24B(:,2:6);
TabConcBoro.Reativ (:,:,3) = Tabela24C(:,2:6);
TabConcBoro.Reativ (:,:,4) = Tabela24D(:,2:6);
TabConcBoro.Reativ (:,:,5) = Tabela24E(:,2:6);
TabConcBoro.Reativ (:,:,6) = Tabela24F(:,2:6);
if mDisplay.ConcBoro == 1

```

```

hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral de Concentracao de Boro');
hxlabel = xlabel('Concentracao de Boro');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
end
return
function [mroFatorBoro] = finterpol_FatorBoro(TempMedia, Queima);
global TabFatorBoro
if TempMedia < 295.1, TempMedia = 295.1; end
mroFatorBoro = interp2(TabFatorBoro.TempMedia,
TabFatorBoro.Queima, TabFatorBoro.Fator, TempMedia, Queima);
return
function [mroConcBoro] = finterpol_ConcBoro(ConcBoro, TempMedia, Queima);
global TabConcBoro
if ConcBoro > 1600
mFatorBoro = finterpol_FatorBoro(TempMedia, Queima);
mroConcBoro = ConcBoro * mFatorBoro;
return;
end
if ConcBoro < 10
mroConcBoro = 0;
return;
end
mroConcBoro = interp3(TabConcBoro.TempMedia, TabConcBoro.ConcBoro,
TabConcBoro.Queima, TabConcBoro.Reativ, TempMedia, ConcBoro, Queima);
return
function [] = CarregaTabelaXenonio ()
global mDisplay
global TabXenonioP
global TabXenonioT

```

```
mTabela = [  
[0  0  0  0  0  0 ]  
[1 -7 -18 -35 -55 -66 ]  
[2 -21 -51 -99 -155 -184 ]  
[3 -40 -98 -185 -284 -334 ]  
[4 -64 -153 -286 -432 -503 ]  
[5 -91 -216 -397 -588 -679 ]  
[6 -120 -283 -513 -748 -857 ]  
[7 -151 -353 -631 -907 -1031]  
[8 -184 -424 -749 -1062 -1199]  
[9 -217 -496 -865 -1210 -1359]  
[10 -250 -567 -978 -1351 -1508]  
[11 -283 -637 -1086 -1483 -1648]  
[12 -315 -705 -1189 -1607 -1777]  
[13 -347 -771 -1286 -1722 -1896]  
[14 -379 -834 -1378 -1828 -2005]  
[15 -409 -894 -1464 -1925 -2105]  
[16 -438 -952 -1544 -2015 -2196]  
[17 -466 -1006 -1619 -2097 -2279]  
[18 -493 -1058 -1688 -2172 -2354]  
[19 -519 -1106 -1752 -2241 -2423]  
[20 -544 -1151 -1811 -2303 -2485]  
[25 -649 -1338 -2041 -2538 -2717]  
[30 -727 -1466 -2188 -2681 -2857]  
[35 -783 -1552 -2279 -2768 -2941]  
[40 -822 -1608 -2335 -2819 -2991]  
[45 -849 -1644 -2370 -2850 -3021]  
[50 -867 -1667 -2390 -2869 -3039]  
[60 -888 -1690 -2410 -2886 -3056]  
[70 -897 -1699 -2417 -2892 -3062]  
[80 -900 -1703 -2420 -2895 -3064]
```

```

[90 -902 -1704 -2421 -2895 -3064]
[100 -903 -1705 -2421 -2896 -3065]];
TabXenonioP.Tempo = mTabela(:,1);
TabXenonioP.Potencia = [10 30 50 82 100];
TabXenonioP.Reativ = mTabela(:,2:6);
if mDisplay.XenonioP == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral de Xenonio em Potencia');
hxlabel = xlabel('Tempo Apos Desligamento');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabXenonioP.Tempo, TabXenonioP.Reativ(:,1), 'blue' )
plot (TabXenonioP.Tempo, TabXenonioP.Reativ(:,2), 'green')
plot (TabXenonioP.Tempo, TabXenonioP.Reativ(:,3), 'red' )
plot (TabXenonioP.Tempo, TabXenonioP.Reativ(:,4), 'y+-' )
plot (TabXenonioP.Tempo, TabXenonioP.Reativ(:,5), 'black')
end
mTabela = [
[0 -3065 -2896 -2421 -1891 -903]
[1 -3597 -3305 -2624 -1982 -914]
[2 -4016 -3624 -2775 -2044 -916]
[3 -4337 -3864 -2882 -2081 -912]
[4 -4575 -4038 -2951 -2097 -902]
[5 -4741 -4154 -2987 -2096 -887]
[6 -4847 -4222 -2997 -2080 -868]
[7 -4901 -4249 -2984 -2052 -846]
[8 -4912 -4242 -2951 -2014 -822]
[9 -4886 -4206 -2903 -1967 -795]
[10 -4830 -4146 -2843 -1915 -768]
[11 -4749 -4066 -2772 -1857 -739]
[12 -4647 -3971 -2693 -1796 -710]

```

```

[13 -4530 -3863 -2608 -1732 -681]
[14 -4400 -3746 -2518 -1666 -651]
[15 -4259 -3621 -2425 -1599 -622]
[16 -4112 -3491 -2330 -1531 -593]
[17 -3960 -3357 -2234 -1464 -564]
[18 -3804 -3222 -2138 -1397 -537]
[19 -3647 -3086 -2042 -1332 -510]
[20 -3490 -2950 -1948 -1267 -483]
[25 -2734 -2302 -1506 -971 -365]
[30 -2079 -1746 -1134 -727 -271]
[35 -1548 -1297 -839 -535 -198]
[40 -1134 -949 -612 -389 -143]
[45 -821 -687 -441 -279 -102]
[50 -589 -492 -315 -199 -73 ]
[60 -297 -248 -158 -100 -36 ]
[70 -147 -122 -78 -49 -18 ]
[80 -72 -60 -38 -24 -9 ]
[90 -35 -29 -18 -11 -4 ]
[100 -17 -14 -9 -5 -2 ]
];
TabXenonioT.Tempo = mTabela(:,1);
TabXenonioT.Potencia = [100 82 50 30 10];
TabXenonioT.Reativ = mTabela(:,2:6);
if mDisplay.XenonioT == 1
hcf = figure; hold on
htitle = title('Reatividade Integral do Xenonio em Temperatura');
hxlabel = xlabel('Tempo Apos Desligamento');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabXenonioT.Tempo, TabXenonioT.Reativ(:,1), 'blue' )
plot (TabXenonioT.Tempo, TabXenonioT.Reativ(:,2), 'green')

```

```

plot (TabXenonioT.Tempo, TabXenonioT.Reativ(:,3), 'red' )
plot (TabXenonioT.Tempo, TabXenonioT.Reativ(:,4), 'y+-' )
plot (TabXenonioT.Tempo, TabXenonioT.Reativ(:,5), 'black')
end
return
function [mroXenonio] = finterpol_Xenonio_P(Duracao, Potencia)
global TabXenonioP
if Duracao > 100, Duracao = 100; end
mroXenonio = interp2(TabXenonioP.Potencia, TabXenonioP.Tempo, TabXenonioP.Reativ,
Potencia, Duracao);
return
function [mroXenonio] = finterpol_Xenonio_T(Duracao, Potencia)
global TabXenonioT
if Duracao > 100, mroXenonio = 0; return; end
mroXenonio = interp2(TabXenonioT.Potencia, TabXenonioT.Tempo, TabXenonioT.Reativ,
Potencia, Duracao);
return
function [] = CarregaTabelaSamario ()
global mDisplay
global TabSamario
mTabela = [
[0 -796 -796 -796 -796 -796]
[5 -828 -824 -818 -812 -802]
[10 -857 -851 -838 -826 -807]
[15 -884 -875 -857 -839 -811]
[20 -910 -898 -874 -851 -815]
[25 -934 -919 -890 -862 -819]
[30 -956 -938 -904 -871 -822]
[35 -977 -957 -917 -880 -825]
[40 -997 -974 -930 -888 -828]
[45 -1016 -990 -941 -896 -830]

```

```

[50 -1033 -1005 -951 -902 -832]
[60 -1064 -1031 -969 -913 -835]
[70 -1092 -1054 -984 -922 -837]
[80 -1116 -1074 -996 -929 -839]
[90 -1137 -1090 -1006 -934 -840]
[100 -1156 -1105 -1014 -938 -840]
[200 -1253 -1164 -1026 -929 -831]
[300 -1280 -1158 -993 -895 -817]
[400 -1287 -1136 -955 -865 -808]
[500 -1289 -1111 -922 -843 -803]
[600 -1289 -1087 -895 -828 -800]
[700 -1290 -1065 -874 -817 -798]
[800 -1290 -1044 -857 -810 -797]
[900 -1290 -1025 -844 -806 -797]
[1000 -1290 -1007 -834 -803 -797]
];
TabSamario.Tempo = mTabela(:,1);
TabSamario.Reducao = [0 10 30 50 82];
TabSamario.Reativ = mTabela(:,2:6);
if mDisplay.Samario == 1
hcf = figure;, hold on
htitle = title ('Reatividade Integral do Samario');
hxlabel = xlabel('Tempo Apos Desligamento');
hylabel = ylabel('Reatividade');
FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel);
plot (TabSamario.Tempo, TabSamario.Reativ(:,1), 'blue' )
plot (TabSamario.Tempo, TabSamario.Reativ(:,2), 'green')
plot (TabSamario.Tempo, TabSamario.Reativ(:,3), 'red' )
plot (TabSamario.Tempo, TabSamario.Reativ(:,4), 'y+-' )
plot (TabSamario.Tempo, TabSamario.Reativ(:,5), 'black')
return

```

```

end
return
function [mroSamario] = finterpol_Samario(Duracao, Reducao);
global TabSamario
if Duracao > 1000, Duracao = 1000; end
mroSamario = interp2(TabSamario.Reducao, TabSamario.Tempo, TabSamario.Reativ,
Reducao, Duracao);
return
function [] = FormatFigure (hcf, htitle, hxlabel, hylabel)
mFontSize = 11;
mFontWeight = 'Normal';
mFontAngle = 'Italic';
mColor = 'Black';
set(htitle,'FontSize' , mFontSize , ...
'FontWeight', mFontWeight, ...
'FontAngle' , mFontAngle , ...
'Color' , mColor)
set(hxlabel,'FontSize' , mFontSize , ...
'FontWeight', mFontWeight, ...
'FontAngle' , mFontAngle , ...
'Color' , mColor)
set(hylabel,'FontSize' , mFontSize , ...
'FontWeight', mFontWeight, ...
'FontAngle' , mFontAngle , ...
'Color' , mColor)
return

```

Anexo 5

– Cálculos de Aproximação à Criticalidade do Reator de Angra-II –

A.5.1. Introdução

Em Angra II, o retorno da planta à condição de potência, após um desarme automático do reator, somente é permitido depois que as causas que motivaram esse evento forem conhecidas. Assim sendo, diversos procedimentos administrativos e operacionais devem ser satisfeitos para o religamento da usina. Estas considerações são estabelecidas por exigência das normas legais que regulam a operação de reatores nucleares de potência. Neste trabalho para os quatro casos de religamento do reator estudados, as condições legais foram atendidas a época de seu retorno à condição de potência.

Para o estabelecimento das condições operacionais de potência há necessidade de se desenvolver cálculos de aproximação à criticalidade. Angra II dispõe de procedimentos (administrativos e operacionais) e de um programa de computador para essa finalidade. É feita uma coleta de dados dos parâmetros que influenciam a reatividade nas condições de potência do reator imediatamente antes do desligamento e no momento em que se estima a ocorrência da criticalidade.

O livro de dados do reator (2-PPR11) é usado para se conhecer a reatividade devida a cada parâmetro envolvido. Nele estão contidas as diversas tabelas associadas a cada parâmetro de interesse para este problema. Por meio de interpolações dos dados contidos nessas tabelas (apresentadas no Anexo 2 deste trabalho) é possível se estabelecer a contribuição individual de cada parâmetro envolvido. De posse desses parâmetros, é realizado um cálculo de balanço de reatividade para as condições da usina no desligamento e condições da usina na criticalidade. O resultado da diferença entre essas condições é a reatividade que deverá ser compensada ou por barras de controle (não tratada neste trabalho) ou por diluição do SRR para levar a usina da condição subcrítica para crítica. Os

parâmetros de interesse para essa aplicação (criticalidade por diluição) são:

- Tempo de permanência com a usina em potência e tempo de permanência da usina desligada. O conhecimento desses tempos juntamente com a potência que o reator estava operando estabelece a influência de reatividade dos produtos oriundos da fissão (Xenônio e Samário),
- Queima do ciclo combustível,
- Profundidade de inserção dos bancos de desligamento (bancos L),
- Temperatura média do SRR,
- Profundidade de inserção dos de controle (bancos D),
- Seqüência de movimentação dos Bancos de controle,
- Concentração de boro no SRR antes do desligamento e no início de retorno da planta a condição crítica.

O conhecimento desses dados possibilita o cálculo manual da reatividade, por interpolação das tabelas dispostas no Anexo 2, devida cada parâmetro de interesse. Para tanto, usam –se as seguintes equações:

$$\rho_{\text{total ao desligamento}} = (\rho^{(1)}_{\text{Ac. Borico}} + \rho^{(1)}_{\text{B. Desligamento}} + \rho^{(1)}_{\text{B. Controle}} + \rho^{(1)}_{\text{Potência}} + \rho^{(1)}_{\text{Temperatura SRR}} + \rho^{(1)}_{\text{Xenônio}} + \rho^{(1)}_{\text{Samário}}) \quad (\text{A.5.1})$$

$$\rho_{\text{total nova criticalização}} = (\rho^{(3)}_{\text{Ac. Borico}} + \rho^{(3)}_{\text{B. Desligamento}} + \rho^{(3)}_{\text{B. Controle}} + \rho^{(3)}_{\text{Potência}} + \rho^{(3)}_{\text{Temperatura SRR}} + \rho^{(3)}_{\text{Xenônio}} + \rho^{(3)}_{\text{Samário}}) \quad (\text{A.5.2})$$

Onde:

- Os índices superiores (1) e (3) representam respectivamente a reatividade de cada parâmetro nas condições imediatamente antes do desligamento e no momento de retorno à criticalidade,
- $\rho_{\text{Ac. Bórico}}$ – Reatividade devido a concentração de boro em pcm,
- $\rho_{\text{B. Desligamento}}$ – Reatividade devido a posição dos bancos L em pcm,

- ρ_B . Controle – Reatividade devido a posição dos bancos D em pcm,
- $\rho_{Potência}$ – Reatividade devido a potência do reator em pcm,
- $\rho_{Temperatura\ SRR}$ – Reatividade devido a temperatura média do moderador no SRR em pcm,
- $\rho_{Xenônio}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do xenônio no núcleo do reator em pcm,
- $\rho_{Samário}$ - Reatividade devido ao envenenamento causado pela formação do samário no núcleo do reator em pcm.

ρ_{total} anterior ao desligamento - ρ_{total} nova criticalização = Valor Integral do Boro
(A.5.3)

Onde:

- Valor Integral do Boro – refere-se a reatividade devida a concentração crítica de boro estimada.

A concentração crítica de boro estimada (CCE) em *ppm*, isto é, a concentração final de boro que o SRR deverá apresentar na criticalidade, é calculada pelo conhecimento do Valor Integral de Boro obtido pela equação A.5.3. O processo é realizado inversamente, utilizando a mesma tabela que foi usada para o cálculo da reatividade devida a concentração de boro no momento da criticalidade. Sendo conhecida a CCE, pela aplicação da equação A.5.4 é estabelecido a quantidade de água desmineralizada a ser injetada no SRR de modo a se alcançar a condição crítica.

$$Q = M * L_n ((C(\text{final}) - C(\text{injetado}) / (C(\text{inicial}) - C(\text{injetado}))) \quad (\text{A.5.4})$$

Onde:

- L_n – representa o logaritmo neperiano
- $C(\text{inicial})$ - concentração de boro do primário no retorno a condição crítica em *ppm*,
- $C(\text{injetado})$ - concentração de boro do fluido injetado em *ppm*. Para este trabalho,

considera-se o teor de boro presente igual a zero.

- C(final) – concentração crítica de boro em ppm,
- Q - massa de água desmineralizada a ser injetada no SRR em kg,
- M - massa total do refrigerante no primário (SRR). Para Angra II é considerada uma temperatura do moderador de 296° C e pressão do SRR de 158 bar, o que corresponde a uma massa de refrigerante de 292000 kg.

A.5.2. Cálculo do Balanço de Reatividade para Os Casos Estudados

A seguir são apresentadas as planilhas dos cálculos de balanço de reatividade para os quatro casos de desarme do reator de Angra II estudados neste trabalho, que são:

- 1° Caso - Desarme de Angra II ocorrido em 19/12/2007.
- 2° Caso - Desarme de Angra II ocorrido em 11/11/2007.
- 3° Caso - Desarme de Angra II ocorrido em 11/05/2007.
- 4° Caso - Desarme de Angra II ocorrido em 07/08/2006.

Essas planilhas são executadas pelo programa de computador REATIV A2 (BRANDES, 2005) que segue o mesmo roteiro dos cálculos manuais. A aplicação do balanço de reatividade nesta atividade através do programa REATIV A2 substitui com eficiência os cálculos manuais permitindo extrapolações que se fizerem necessárias para atender as condições do núcleo durante a evolução desse processo, evitando em muitos casos, fontes de erros devido a enorme quantidade de parâmetros envolvidos.

A.5.2.1 - 1º Caso - Desarme da Usina de Angra II em 19/12/2007 e Retorno em 20/12/2007

Planilha A.5.1 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina no Desligamento)

Balço de reatividade para a criticalidade por diluição

		Condições da Usina no Desligamento				Referências (2PPR 11)	
Data e Hora	1	19/12/2007 21:36		Parâmetros de Reatividade			
Queima do Ciclo Prof. de Ins. Banco L	2	8213,9	MWD/TMU	Valor Dif. do Boro	8	-8,1	pcm/ppm Figura 2.5
	3	8	cm	Valor Int. Banco L	9	-113	pcm Tabela 2.3
Temp. Média do SRR	4	308,8	oC	Defeito Iso. de Temp.	10	36	pcm Tabela 3.2
Potência do Reator 1o Banco D	5	100,0	% PN	Valor Int. de Potência	11	-	pcm Tabela 3.1
Sequencia	6	29	cm	Valor Int. do Banco D	12	-40	pcm Tabela 2.1
Conc. de Boro no SRR	7	367	ppm	Valor Int. do Boro	13	-	pcm = (7*8) ou Tabela 2.4
				Reat. do Xenônio	14	-	pcm Tabela 4.2
				Reat. do Samário	15	-789	pcm Tabela 4.3
Soma das Reatividades no Desligamento	16					-	pcm =(9+10+11+12+13+14+15)
						8727	

Planilha A.5.2 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina na Criticalidade)

Balço de reatividade para a criticalidade por diluição

		Condições da Usina na Criticalidade					
Data e Hora	17	20/12/2007 20:00	Parâmetros de Reatividade		Referências (2PPR 11)		
Tempo do Reator Desl.	18	22:24	hh: Valor Dif. do Boro	23	-8,4	pcm/ppm Figura 2.5	
Posição de Banco L	19	8	mm: Valor Int. Banco L	24		pcm Tabela 2.3	
Temp. Média do SRR	20	295,1	cm: Defeito Iso. de Temp.	25	534	pcm Tabela 3.2	
Potência do Reator	21	0	%: Defeito de Potência	26	0	pcm Tabela 3.1	
Banco D (Prof. de Ins.)	22					Tabela 2.1	
Seqüência	2		Valor Int. do Banco D	27	-784	pcm Tabela 2.2	
1oD		360	cm				
2oD (1oD in)	X						
3oD (1oD +2oD in)							
			Reat. do Xenônio	28	-3333	pcm Tabela 4.2	
			Reat. do Samário	29	-908	pcm Tabela 4.3	
Soma das Reatividades na Criticalidade (Sem o Valor Integral do Boro)				30	-4604	pcm =(24+25+26+27+28+29)	
Valor Integral do Boro na Criticalidade				31	-4123	pcm =(16 - 30)	
Concentração Crítica Esperada (CCE) de Boro				32	875	ppm =(31 / 23) ou Tabela 2.4	
Concentração de Boro no SRR no Início da Diluição				33	490	ppm	
CB no KBB (Boro Residual):				34	0	ppm	
Quant. de Água a ser Adicionada para Criticalidade:				35	169349	kg Figura 5.2	
Taxa de Diluição Boração:			SUGERIDA		16	kg/seg	
Duração da Diluição:					2:56	horas: minutos	
Concentração de Boro obtida por Análise Química Manual				523	ppm		

A.5.2.2 - 2º Caso - Desarme da Usina de Angra II em 11/11/2007 e Retorno em 11/11/2007

Planilha A.5.3 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina no Desligamento)

Balanco de reatividade para a criticalidade por diluição

		Condições da Usina no Desligamento				Referências (2PPR 11)	
Data e Hora	1	11/11/2007 05:16		Parâmetros de Reatividade			
Queima do Ciclo Prof. de Ins. Banco L	2	6900,7	MWD/ TMU	Valor Dif. do Boro	8	-8,0	pcm/ ppm Figura 2.5
	3	11	cm	Valor Int. Banco L	9	-158	pcm Tabela 2.3
Temp. Média do SRR	4	308,4	oC	Defeito Iso. de Temp.	10	47	pcm Tabela 3.2
Potência do Reator 1o Banco D	5	100,0	% PN	Valor Int. de Potência	11	-1776	pcm Tabela 3.1
Sequencia	6	27	cm	Valor Int. do Banco D	12	-38	pcm Tabela 2.2
Conc. de Boro no SRR	7	485	ppm	Valor Int. do Boro	13	-3874	pcm = (7*8) ou Tabela 2.4
				Reat. do Xenônio	14	-3062	pcm Tabela 4.2
				Reat. do Samário	15	-795	pcm Tabela 4.3
Soma das Reatividades no Desligamento	16					-8656	pcm =(9+10+11+12+13+14+15)

Planilha A.5.4 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina na Criticalidade)

Condições da Usina na Criticalidade						
Data e Hora	1	11/11/200	Parâmetros de			Referências (2PPR
	7	7 10:00	Reatividade			11)
Tempo do Reator	1		hh: Valor Dif. do			pcm
Desl.	8	4:44	mm Boro	23	-8,3	/pp m Figura 2.5
Posição de Banco	1		Valor Int.			
L	9	11	cm Banco L	24	-158	pcm Tabela 2.3
Temp. Média do	2		Defeito Iso.			
SRR	0	295,2	oC de Temp.	25	540	pcm Tabela 3.2
Potência do Reator	2		% Defeito de			
Banco D (Prof. de	1	0	PN Potência	26	0	pcm Tabela 3.1
Ins.)						Tabela 2.1
Seqüência	1					
1oD	2		Valor Int. do			
2oD (1oD in)	X		Banco D	27	-834	pcm
3oD (1oD						Tabela 2.2
+2oD in)						
			Reat. do			
			Xenônio	28	-4706	pcm Tabela 4.2
			Reat. do			
			Samário	29	-825	pcm Tabela 4.3
Soma das Reatividades na Criticalidade (Sem o Valor Integral do Boro)				30	-5982	pcm =(24+25+26+27+28+29)
Valor Integral do Boro na Criticalidade				31	-3673	pcm =(16 - 30)
Concentração Crítica Esperada (CCE) de Boro				32	443	ppm =(31 / 23) ou Tabela 2.4
Concentração de Boro no SRR no Início da Diluição				33	485	ppm
CB no KBB (Boro Residual):				34	0	ppm
Quant. de Água a ser Adicionada para Criticalidade:				35	26217	kg Figura 5.2
Taxa de Diluição						
Boração:			SUGERIDA		12	kg/seg
Duração da Diluição:					0:36	horas:minutos
Concentração de Boro obtida por Análise Química Manual					461	ppm

A.5.2.3 - 3º Caso - Desarme da Usina de Angra II em 11/05/2007 e Retorno em 18/05/2007

Planilha A.5.5 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina no Desligamento)

Balço de reatividade para a criticalidade por diluição

		Condições da Usina no Desligamento					
Data e Hora	1	11/05/2007 06:00		Parâmetros de Reatividade		Referências (2PPR 11)	
Queima do Ciclo Prof. de Ins. Banco L	2	582,8	MWD /TMU	Valor Dif. do Boro	8	-7,7	pcm/ppm Figura 2.5
	3	27	cm	Valor Int. Banco L	9	-311	pcm Tabela 2.3
Temp. Média do SRR	4	308,5	oC	Defeito Iso. de Temp.	10	26	pcm Tabela 3.2
Potência do Reator	5	82,0	% PN	Valor Int. de Potência	11	-1330	pcm Tabela 3.1
o Banco D	6	58	cm	Valor Int. do Banco D	12	-89	pcm Tabela 2.1
Seqüência	2						
Conc. de Boro no SRR	7	1054	ppm	Valor Int. do Boro	13	-8100	pcm = (7*8) ou Tabela 2.4
				Reat. do Xenônio	14	-3042	pcm Tabela 4.2
				Reat. do Samário	15	-861	pcm Tabela 4.3
Soma das Reatividades no Desligamento	16				16	-13708	pcm = (9+10+11+12+13+14+15)

Planilha A.5.6. Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina na Criticalidade)

		Condições da Usina na Criticalidade					
Data e Hora	1	18/05/200					Referências (2PPR 11)
Tempo do Reator Desl.	7		Parâmetros de Reatividade				
Posição de Banco L	1		hh: Valor Dif. do Boro	23	-7,9	pcm/ppm	Figura 2.5
Temp. Média do SRR	8	170:30	mm				
Potência do Reator Banco D (Prof. de Ins.)	1		Valor Int. Banco L	24	-311	pcm	Tabela 2.3
Seqüência 1oD	2	27	cm				
2oD (1oD in)	2		Defeito Iso. de Temp.	25	335	pcm	Tabela 3.2
3oD (1oD +2oD in)	2	295,0	oC				
	1	0	% Defeito de Potência	26	0	pcm	Tabela 3.1
	2		PN				
	2		Valor Int. do Banco D	27	-836	pcm	Tabela 2.1
	2	360	cm				Tabela 2.2
	28		Reat. do Xenônio	28	0	pcm	Tabela 4.2
	29		Reat. do Samário	29	-1237	pcm	Tabela 4.3
Soma das Reatividades na Criticalidade (Sem o Valor Integral do Boro)	30			30		pcm	=(24+25+26 +27+28+29)
Valor Integral do Boro na Criticalidade	31			31	-11659	pcm	=(16 - 30)
Concentração Crítica Esperada (CCE) de Boro	32			32	14	ppm	=(31 / 23) ou Tabela 2.4
Concentração de Boro no SRR no Início da Diluição	33			33	1622	ppm	
CB no KBB (Boro Residual):	34			34	0	ppm	
Quant. de Água a ser Adicionada para Criticalidade:	35			35	28827	kg	Figura 5.2
Taxa de Diluição Boração:			SUGERIDA		12	kg/se g	
Duração da Diluição:					0:40	horas:minutos	
Concentração de Boro obtida por Análise Química Manual					1462	ppm	

A.5.2.4 - 4º Caso - Desarme da Usina de Angra II em 07/08/2006 e Retorno em 08/08/2006

Planilha A.5.7 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina no Desligamento)

Balço de reatividade para a criticalidade por diluição

		Condições da Usina no Desligamento				Referências (2PPR 11)	
Data e Hora	1	07 200 13:20		Parâmetros de Reatividade			
Queima do Ciclo	2	6487,8	MWD/ TMU	Valor Dif. do Boro	8	-8,0	pcm/ ppm Figura 2.5
Prof. de Ins. Banco L	3	6	cm	Valor Int. Banco L	9	-83	pcm Tabela 2.3
Temp. Média do SRR	4	,5	oC	Defeito Iso. de Temp.	10	40	pcm Tabela 3.2
Potência do Reator	5	100,0	% PN	Valor Int. de Potência	11	-	pcm Tabela 3.1
1o Banco D	6	26	cm	Valor Int. do Banco D	12	-31	pcm Tabela 2.1
Sequencia	3			Valor Int. do Boro	13	-	pcm = (7*8) ou Tabela 2.4
Conc. de Boro no SRR	7	533	ppm	Reat. do Xenônio	14	3024	pcm Tabela 4.2
				Reat. do Samário	15	-780	pcm Tabela 4.3
Soma das Reatividades no Desligamento	16					-	pcm =(9+10+11+12+13+14+15)

Planilha A.5.8 Cálculos de aproximação à criticalidade do reator (Condições da Usina na Criticalidade)

Condições da Usina na Criticalidade						
Data e Hora	1	08/08/200	Parâmetros de			Referências (2PPR 11)
Tempo do Reator	7		Reatividade			
Desl.	1		hh: Valor Dif.	23	-8,3	pcm/ppm Figura 2.5
Posição de Banco L	8	32:10	mm do Boro			
	1		Valor Int.			
	9		cm Banco L	24	-170	pcm Tabela 2.3
Temp. Média do SRR	2		Defeito Iso. de			
	0	296	oC Temp.	25	376	pcm Tabela 3.2
Potência do Reator Banco D (Prof. de Ins.)	2		% Defeito de			
	1	0	PN Potência	26	0	pcm Tabela 3.1
Seqüência 1oD	2		Valor Int. do Banco D			Tabela 2.1
2oD (1oD in)	2	360	cm	27	-732	pcm Tabela 2.2
3oD (1oD +2oD in)			Reat. do Xenônio	28	-1835	pcm Tabela 4.2
			Reat. do Samário	29	-949	pcm Tabela 4.3
Soma das Reatividades na Criticalidade (Sem o Valor Integral do Boro)				30	- 1	pcm =(24+25+26+27+28+29)
Valor Integral do Boro na Criticalidade				31	- 9	pcm =(16 - 30)
Concentração Crítica Esperada (CCE) de Boro				32	792	ppm =(31 / 23) ou Tabela 2.4
Concentração de Boro no SRR no Início da Diluição				33	1041	ppm
CB no KBB (Boro Residual):				34	0	ppm
Quant. de Água a ser Adicionada para Criticalidade:				35	79866	kg Figura 5.2
Taxa de Diluição Boração:			SUGERIDA		15	kg/se g
Duração da Diluição:					1:28	horas: minutos
Concentração de Boro obtida por Análise Química Manual					805	pp m

Referências Bibliográficas

2PPR-03 – “*Cálculo da Margem de Desligamento*”, 2007. Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A (ELETRONUCLEAR).

2PPR-04 - “*Determinação de Posição de Barras e Concentração de Boro para a Criticalidade*”, 2007. Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A (ELETRONUCLEAR).

2PPR-11 – “*Livro de Dados do Reator de Angra IP*”, 2007. Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.

A.J.N. VAN BREEMEN AND L.P.J. VEELTURF, 1996, “*Neural Adaptive Feedback Linearization Control*,” Journal A, vol. 37, pp. 65-71.

BARBOSA, ANDERSON HENRIQUE; FREITAS, MARCÍLIO SOUSA DA ROCHA; NEVES, FRANCISCO DE ASSIS DAS, 2005, “*Confiabilidade Estrutural Utilizando O Método de Monte Carlo e Redes Neurais*” Revista Escola de Minas Print ISSN 0370-4467.

BARRON, A.R., 1992, “*Neural net approximation*”, In Proc. Seventh Yale Workshop on Adaptive and Learning Systems, Yale University, pp. 69-72.

BAUCHSPIESS, A., DRUMMOND, A.C.; ROMARIZ, A.R.S, 1997, “*Servocontrole Não-Linear Auto-Sintonizado por Redes Neurais de Base Radial*”, 3 SBAI –Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, pp.430-435, Vitória, ES, BRAZIL, Sept.

BILLINGS, S.A., 1985a, “*Introduction to Nonlinear Systems Analysis and Identification*”, in K. R. Godfrey and R. P. Jones (eds) Lecture Notes in Control Systems, Signal Processing for Control, SERC Vacation School, Springer-Verlag, pp. 262-294.

BILLINGS, S.A., 1985b, “*An Overview of Nonlinear Systems Identification*”, In *Proceedings of the 7 th IFAC Symposium in System Identification and System Parameter Estimation*, pp.

BISHOP, C., 1995, “*Neural Networks for Pattern Recognition*,” Oxford, New York.

BRANDES, D. Jr, Dias, Amory M., 2005, “*Otimização da Metodologia dos Balanços de Reatividade em Função da Queima do Combustível Nuclear em Angra 2*”, INAC, São Paulo, Brazil.

CAMACHO E. F. & Bordons, C.,1998, “*Model Predictive Control*”. New York, Springer-Verlag.

CFOL I, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Sistema de Controle de Volume de Refrigerante – KBA*. Divisão de Treinamento, ELETROBÁS TERMONUCLEAR S.A (ELETRONUCLEAR).

CFOL I, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Sistemas de Armazenamento de Água Desmineralizada – KBB*. Divisão de Treinamento, ELETROBÁS TERMONUCLEAR S.A (ELETRONUCLEAR).

CFOL I, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Sistemas de Injeção de Ácido Bórico e Água Desmineralizada – KBC*. Divisão de Treinamento, ELETROBÁS TERMONUCLEAR S.A (ELETRONUCLEAR).

CFOL I, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Sistema de Refrigeração do Reator – JEC (SRR)*. Divisão de Treinamento, ELETROBÁS TERMONUCLEAR S.A (ELETRONUCLEAR).

CFOL II, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Física de Reatores:Prática Operacional – FRPO*. Divisão de Treinamento, ELETROBÁS TERMONUCLEAR S.A (ELETRONUCLEAR).

CFOL II, 1998, *Curso de Formação de Operadores Licenciáveis – Sistema de Instrumentação Externa do Núcleo do Reator - JKT*. Divisão de Treinamento, ELETROBÁS TERMONUCLEAR S.A (ELETRONUCLEAR).

CLARKE D. W., MOHTADI, C. & TUFFS, P. S., 1987, “Generalized Predictive Control – Parts 1 and 2”. *Automatica*: Vol. 23, n.º2.

CYBENKO, G., 1989, “*Approximation By Superpositions Of A Sigmoidal Function*”, *Math.Control, Signals, and Systems*, pp. 303-314.

DENNIS, J.E., & Schnabel, R.B., 1983, “*Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*”, New Jersey ,Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

“DOCUMENTATION FOR MATHWORKS PRODUCTS”, Novembro 2002, <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/nnet/>

FSAR, 2007, *Final Safety Analysis Report – Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unit 2*, ELETROBRÁS TERMONUCLEAR S.A, Rev. 9, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

GILL, P. R.; MURRAY, W.; & WRIGHT, M. H., 1981 “*The Levenberg-Marquardt Method*”. § 4.7.3 in *Practical Optimization*. London: Academic Press, pp. 136-137.

HAGAN, M. T., H.B. Demuth and M.H. Beale, *Neural Network Design*, PWS Publishing, Boston, 1996.

- HAGAN, M.T. & DEMUTH, H. B., 1999, “*Neural Networks for Control*,”. *Proceedings of the 1999 American Control Conference*, San Diego, CA, pp1642-1656.
- HAYKIN, S., 1999, “*Neural Networks: A Comprehensive Foundation*,” 2 ed. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- HORNIK, K. M., M. STINCHCOMBE & H. WHITE, 1989, “*Multilayer Feedforward Networks Are Universal Approximators*,” *Neural Net-Works*, vol. 2, no. 5, pp. 359–366.
- HUNT, K.J., SBARBARO, D., ZBIKOWSKI, R. & P.J. GAWTHROP, 1992, “*Neural Networks for Control System - A Survey*,” *Automatica*, vol. 28, pp 1083-1112.
- LEVENBERG, K., 1944. “*A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares*”. *Quart. Appl. Math.* 2, pp 164-168.
- MARQUARDT, D., 1963, “*An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters*”. *SIAM J. Appl. Math.* 11, pp 431-441.
- NIYOGI, P. & F. GIROSI, 1999, “*Generalization Bounds for Function Approximation from Scattered Noisy Data*,” *Adv. Comp. Math.*, vol. 10, pp. 51–80.
- NORGAARD M., O. RAVN, K.N. POULSEN & L.K. HANSEN, 2001. “*Neural Networks for Modelling and Control*”, London, Springer-Verlag.
- OGATA K., 2003, *Engenharia de Controle Moderno*. 4 ed São Paulo, Pearson Education do Brazil.
- PEDROSA, Z., BAUCHSPIESS, A., 1999, “*Implementação do Servocontrole Auto-Sintonizado em Tempo-Real Utilizando Rede Perceptron Multicamadas*”, *Proceedings*

of IV Brazilian Conference on Neural Networks, pp. 888-999, ITA, São José dos Campos – SP, Brazil, Jul.

PINKUS, A., 1999, “*Approximation Theory of the MLP Model in Neural Networks*,” *Acta Numerica*, pp. 143–195 .

RIEDMILLER, M., & Braun, H., 1993 “*A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm*”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*.

SILVA, P. H. F., 2002, *Modelos Através de Redes Neurais Artificiais sem Realimentação para Dispositivos e Circuitos de RF/Microondas*. Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, PB, Brazil.

SOLOWAY, D., & Haley, P.J., 1996, “*Neural Generalized Predictive Control*”, *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 277-281.