



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA MONITORAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REATIVIDADE
E DAS OSCILAÇÕES AXIAIS DE XENÔNIO DO
REATOR NUCLEAR DE ANGRA1**

DÉCIO BRANDES MOURA FERREIRA JÚNIOR

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador:
Dr. Paulo Rogério Pinto Coelho

**São Paulo
2001**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL PARA MONITORAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REATIVIDADE E DAS OSCILAÇÕES AXIAIS DE XENÔNIO DO REATOR NUCLEAR DE ANGRA 1

DÉCIO BRANDES MOURA FERREIRA JÚNIOR

Dissertação apresentada como requisito para a
obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear.

Orientador:

Dr. Paulo Rogério Pinto Coelho



São Paulo

2001

Dedico este trabalho a minha
esposa Lourdes e ao meu filho
João Pedro com todo o meu
coração.

AGRADECIMENTOS

No final desta jornada não poderia deixar dizer o meu muito obrigado a algumas pessoas e instituições:

A minha esposa Lourdes por seu amor, apoio e dedicação. Ao meu filhinho João Pedro, pelo seu sorriso.

Aos meus pais: Décio Brandes M. Ferreira e Nelimar Martins B. M. Ferreira, Minhas irmãs Ana e Lúcia Louise, pelo apoio e a torcida.

Ao meu sobrinho Daniel Lucas Andrade, pelas excelentes dicas em Visual Basic.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), pelos cursos ministrados e por permitir utilizar suas instalações, onde eu encontrei a minha verdadeira vocação profissional.

A Coordenação Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por ter financiado meu mestrado na fase inicial.

Ao meu orientador Dr. Paulo Rogério Pinto Coelho, pela sua paciência e atenção para a finalização deste trabalho.

Ao Dr. José Rubens Maiorino, por ter me apresentado à área Nuclear.

Ao meu amigo Carlos Alberto Zeituni, que sempre me ajudou na pós-graduação do IPEN.

A ELETRONUCLEAR (Eletrobrás Termonuclear S.A.), por ter me permitido a utilização dos recursos da Empresa e os dados de Angra 1 para a realização deste trabalho. Ao Diretor de Operação e Comercialização: Eng. Pedro José Diniz de Figueiredo, ao Superintendente de Produção: Eng. Kleber Ribeiro Cosenza, ao Chefe da Usina de

Angra 1: Eng. João Carlos da Cunha Bastos, ao Adjunto da Chefia de Usina de Angra 1: Físico Antônio Carlos Mázzaro, ao Gerente de Suporte Técnico: Eng. Carlos F. Otton Martins, ao Chefe da Usina de Angra 2: Eng. Humberto Werdine Júnior e ao Eng. Olívio da C. Napolitano.

Ao meu amigo Físico Enio Magalhães Freire, por sua imensa dedicação e seu grande conhecimento técnico que muito me ajudaram.

Ao meu amigo Eng. Francisco José Moreira, por ter me disponibilizado tempo e apoio para realização deste trabalho.

Ao meus amigos do Setor de Engenharia de Reatores da DIES.O: Eng. Carlos Sérgio Monnerat, Físico Anselmo Ferreira Miranda, Físico Eduardo Fernandez Del Peloso e Eng. Gastão Lomes Valadares, que me aturaram e ajudaram a testar o REATIV.

Ao Dr. Aquilino Senra da COPPE, que a partir das deduções das equações de difusão multigrupo, me ajudou a entender a parte teórica deste trabalho.

Ao Físico José Sidinei Freire e Eng. Terezinha C. Ipojuca, que me ajudaram a fazer as comparações dos cálculos realizados com o ANC e o REATIV.

Aos companheiros da Gerência de Combustível (GCN.C), Eng. José Itacy Nuñez, Físico Jorge Luiz Cachoeira Chapot, Físico Nozimar do Couto, Físico Wanderlei Borba Fernandes, Eng. Pedro Ponzoni Filho, Físico Amory Martins Dias, Eng. Mário Augusto Mandarano Monteiro, pelo apoio e atenção.

Ao operador de Reator Nailton de Sousa Filho e ao Eng. Francisco Carlos de Andrade, por terem sempre me fornecido as informações que solicitei.

Ao Dr. Yoichiro Shimazu, do Japão, o seu trabalho em oscilações de Xenônio mudou o rumo desta tese.

Bem, à todos aqueles que me ajudaram.

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL
PARA MONITORAÇÃO DOS PARÂMETROS DE REATIVIDADE
E DAS OSCILAÇÕES AXIAIS DE XENÔNIO
DO REATOR NUCLEAR DE ANGRA 1**

DÉCIO BRANDES MOURA FERREIRA JÚNIOR

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a modernização de parte do módulo de programas de funções do reator no computador de processos de Angra 1. O sistema computacional desenvolvido possibilita, através de uma interface gráfica, uma interação eficiente entre o sistema de aquisição de dados da instrumentação, o banco de dados do sistema e o usuário. Com isto houve uma agilização nos métodos de aquisição de dados, reprodução, cálculo, análise dos resultados, automatização de procedimentos e atualização de parâmetros no banco de dados, dos fatores que afetam a reatividade do reator e a queima do combustível na usina.

Dentro do objetivo deste trabalho foi a utilização da metodologia TRIAX no computador de processos de Angra 1, para o acompanhamento e controle de oscilações axiais de Xenônio. Um estudo com dados reais da instrumentação de Angra 1 foi realizado para avaliar e validar a metodologia, obtendo-se ótimos resultados.

**DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL SYSTEM FOR
MONITORING REACTIVITY PARAMETERS
AND XENON OSCILLATIONS OF
ANGRA NUCLEAR POWER STATION – UNIT 1.**

DÉCIO BRANDES MOURA FERREIRA JÚNIOR

ABSTRACT

The objectives of this work was the modernization of the reactor operational functions within the plant process computer. The computational system, as developed, provides, through a graphic interface, an efficient interaction between the user, the system data bank and the data acquisition system. As a consequence, it was noted an agilization in the data acquisition methods, data reproduction, calculations, result analysis, procedure automation and update of data bank parameters and factors affecting reactor reactivity and average core burnup.

Inside of the objective of this work was the implementation of TRIAX methodology for monitoring and control of xenon oscillations in the computer process of Angra 1. Herewith it is presented the data set and results of calculations used for the validation of the method at the plant. It was obtained good result performance.

SUMARIO

FOLHA DE ROSTO.....	I
AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FÍSICA DE UM REATOR PWR.....	7
2.1 Controle de Reatividade.....	8
2.1.1 Controle da Reatividade Através do Sistema de Controle Químico e Volumétrico.....	8
2.1.2 Controle da Reatividade Devido a Movimentação de Barras de Controle..	12
2.2 Efeitos da Temperatura na Reatividade.....	17
2.2.1 Coeficiente de temperatura do Moderador.....	17
2.2.2 Coeficiente de temperatura do Combustível.....	22
2.2.3 Coeficientes de Vazios.....	24
2.2.4 Coeficientes de Potência e Defeitos de Potência.....	25
2.2.5 Defeito Isotérmico de Temperatura.....	26
2.3 Efeito dos Venenos de Fissão na Reatividade.....	29
2.3.1 Resolução da Equação da Difusão Multigrupo.....	29
2.3.2 Cálculo da Densidade Atômica dos Venenos de Fissão.....	32
2.3.2.1 Cálculo das Densidade Atômicas do Iodo e Xenônio.....	32
2.3.2.2 Cálculo das Densidade Atômicas do Promécio e Samário.....	35
2.3.3 Determinação dos Grupos de Constantes.....	36
2.3.4 Cálculo do Fluxo Neutrônico Total.....	39
2.3.5 Cálculo da Densidade dos Produtos de Fissão e Resolução das Equações da Reatividade.....	40
2.4 Balanços de Reatividade.....	41
2.5 Cálculo da Queima Total do Combustível.....	47
2.6 Anomalias de Reatividade.....	48
3 OSCILAÇÕES DE XENÔNIO.....	49
3.1 Oscilações Axiais do Xenônio.....	50
3.2 Detetores da Faixa de Potência.....	52
3.3 Diferença Axial de Fluxo e “Axial Offset”.....	53
3.4 Técnicas Utilizadas para o Controle de Oscilações Axiais de Xenônio.....	56

4	TRIAX - O NOVO CONCEITO DE “AXIAL OFFSET”	59
4.1	Método Direto para o Controle Ótimo da Oscilação de Xenônio.....	62
4.2	Procedimento Guia Contínuo para o Controle da Oscilação de Xenônio.....	63
5	DESENVOLVIMENTO E TESTE DO SISTEMA	67
5.1	Acompanhamento e Controle dos Parâmetros de Reatividade do Reator.....	68
5.1.1	PP-R11 - Livro de Dados do Reator.....	69
5.1.2	XESM - Módulo para o Cálculo dos Transitórios de Xenônio e de Samário.....	75
5.1.3	PP-R14 - Parâmetros Referenciais de Reatividade.....	80
5.1.4	PP-R03 - Cálculo da Margem de Desligamento.....	86
5.1.5	PP-R04 - Cálculo da Concentração Crítica de Boro Estimada (CCE) ou Cálculo da Posição de Bancos de Controle Crítica Estimada (PCE).....	90
5.1.6	PI-R07 - Cálculo da Anomalia de Reatividade.....	96
5.2	Acompanhamento da Queima do Combustível Nuclear e Procedimentos de Supervisão (“Surveillance”).....	99
5.3	Acompanhamento das Oscilações de Xenônio.....	101
5.3.1	Estudo do Método Direto para o Controle Ótimo das Oscilações de Xenônio.....	106
5.3.2	Estudo do Procedimento Guia Contínuo para o Controle de Oscilações de Xenônio.....	109
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	112
7	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

A otimização de processos industriais de geração de energia exigem cada vez mais um perfeito conhecimento das características do sistema com qual se está trabalhando, bem como requer os meios eficientes e seguros de se alterar estas características conforme as necessidades do processo.

A operação de um reator nuclear tipo PWR necessita de respostas rápidas: na determinação da queima de combustível nuclear, na a determinação dos fatores que afetam a reatividade do núcleo e no conhecimento do perfil da distribuição espacial da densidade de potência especialmente no caso da ocorrência de uma oscilação de Xenônio; isto se deve a fatores de segurança nuclear, operacionais e econômicos.

A monitoração de uma usina nuclear de potência deve realizar de modo eficiente a interação entre os dados fornecidos pelos códigos computacionais, que são utilizados para o projeto do núcleo, com os dados provenientes do sistema de instrumentação e controle. Estes sistemas estão evoluindo seguindo os avanços da informática.

O computador de processos utilizado até recentemente de Angra 1, o VAX que ocupava uma sala inteira de Angra 1, foi substituído por uma estrutura do tipo cliente servidor, através de uma rede de microcomputadores. Esta estrutura possui a capacidade de processar e armazenar informações muitas vezes superiores ao antigo VAX. O programa utilizado para a realização do projeto do núcleo em Angra 1, que realiza cálculos tridimensionais nodais, era processado no computador IBM de Furnas e é atualmente processado em computadores pessoais (PC's) em poucos segundos.

O código FOLLOW [1], fornecido pela Westinghouse por ocasião do comissionamento da usina de Angra 1 e incorporado ao computador de processo o PRODAC 2500 foi o primeiro código utilizado para a determinação dos parâmetros de reatividade e queima. A entrada de dados para este programa era realizada através de fitas perfuradas.

Em 1989 foi implementado pela COPPE a primeira versão do SICA - Sistema Integrado de Computadores de Angra 1 [2],[3] , que é um sistema computacional em tempo real com o objetivo de monitorar os parâmetros de segurança.

O projeto do SICA é baseado em uma filosofia de banco de dados de tempo real, onde os dados são implementados a cada quatro segundos, e em uma interação homem / máquina composta de informações alfanuméricas e gráficas que permitem uma interpretação eficiente dos dados por parte do operador.

Em 1997 foi implementado o SICA 2.0. Trata-se de um sistema de fornecimento de informações integradas e estruturadas, as quais são passadas aos operadores sob forma gráfica através de monitores coloridos. Este sistema possui diversas funções que estão agrupadas em módulos os quais estão voltados para aplicações bem definidas. Estes Módulos são:

- SAD Sistema de Aquisição de Dados.
- SSPA Sistema de Supervisão de Parâmetros de Angra 1.
- SCA Sistema de Controle Ambiental.
- REATOR Sistemas de Funções do Reator.

O modulo de funções do reator [4] foi desenvolvido pela equipe do Dr. Aquilino do Laboratório de Monitoração de Processos (LMP) da COPPE na primeira versão do SICA. Este módulo foi desenvolvido para automatizar alguns procedimentos operacionais da usina ligados a área de Reator e Performance e substituiu as funções do código FOLLOW.

Novos sistema de monitoração do núcleo do reator estão disponíveis no mercado. A Westinhouse desenvolveu para as usinas com o seu projeto o sistema BEACON [5]. Este programa computacional pode ser acoplado diretamente ao sistema de instrumentação e controle ou ao computador de processos o que possibilita a monitoração "on line" das condições do núcleo entre outras funções.

O sistema GARDEL [6], utilizado tanto em usinas do tipo BWR quanto em PWR tipo Angra 2, foi desenvolvido pela StudsvikTMScandpower com o mesmo objetivo do sistema BEACON. Estes sistemas utilizam o mesmo tipo de cálculo neutrônico utilizados nos programas de projetos do núcleo.

Em Angra 1 os valores da reatividade dos fatores que afetam o núcleo do reator são calculados pelo código ANC [7], que é um código multidimensional nodal utilizado para todos os tipos de cálculos de projeto do núcleo e pelo código XESM [8],[9],[10] que é o código utilizado para o cálculo de transitórios de Xenônio e Samário.

Antes da parada para troca de combustível nuclear ou quando é necessário durante um ciclo de operação o código ANC é executado e uma série de tabelas, figuras e constantes são gerados. Os valores da reatividade para determinados parâmetros que afetam o reator durante o ciclo de operação são embutidos no Livro de Dados do Reator [11],[12], as constantes relacionadas aos parâmetros de reatividade são atualizadas no computador de processos de Angra 1. O código LEOPARD [13] é executado antes do início de cada ciclo e são geradas as seções de choque para todos os componentes do núcleo de reator utilizadas no programa XESM.

O Livro de Dados do Reator contém os dados que são necessários para a partida e operação eficiente e segura do reator e do turbo gerador. Suas tabelas e figuras são atualizadas por profissionais do Setor de Engenharia de Reatores, sendo as mesmas utilizadas rotineiramente tanto por operadores do reator quanto por físicos e engenheiros do reator.

Os valores de reatividade contidos no livro de dados do reator são utilizados como parâmetros referenciais de reatividade [14] e servem para a determinação da Margem de Desligamento do Reator e Determinação da Posição de Barras ou Concentração de Boro para a Criticalidade e Cálculos de Anomalias de Reatividade [15], [16],[17].

Os seguintes programas que trabalham com os parâmetros de reatividade e estão atualmente disponíveis no módulo Sistemas de Funções do Reator do SICA:

- PPR14, coleta e reproduz dados de reatividade nas fases de pré-desligamento e criticalidade inicial.
- PPR03, calcula a quantidade de Ácido Bórico à acrescentar ao Sistema de Refrigeração do Reator (SRR) para assegurar uma suficiente margem de desligamento, ou seja, assegurar uma suficiente sub-criticalidade enquanto o reator estiver desligado, de acordo com o requerido pelas especificações técnicas [18].
- PPR04, determina a posição de barras de controle ou a concentração de boro no SRR quando se deseja criticalizar o reator.
- PIR07, calcula as Anomalias de Reatividade que faz o acompanhamento entre a concentração de boro prevista para determinado ciclo e a concentração de boro real.

Os sinais da instrumentação nuclear da faixa de potência são processados pelo SICA 2.0, este gera arquivo com o histórico da potência nuclear do dia anterior. A partir deste histórico o programa XESM calcula a concentração de Iodo, Xenônio, Promécio e Samário, a reatividade introduzida no núcleo pelo Xenônio e o Samário e a quantidade de combustível queimado.

Os programas acima listados são executados de forma independente e sob a solicitação do usuário e devem ser reinicializados a cada nova rodada de cálculo o que costuma ser um processo trabalhoso, são oriundos da primeira versão do SICA, estão desatualizados tanto em relação a interface com o banco de dados do SICA 2.0 quanto a sua interação com o usuário.

Em reatores PWR de grande porte, três modos de oscilações induzidas de Xenônio são conhecidos: o axial, radial e o azimutal. As oscilações do tipo radial e azimutal são normalmente convergentes, mas as do tipo axial podem tornar-se divergentes.

Existem vários estudos e experimentos que visam o controle das oscilações axiais de Xenônio [19],[20],[21], mas em geral exigem tratamentos teóricos complicados, que requerem a resolução do problema do valor de contorno e a não linearidade do cálculo da concentração de Xenônio, em conjunto com a distribuição espacial da concentração de Iodo e de Xenônio.

Um novo conceito para o acompanhamento e o controle de Oscilações de Xenônio tem se mostrado efetivo em reatores do tipo PWR no Japão [22],[23]. Esse conceito é baseado em dois valores adicionais ao “Axial Offset” de Potência (AO_P): o “Axial Offset” de Iodo (AO_I) e o “Axial Offset” de Xenônio (AO_{Xe}).

O AO_I é definido como o “Axial Offset” da distribuição de potência que induziria a distribuição atual de Iodo em condições de equilíbrio. O AO_{Xe} é definido do mesmo modo que o AO_I para o Xe. Este tipo de controle de Oscilação de Xenônio recebe o nome de TRIAX [24], conforme referenciado acima.

As Oscilações de Xenônio são causadas por um desequilíbrio entre a distribuição de potência e de Xenônio. Durante as condições estáveis estas distribuições estão em equilíbrio, bem como a distribuição do Iodo, que é o precursor do Xenônio. Então, em qualquer condição de equilíbrio, o que significa que nenhuma Oscilação de Xenônio deverá ocorrer; os três valores de “Axial Offset” devem ser iguais. Esta simples condição pode então ser utilizada como critério para o controle de Oscilações de Xenônio.

Um procedimento operacional para o controle das Oscilações de Xenônio foi desenvolvido pelo Dr. SHIMAZU [25] com a utilização da visualização “on-line” da trajetória da curva ($AO_P - AO_I$) versus ($AO_P - AO_{Xe}$) em um gráfico X-Y. O gráfico da curva ($AO_P - AO_I$) versus ($AO_P - AO_{Xe}$) no plano X -Y mostra um comportamento simples e característico que pode ser utilizado pelo operador do reator para controlar o Oscilação de Xenônio, através da movimentação de barras de controle.

Novos métodos de se programar computadores estão sendo utilizados visando a interação ótima entre o usuário e o programa. As interfaces gráficas da tela do computador, o “mouse” , o teclado, o sistemas de aquisição de dados e o bancos de dados devem

funcionar em conjunto de modo o possibilitar que o programa desenvolvido tenha sua performance incrementada.

Um dos objetivos do trabalho aqui apresentado foi a modernização do módulo de programas de funções do reator do computador de processos de Angra 1. O programa desenvolvido possibilitou agilização dos métodos de aquisição, reprodução, cálculo e atualização dos parâmetros de todos os fatores que afetam a reatividade do reator e a queima total do combustível nuclear na usina.

Uma interface gráfica no sistema desenvolvido está a disposição dos usuários para consulta , realização de cálculos, automatização de procedimentos e consulta e atualização de parâmetros no banco de dados do programa, em qualquer situação operacional na usina.

O outro objetivo deste trabalho foi desenvolvimento no computador de processos de Angra 1 da utilização da metodologia TRIAX para o acompanhamento e controle de oscilações axiais de Xenônio. Um estudo com dados reais da instrumentação de Angra 1 foi realizado para avaliar e validar a metodologia.

2 FÍSICA DE UM REATOR TIPO PWR

Os reatores nucleares precisam ser carregados com uma quantidade maior de combustível do que a meramente suficiente para se alcançar a criticalidade, no reator crítico $k_{ef} = 1$. O reator precisa ter uma reserva de reatividade positiva; *excesso de reatividade* (ρ_{ex}), de modo a possibilitar sua operação a plena potência por longo período de tempo.

O *excesso de reatividade* ρ_{ex} é requerido para compensar os seguintes efeitos:

- Queima do Combustível ao longo de um Ciclo de Operação.
- Produtos de Fissão, especialmente o Xenônio e o Samário.
- Varição da Temperatura do Combustível e do Moderador.

Para contrabalançar o ρ_{ex} durante a operação ou desligamento é necessário a introdução de certa quantidade negativa de reatividade ao núcleo do reator que pode ser ajustada ou controlada. Nos reatores do tipo PWR esta quantidade negativa de reatividade é introduzida através de fortes absorvedores de nêutrons, isto se faz através do:

- Controle Químico e Volumétrico; através da dissolução de Ácido Bórico no Circuito Primário.
- Conjunto de Bancos de Barras de Controle

Para que o reator possa permanecer crítico a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\rho_{ex} + \rho_{Ac. \text{ Bórico}} + \rho_{Barras} + \rho_{Temp. \text{ Comb.}} + \rho_{Temp. \text{ Mod.}} + \rho_{Vazios} + \rho_{Xenônio} + \rho_{Samário} = 0 \quad (1)$$

A seguir serão analisados como cada um dos fatores acima citados afeta o K_{ef} da reação em cadeia[26], enfatizando as características do reator nuclear de Angra 1.

2.1 Controle de Reatividade

O controle da reatividade do reator é necessário para que se possa gerar energia utilizável. Em reatores do tipo PWR o controle da reatividade e conseqüentemente da potência gerada é feito através da movimentação de bancos de controle ou pela adição de Ácido Bórico ou de Água Desmineralizada no Sistema de Refrigeração do Reator (SRR).

2.1.1 Controle da Reatividade Através do Sistema de Controle Químico e Volumétrico.

Em usinas do tipo PWR o Sistema de Controle Químico e Volumétrico possibilita controlar os seguintes efeitos relacionados com as mudanças de reatividade:

- Aquecimento do Sistema de Refrigeração do Reator da Condição Desligado Frio (DF) para Quente Potência Zero (QPZ).
- Queima do Combustível
- Variações de Xenônio
- Acúmulo de Produtos de Fissão

O Boro 10 presente em 20 % dos átomos de boro do ácido bórico (H_3BO_3), ou simplesmente referenciado como *boro* em reatores PWR, possui uma alta seção de choque para nêutrons térmicos. A sua introdução ou retirada do circuito primário introduz variações na reatividade do reator devido a alterações no valor do f (fator de utilização térmica) da fórmula dos seis fatores. O valor de f é inversamente proporcional a soma das seções de choque macroscópicas de absorção de todos os materiais que compõe o núcleo do reator.

O valor da reatividade do ácido bórico em reatores do tipo PWR é referenciado em termos do *valor diferencial do boro* [27], figura 2.1.1.1, cuja unidade é expressa em pcm/ppm. O *valor diferencial do boro* representa as variações de reatividade devido a mudanças na *concentração de boro* (C_b).

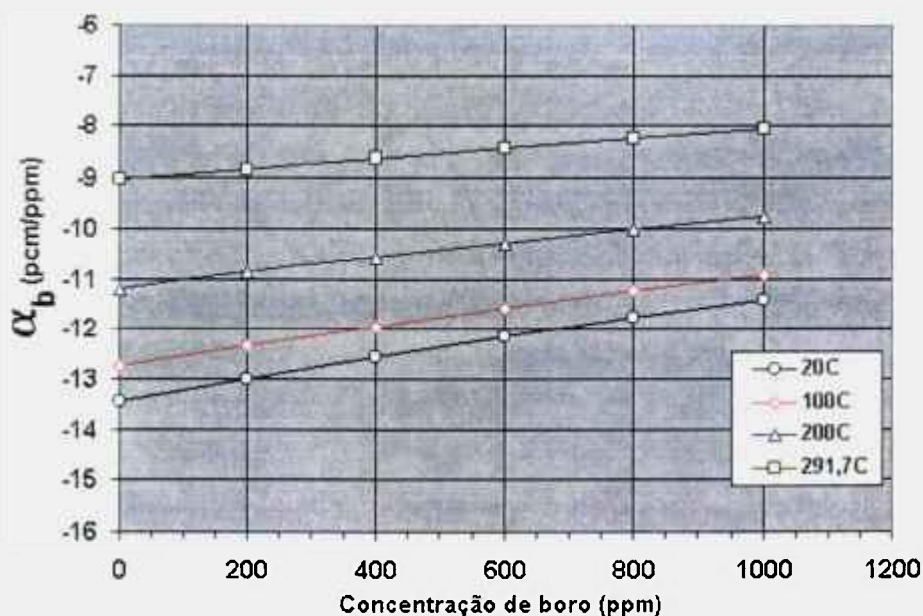


Figura 2.1.1.1- Valor Diferencial de Boro vs. Concentração de Boro e vs. Temperatura do SRR (Sistema da Refrigeração do Reator) – TBI(Todas as Barras Inseridas), livre de Xenônio. PP-R11 Livro de Dados do Reator de Angra 1, Ciclo 9.

A reatividade total do boro também pode ser referenciada através do *valor integral do boro*, tabela 2.1.1.1. O *valor integral do boro* é determinado através da integração da curva do *valor diferencial do boro* para uma determinada temperatura de 0 ppm de concentração de boro até a concentração de boro que se deseje.

Tabela 2.1.1.1		Valor Integral do Boro (pcm) em Função da Concentração de Boro e da Temperatura do Moderador, QPP (Quente Plena Potência), IDC (Início de Ciclo) e FDC (Fim de Ciclo), TBR (todas as Barras Retiradas), Livre de Xenônio, Livro de Dados do Reator, PP-R11 Ciclo 9, Angra 1.			
Concentração de Boro (ppm)	Temperatura do Moderador °C				
	290	291,7	300	306	
0	0	0	0	0	
200	-1836	-1827	-1782	-1750	
400	-3626	-3608	-3520	-3490	
600	-5373	-5347	-5219	-5123	
800	-7081	-7047	-6878	-6811	
1000	-8755	-8714	-8508	-8409	

Os seguintes fatores afetam o valor diferencial do boro:

- Concentração de Boro C_B , a medida que a concentração de boro aumenta, o *valor diferencial do boro* se torna menos negativo, devido a competição entre os átomos de boro por nêutrons.
- Temperatura, a medida que ocorre o aumento da temperatura o *valor diferencial do boro* se torna menos negativo devido a diminuição da densidade do moderador, fazendo com que as moléculas de boro se afastem uma das outras e com isto diminuindo a possibilidade do nêutron ser absorvido pelo boro.
- Acumulo de produtos de fissão, faz com que o *valor diferencial do boro* se torne menos negativo devido a ação dos venenos pois estes competem com o boro na absorção de nêutrons.

Durante um ciclo de operação de um reator tipo PWR a *concentração de boro* é reduzida para compensar a queima do combustível, figura 2.1.1.2. Então o *valor diferencial do boro* se torna mais negativo devido a diminuição na concentração de boro, mas a medida que ocorre o acumulo de produtos de fissão durante um ciclo de operação o *valor diferencial do boro* tende novamente a um valor menos negativo como pode ser visto pela figura 2.1.1.3, sendo este último o fator preponderante.

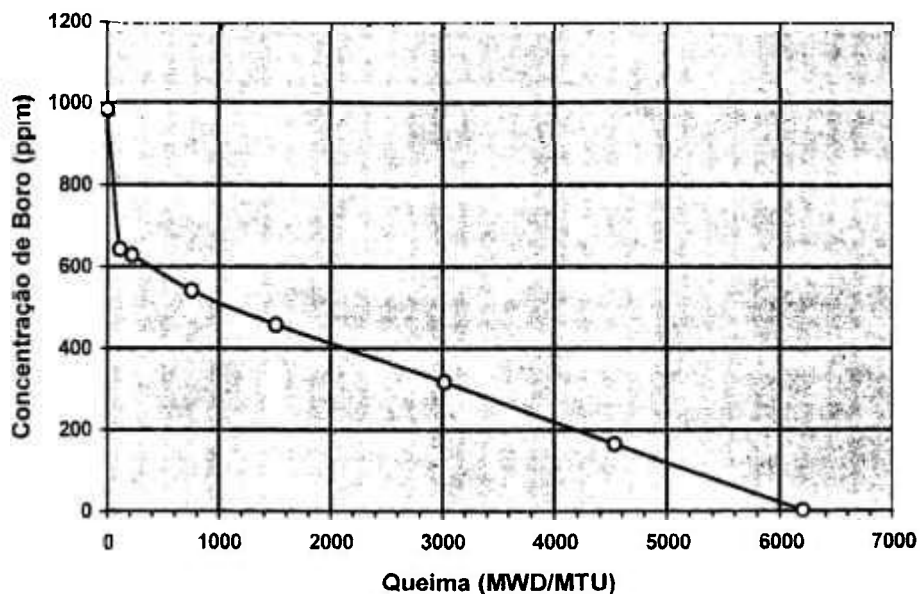


Figura 2.1.1.2– Concentração de Boro Crítico em Função de Queima, PP-R11 Livro de Dados do Reator de Angra 1, Ciclo 9.

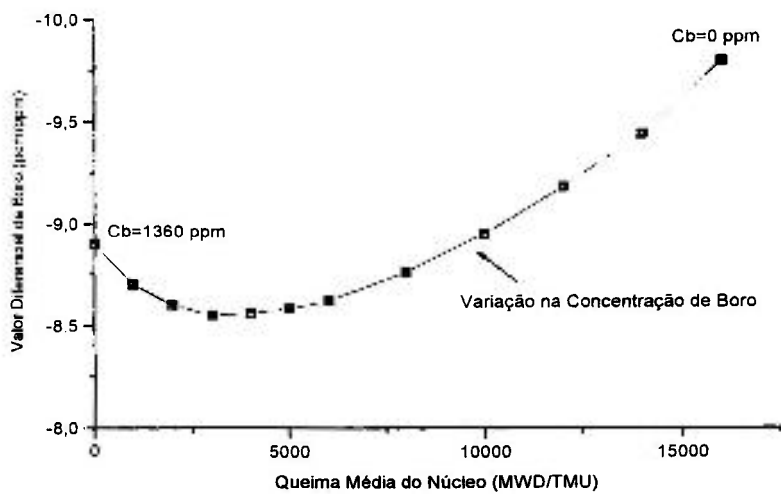


Figura 2.1.1.3– Gráfico da Mudança do Valor Diferencial de Boro em função da Queima do Núcleo, Westhingham Nuclear Training Operations, Plant Information Operations, pg I-5.27.

2.1.2 Controle da Reatividade do Reator Devido à Movimentação de Barras de Controle

A movimentação de barras de controle introduz variações na reatividade do reator devido a mudanças no valor do fator de utilização térmica f , que é inversamente proporcional a soma das seções de choque macroscópicas de absorção de todos os materiais que compõe o núcleo do reator. A introdução de uma barra de controle diminui o valor do K_{ef} do reator devido ao aumento do valor de Σ_{abs}^{barra} (seção de choque macroscópica de absorção da barra de controle) e sua retirada provoca o efeito inverso.

A distribuição espacial da potência do reator é sensivelmente afetada pela movimentação de barras de controle no reator. Um reator funcionando com as barras de controle completamente retiradas tem normalmente a distribuição axial e radial do fluxo de nêutrons na forma cossenoidal. Se ocorrer uma inserção de uma barra de controle na parte superior de núcleo esta provocará uma depressão axial do fluxo no local onde estiver localizada, figura 2.1.2.1. O efeito inverso será observado na extremidade oposta a barra, ou seja, um aumento das fugas na parte inferior do reator será observado. As barras de controle atuam tanto como abvedoras de nêutrons como incrementam as fugas do reator.

Quando a barra estiver totalmente inserida a distribuição axial do fluxo será novamente um cosseno. Portanto, muito embora, inserir uma barra de controle altere o valor de K_{ef} , a forma do fluxo por si só não depende de seu valor.

O valor da reatividade das barras de controle não é constante para cada unidade de comprimento de barra inserido no reator. Se uma barra de controle for ligeiramente inserida em uma extremidade do reator seu efeito será pequeno. A medida que a barra estiver sendo inserido seu efeito continuará pequeno até que esta se aproxime o centro do reator, onde uma pequena inserção da barra de controle terá um grande efeito no valor da reatividade total do reator, ou seja, o efeito das barras de controle será mais pronunciado nas regiões de mais alto fluxo.

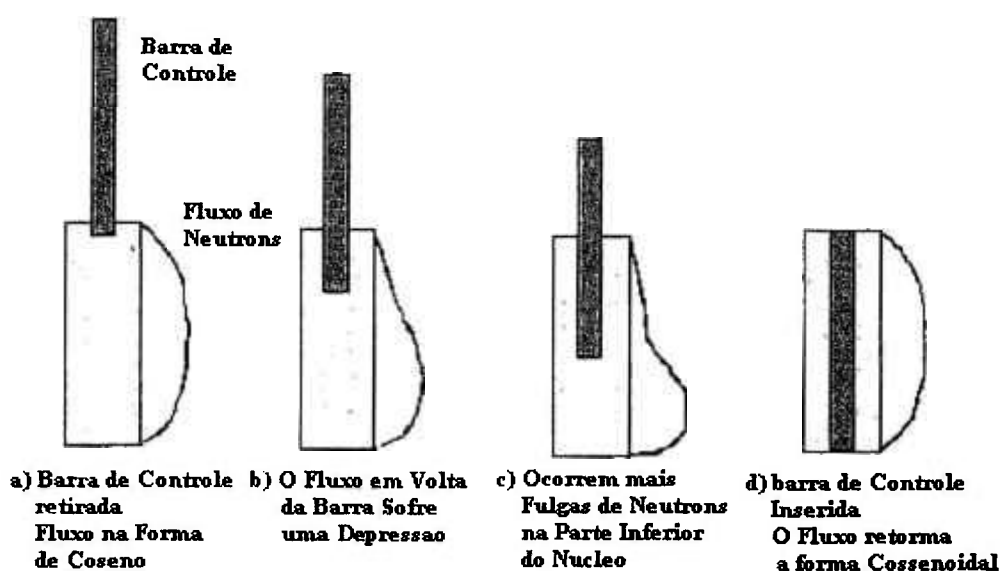


Figura 2.1.2.1 Representação Esquemática da Distribuição Axial da Potência do Reator em função da Inserção de uma Barras de Controle na parte Superior de Reator.

O valor diferencial da barra de controle ou de um conjunto de barras (*bancos de barras de controle*) [28] em determinada posição no reator é medido na unidade de pcm/polegada para reatores tipo PWR/WHESTHINGHOUSE. Na figura 2.1.2.2 pode-se observar que o valor diferencial da barra de controle é pequeno nas extremidades do núcleo e grande no centro, ou seja, este segue aproximadamente a distribuição axial do fluxo de nêutrons no reator.

O valor integral da Barra de Controle ou de um Conjunto de Barras de Controle (*Bancos de Barras de Controle*) é determinado pela integração do *valor diferencial da barra* ou *banco de barras* da extremidade núcleo até a posição em que esta se encontra e serve como medida da reatividade total inserida pela barra de controle em uma determinada posição. Na figura 2.1.2.2 pode-se observar o *valor integral* de uma barra em função da posição de inserção da barra de controle no reator.

A usina de Angra 1 possui um total 33 barras que são agrupadas em conjuntos, chamados de *bancos de controle*. Nos *bancos de controle* as *barras de controle* movimentam-se com a mesma velocidade e estão na mesma posição inserção no reator, figura 2.1.2.3.

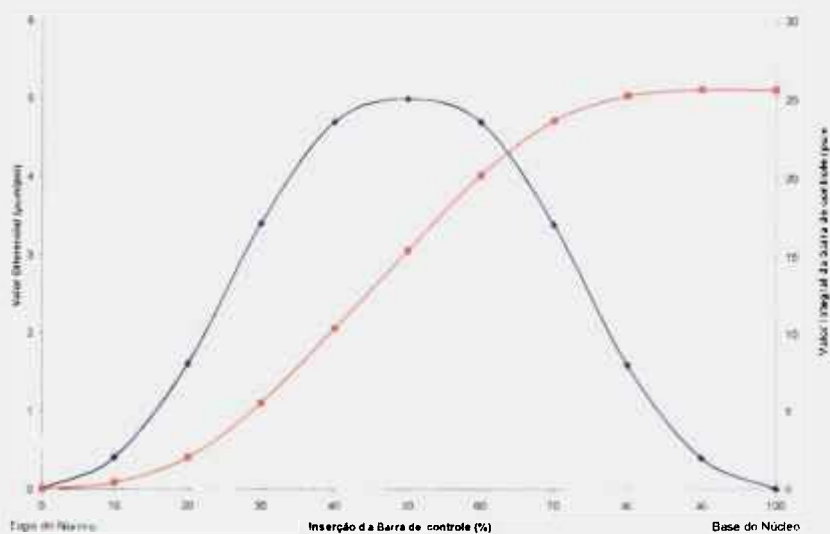


Figura 2.1.2.2 - Valor Diferencial e Valor Integral de uma barra de controle em função da posição de inserção no reator, Westhingham Nuclear Training Operations, Plant Information Operations, pg I-5.40.

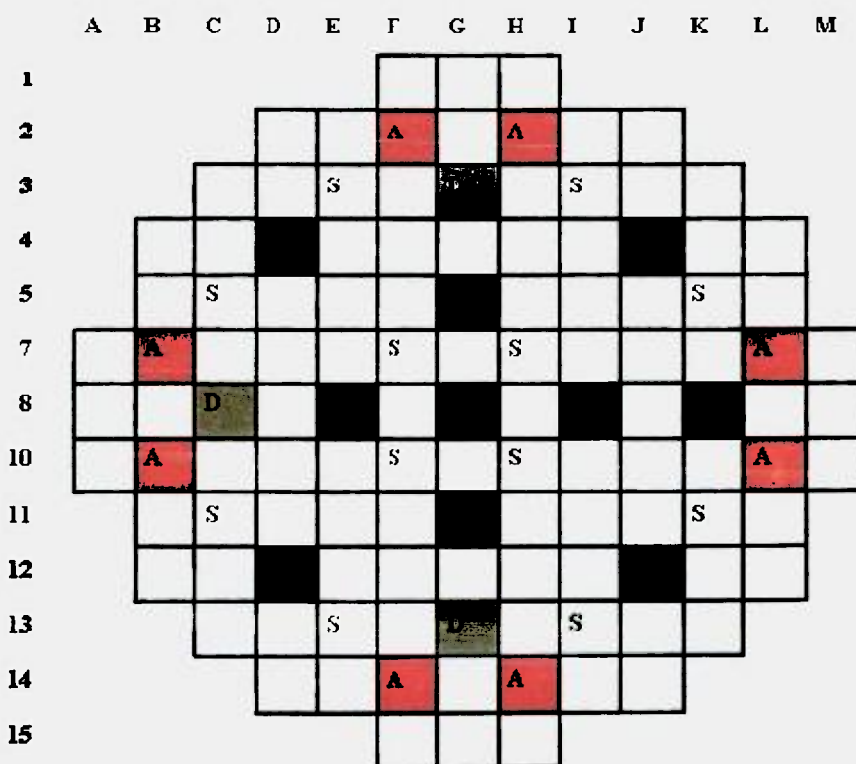


Figura 2.1.2.3 - Núcleo do Reator de Angra 1, Identificação do Posicionamento das Barras de Controle, S -Bancos de Desligamento, A,B,C,D - Bancos de Controle, PP-R11 Livro de Dados do Reator de Angra 1, Ciclo 9.

Os bancos de controle estão divididos do seguinte modo:

Bancos de Desligamento; estes devem conter uma reatividade negativa suficiente para assegurar as margens de desligamento requeridas pelas especificações técnicas.

- Banco S - Conjunto de 12 barras

Bancos de Controle; as barras de controle destes bancos são divididas simetricamente dentro do núcleo para assegurar o formato do fluxo em todos os níveis de potência.

- Banco A - Conjunto de 8 barras
- Banco B - Conjunto de 4 barras
- Banco C - Conjunto de 5 barras
- Banco D - Conjunto de 4 barras

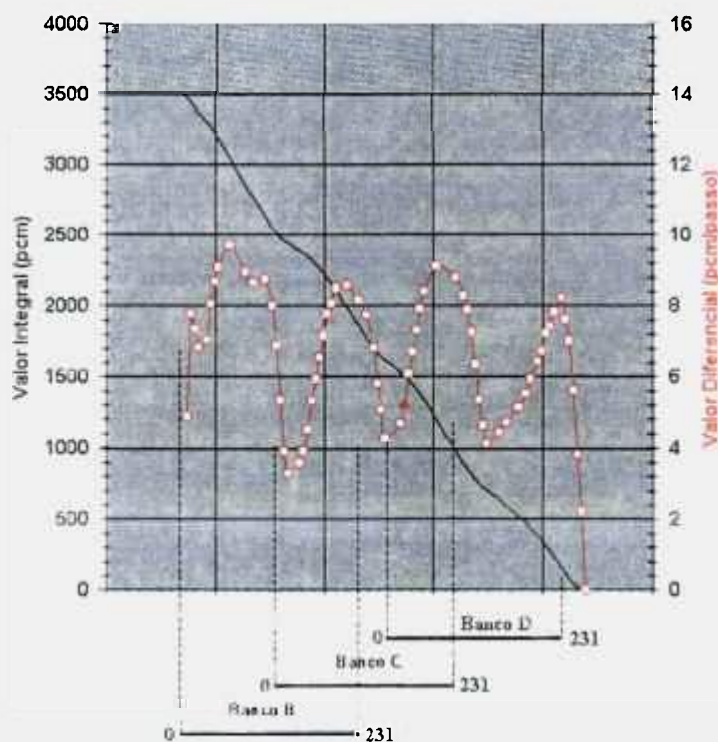


Figura 2.1.2.4- Valor Integral e Diferencial dos Bancos de Controle B, C e D em Sobreposição (Valores Calculados) - IDC, QPZ (Quente Potência Zero) - Livre de Xenônio

Pode-se observar pela figura 2.1.2.2 que o valor diferencial das *barras de controle* no topo e na base do núcleo é aproximadamente igual a zero e que nestas posições um conjunto de barras de controle será incapaz de controlar a reatividade devido a mudanças de potência. Para assegurar que as barras de controle sejam capazes de controlar o reator e providenciar um valor diferencial constante os *bancos de controle* devem ser movimentados em sobreposição, figura 2.1.2.4.

Durante a operação de *criticalização* do reator observa-se claramente como ocorre a movimentação dos bancos de controle em sobreposição. Inicialmente todas as barras de controle estão inseridas TBI (Todas os Bancos de Controle Inseridos).

Nesta operação primeiramente retiram-se todos os *bancos de desligamento*, em seguida os *bancos de controle* são retirados do seguinte modo: retira-se do Banco A, quando este atingir 121 passos (121 polegadas de altura da base do núcleo) inicia-se a retirada do Banco B. O Banco A será totalmente retirado quando este atingir 231 passos (231 polegadas correspondendo a altura do elemento combustível), quando o Banco B atingir 121 passos inicia-se a retirada do Banco C. Seguindo o esquema de movimentação dos demais bancos o Banco D iniciará sua movimentação quando o Banco C estiver em 121 passos. O reator deverá estar crítico quando o banco D atingir a posição crítica estimada. Na tabela 2.1.2.1 pode-se observar, até a posição do banco D em 185 passos, o valor integral de bancos em função da altura de retirada dos bancos e da potência do reator.

Tabela 2.1.2.1				Valor Integral dos Bancos de Controle (pcm) em Sobreposição em Função da Posição dos Bancos em passos (1 passo = 1 polegada) e da Potência do Reator – IDC, Livre de Xenônio – Livro de Dados do Reator – Ciclo 9					
Bancos de Controle				Potência (%)					
A	B	C	D	0	20	40	60	80	100
231	231	231	231	0	0	0	0	0	0
231	231	231	225	4	4	3	3	2	2
231	231	231	220	21	19	17	15	13	11
231	231	231	215	42	38	34	30	26	22
231	231	231	210	77	70	63	56	49	42
231	231	231	205	112	102	92	81	71	61
231	231	231	200	154	140	126	112	98	84
231	231	231	195	194	177	160	143	125	108
231	231	231	190	235	215	194	173	153	132
231	231	231	185	275	252	228	204	181	157

2.2 Efeitos da Temperatura na Reatividade

A variação da temperatura nos diversos componentes do núcleo a multiplicação de nêutrons em seu interior; esse efeito é convenientemente expresso em termos de um *coeficiente de temperatura* [29], que é representado pela derivada da reatividade em relação a temperatura.

$$\alpha_T = \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{T=T_0} = \sum_j \left. \frac{\partial \rho}{\partial T_j} \right|_{T=T_0} = \sum_j \alpha_T^{(j)} \Big|_{T=T_0} \quad (2)$$

onde o índice j denota o componente do núcleo cuja temperatura afeta a reatividade. O valor do coeficiente depende também da temperatura inicial em que o reator estava operando. Comumente calcula-se separadamente os coeficientes $\alpha_T^{(j)}$ para $j = \text{moderador}$, $j = \text{combustível}$, $j = \text{refrigerante}$.

Os principais fatores que afetam os *coeficientes de temperatura* são:

- Variação no espectro de energia dos nêutrons devido à mudança da densidade do moderador causada pela temperatura.
- Mudanças na absorção ressonante (Efeito Doppler) causadas pela alteração da temperatura do combustível.
- Concentração de Vazios

2.2.1 Coeficiente da Temperatura do Moderador

A água que é utilizada para refrigerar os elementos combustíveis também serve para que os nêutrons rápidos gerados na fissão sejam moderados para a faixa térmica de energia

no circuito primário dos reatores do tipo PWR. A alteração na razão entre as quantidades de Água e Urânio, ou seja, na razão (H_2O/U) entre a quantidade de moderador e combustível, afeta o valor de K_{ef} da reação em cadeia do seguinte modo:

- aumento da razão H_2O/U faz com que o valor de f diminua devido a absorção de nêutrons nos átomos de Hidrogênio e Oxigênio.
- Com o aumento na razão H_2O/U o valor de p aumenta, ou seja, a medida que mais água for adicionada os átomos do combustível se diluem relativamente, isto faz com que os nêutrons sejam moderados para faixa térmica de energia sem encontrar nenhum absorvedor ressonante enquanto atravessam os níveis de energia dos picos de ressonância.
- A medida que a razão H_2O/U diminui ocorre um aumento nos livre caminhos médios de difusão dos nêutrons, Idade de Fermi (τ) e no Quadrado do Caminho de Difusão Térmico (L^2), causando um aumento na fuga de nêutrons logo um diminuição na *probabilidade de não fuga rápida* (P_{NR}) e na *probabilidade de não fuga térmica* (P_{NT}).

A equação que relaciona os fatores [30] listados acima com o coeficiente de temperatura do moderador α_T é, figura 2.2.1.1 :

$$\alpha_T = \left(\frac{1}{f} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta T} \right) + \left(\frac{1}{p} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta T} \right) - \left(B^2 \frac{\Delta \tau}{\Delta T} \right) - \left(B^2 \frac{\Delta L}{\Delta T} \right) \quad (3)$$

A figura 2.2.1.1 mostra o valor do K_{ef} em função da razão H_2O/U . Por este gráfico pode-se observar que existe um *valor ideal* para a razão H_2O/U . Se o valor de H_2O/U for maior que o *valor ideal* então a água atua como veneno e o valor do K_{ef} diminui em função da diminuição do valor de f , nesta condição diz-se que o reator está *Super Moderado*. Ao contrário se o valor de H_2O/U for menor que o *valor ideal* não haverá água suficiente para moderação dos nêutrons. O valor de p será pequeno e as fugas serão altas, nesta condição diz-se que o reator está *Submoderado*. A razão de H_2O/U é determinado pelo projeto do núcleo, para os reatores do tipo PWR/WESTINGHOUSE este valor é de cerca de 3,5 o

que coloca o reator em uma condição ligeiramente Submoderada ao lado do valor ideal para a razão H_2O/U .

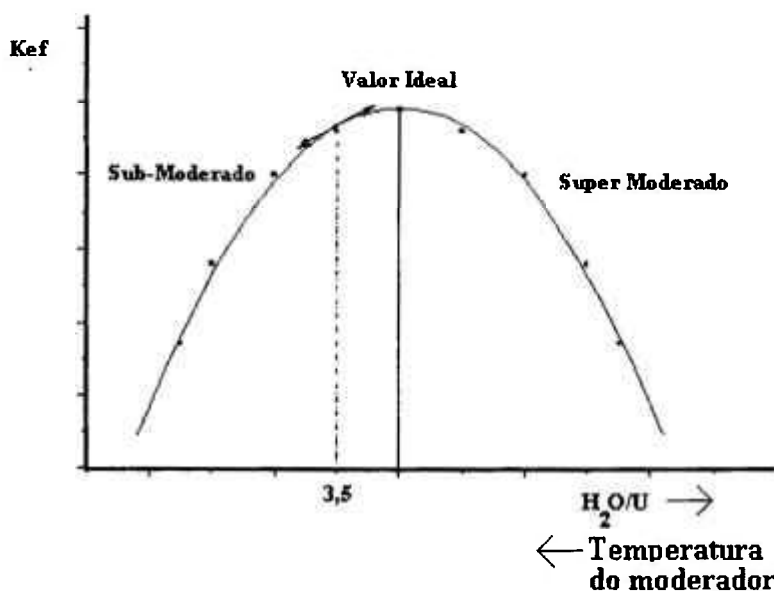


Figura 2.1.1.1 – Efeito Total no K_{ef} em função de H_2O/U , Westinghouse Nuclear Training Operations, Plant Information Operations, pg I-5.6 e I-5.8.

Um dos fatores que afetam o valor da razão (H_2O/U) é a temperatura do moderador. A medida que a temperatura do moderador aumenta a água se expande, diminuindo sua densidade, fazendo com que concentração de átomos de Hidrogênio e Oxigênio fique menor, visto que a concentração de átomos de urânio não se modificam com a temperatura, o valor de razão H_2O/U diminui alterando o valor de K_{ef} .

Pode-se observar pelo gráfico de K_{ef} versus a temperatura do moderador, figura 2.2.1.2, que o valor do *coeficiente da temperatura do moderador* α_T é o coeficiente angular da curva. Por esta curva o valor de α_T pode ser positivo, negativo ou nulo. Se o reator estiver no estado *submoderado* este possuirá um α_T negativo, ou seja, um aumento de temperatura introduz reatividade negativa no núcleo fazendo com que o valor de K_{ef} seja menor. Por outro lado se o valor de α_T for positivo; um aumento da temperatura do moderador resultará em um aumento do K_{ef} introduzindo uma reatividade positiva ao núcleo.

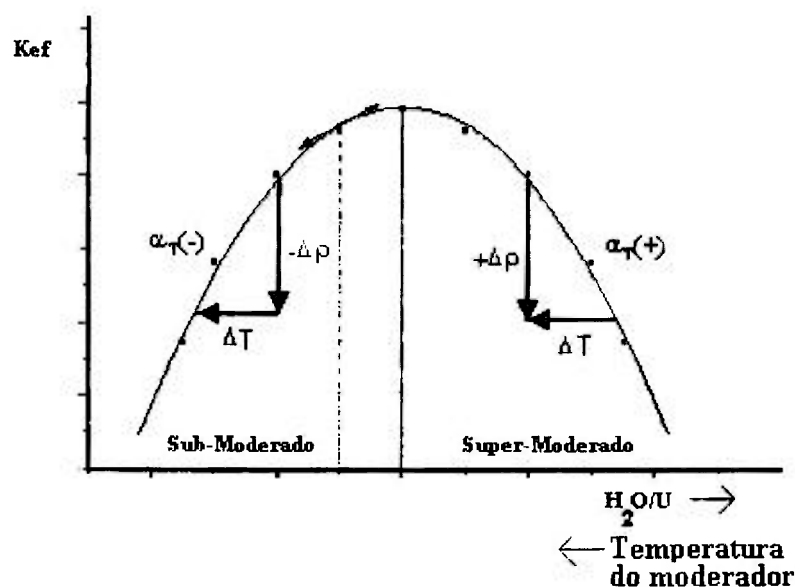


Figura 2.1.1.2 – Efeito Total no K_{ef} em função da Temperatura do Moderador, Westinghouse Nuclear Training Operations, Plant Information Operations, pg 1-5.6 e 1-5.8.

A Concentração de Boro (C_B) exerce grande influência no coeficiente da temperatura do moderador α_T . O boro aumenta a absorção de nêutrons no moderador fazendo com que o valor de f seja diminuído alterando significativamente o valor de K . O efeito líquido faz com que as curvas de K_{ef} versus H_2O/U sejam reduzidas e deslocadas para a esquerda, figura 2.2.1.3.

Se o reator funcionar com a razão de H_2O/U de 3,5 típica e se o valor de C_B for zero o valor de α_T será negativo, a medida que o valor de C_B aumenta o valor de α_T se tornar cada vez menos negativo. Em torno de C_B igual a 1000 ppm, α_T será aproximadamente zero, quando C_B atingir o valor de 2000 ppm o valor de α_T será positivo e o reator poderá estar uma condição insegura. Na figura 2.2.1.4 mostra o valor do coeficiente de temperatura do moderador em função da temperatura do moderador e da concentração de boro.

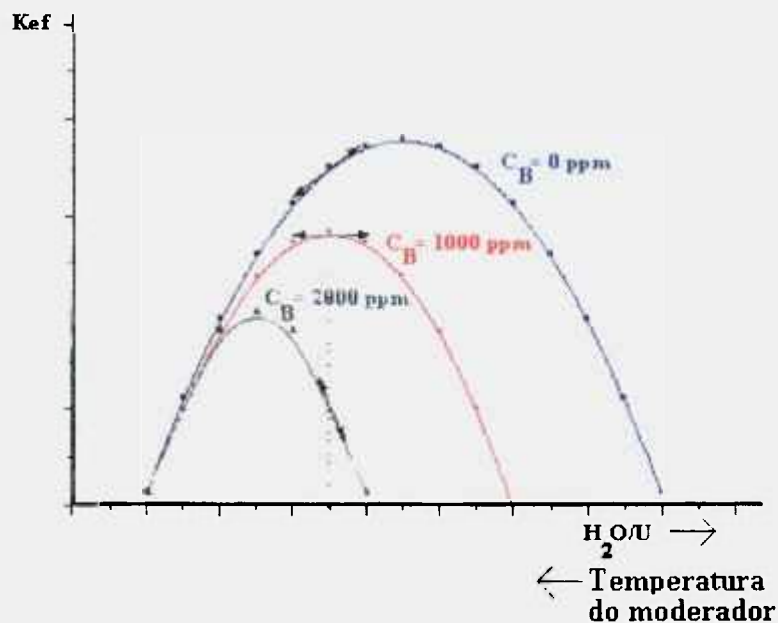


Figura 2.2.1.3 - K_{eff} em função da Concentração de boro e da Razão (H_2O/U), Westinghouse Nuclear Training Operations, Plant Information Operations, pg I-5.9.

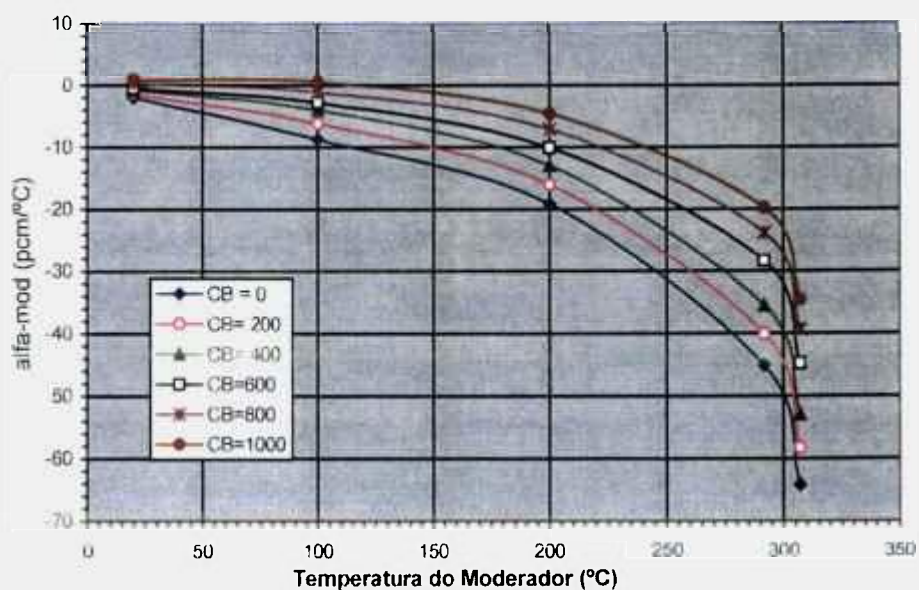


Figura 2.2.1.4 Coeficiente de Temperatura do Moderador versus Temperatura do Moderador . De DF(Desligado frio) até QPZ(Quente Potência Zero) , IDC, FDC, TBR (Todas as Barras Retiradas), Livre de Xenônio, PP-R11 Livro de Dados do Reator de Angra I, Ciclo 0

2.2.2 Coeficiente de Temperatura do Combustível

O *coeficiente de temperatura do combustível*, também conhecido como *Coefficiente Doppler*, representa a variação na reatividade devido a mudança na temperatura do combustível.

O aumento da temperatura do combustível provoca um alargamento e uma diminuição dos picos de ressonância para o U^{238} mantendo a área sob o pico constante. A figura 2.2.2.1 representa a *seção de choque de ressonância*.

Devido ao fato do reator ser do tipo heterogêneo, ocorre o fenômeno da *autoblindagem* que faz com que a parcela do combustível adjacente ao encamisamento absorva os nêutrons com energia igual aos dos picos de ressonância do U^{238} de modo que estes nunca alcançarão o interior do combustível. O aumento da temperatura faz com que nêutrons com energia igual aos dos picos de ressonância penetrem um pouco mais no combustível e aumente a probabilidade de que nêutrons com energia ligeiramente diferente dos picos sejam absorvidos.

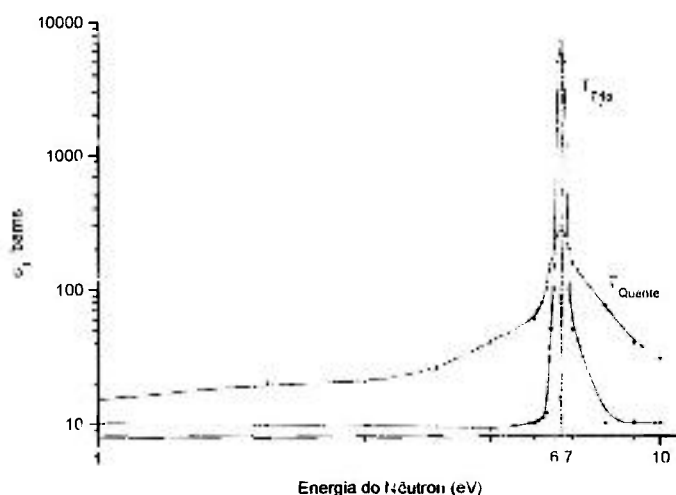


Figura 2.2.2.1. Variação da Seção de Choque de Absorção com a Temperatura para o Pico de Ressonância de 6.7 eV do U^{238}_{92} . Westinghouse Nuclear Training Operations, Plant Information Operations I-5.17.

O aumento da temperatura provocará uma diminuição no valor da *probabilidade de escape a ressonância* (p), conseqüentemente no valor de K_{ef} , introduzindo reatividade negativa ao reator devido a uma maior perda de nêutrons que seriam utilizados na reação em cadeia.

Para expressar convenientemente o coeficiente de temperatura do combustível utiliza-se o *Coefficiente Doppler de Potência*, definido por $\alpha_p^{Comb} = \frac{\partial \rho}{\partial P}$ expresso em pcm/%P, sendo P a potência do reator em %, uma vez que a temperatura do combustível não é observável.

Os fatores que influenciam o *Coefficiente Doppler de Potência* ao longo de um ciclo de operação são:

- Condutividade Térmica dos Gases no Espaço Existente entre as Pastilhas de Combustível e o encamisamento de Zircaloy - "gap", que diminui ao longo do ciclo provocando um aumento na temperatura da pastilha do combustível proporcionando um coeficiente mais negativo conforme o avanço do ciclo.
- Densificação do combustível, que aumenta o "gap", diminuindo sua condutividade térmica, aumentando a temperatura da pastilha e tornando o coeficiente doppler mais negativo.
- Aumento do volume das pastilhas de combustível devido ao efeito da radiação - "*Creep*" do revestimento, tende a diminuir o "gap", aumentando a sua condutividade térmica, diminuindo a temperatura das pastilhas de combustível fazendo o coeficiente doppler ficar menos negativo ao longo do ciclo.
- Formação de Pu^{240} , tem forte absorção por ressonância, torna o coeficiente mais negativo.

O fator “*Creep*” do *Revestimento* é maior que os outros combinados, e devido a isto o *Coefficiente Doppler de Potência* é mais negativo no início do ciclo (IDC) e fica menos negativo a medida que se chegue ao final do ciclo (FDC) . figura 2.2.2.2.

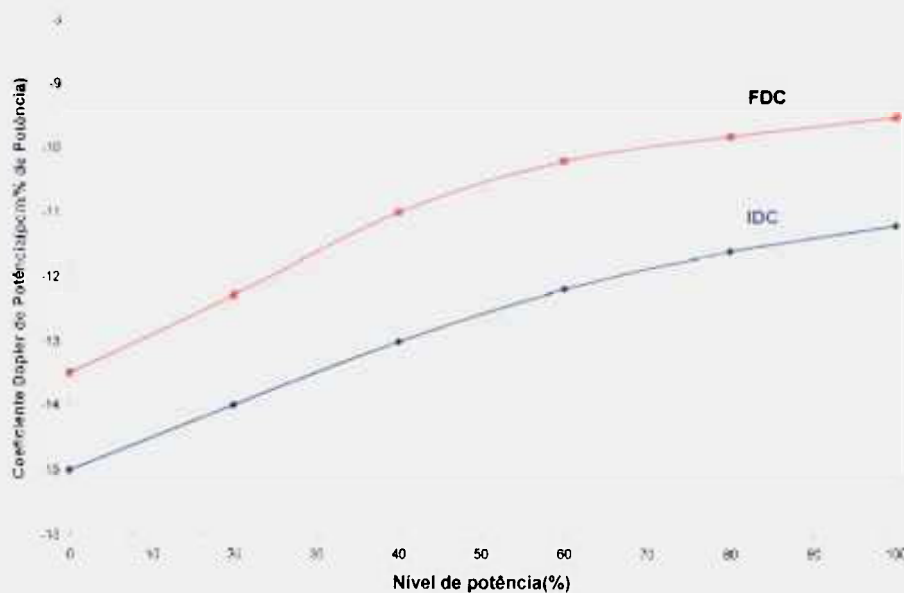


Figura 2.2.2.2. Coeficiente Doppler do Combustível em função da Potência do Reator, IDC (Início de Ciclo), FDC (Fim de Ciclo), Westinghouse Nuclear Training Operations, Plant Information Operations, pg 1-5.20.

2.2.3 Coeficientes de Vazios

O *coeficiente de vazios* exerce pouca influência em reatores PWR's e é definido como a mudança na reatividade devido a formação de bolhas no moderador. Por designação de projeto o total de vazios em reatores do tipo PWR/WESTINGHOUSE deve ser menor que 5% do total de moderador no núcleo.

Devido a diminuição da densidade do refrigerante, causado pelo aumento de vazios, a capacidade de moderação do refrigerante é diminuída como resultado a probabilidade de absorções ressonantes e a fuga de nêutrons são incrementadas introduzindo reatividade negativa ao reator. A unidade para o *coeficiente de vazios* é pcm (% de vazios).

As mudanças no valor do *Coefficiente de Vazios* são influenciadas pelas mesmas variáveis que alteram o *coeficiente de temperatura do moderador* assim sendo o coeficiente de vazios se torna mais negativo a medida que ocorre a queima do combustível. No início de Ciclo (IDC) o *coeficiente de vazios* é de cerca de -20 pcm/(% de vazios) alcançando -100 pcm/(% de vazios) no fim de ciclo (FDC).

2.2.4 Coeficientes de Potência e Defeitos de Potência

A variação da reatividade devido a uma mudança no patamar de potência do reator pode ser representada pelo seu *coeficiente de potência* expresso em pcm/(% de potência), figura 2.2.4.1

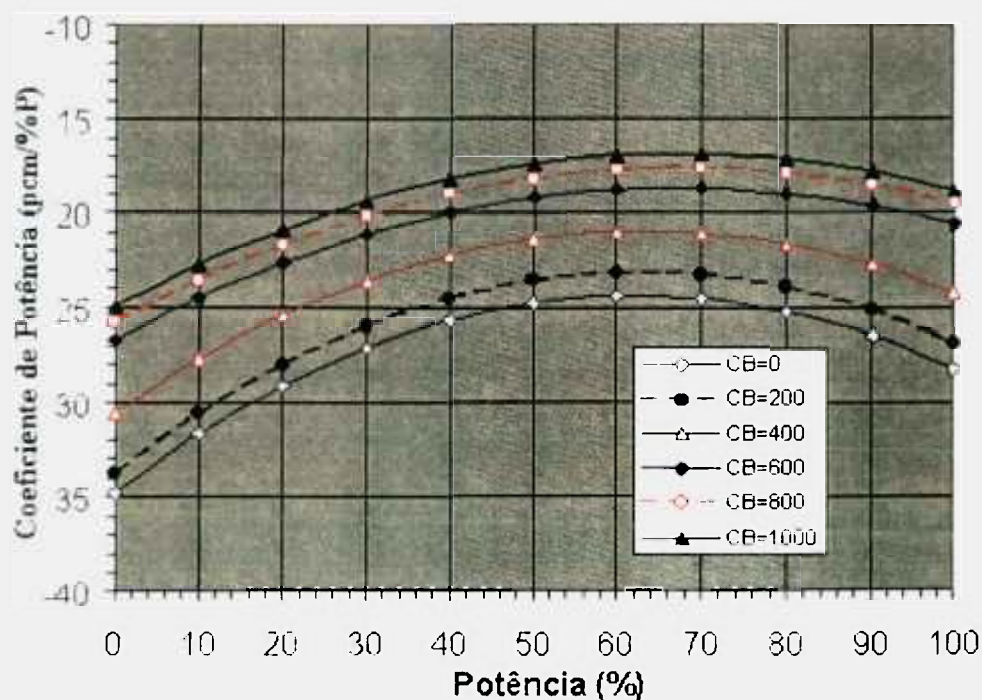


Figura 2.2.4.1 Coeficiente de Potência em função da Concentração de Boro e da Potência do Reator. PP-R11 Livro de Dados do Reator de Angra 1, Ciclo 9.

Como a temperatura do combustível e muitas vezes a temperatura do moderador não são diretamente observáveis o *coeficiente de potência* em usinas PWR/WESTINGHOUSE é formado pela soma dos três coeficientes que estão relacionados com a temperatura: O *coeficientes de temperatura do moderador*, *coeficientes Doppler* e *coeficiente de vazios*.

A medida que ocorre a mudança na potência do reator da condição de *Quente Potência Zero* (QPZ) para a condição *Quente a Plena Potência* (QPP) o *coeficiente de potência* introduz reatividade negativa ao reator. Esta reatividade deve ser compensada com a retirada de barras de controle ou com a diluição do Ácido Bórico. O contrário ocorre após um desligamento quando uma quantidade positiva de reatividade é introduzida ao reator devido ao *coeficiente de potência*.

O valor da reatividade total inserido no reator devido a variações no patamar de potência nuclear pode ser representado pelo seu *defeito de potência*. O defeito de potência para determinada concentração de boro pode ser determinado pela integração da curva do *coeficiente de potência* de 0% de potência até o patamar de potência que se deseje, tabela 2.2.4.1.

Tabela 2.2.4.1		Defeito de Potência em Função da Potência e da Concentração de Boro, PP-R11 Livro de Dados do Reator – Ciclo 9				
Concentração de Boro (ppm)	Potência (%)					
	0	25	50	75	100	
0	0	-783	-1428	-2048	-2698	
200	0	-755	-1370	-1953	-2561	
400	0	-685	-1243	-1773	-2323	
600	0	-606	-1110	-1593	-2019	
800	0	-583	-1062	-1516	-1981	
1000	0	-561	-1017	-1445	-1879	
1200	0	-541	-999	-1389	-1801	

2.2.5 Defeito Isotérmico da Temperatura

Em Angra 1 a *temperatura média do circuito primário* (T_m) deve variar linearmente com a potência do reator [31]. Esta temperatura deve ser de 291,7 °C para a condição *Quente Potência Zero* (QPZ) à 0% de potência nuclear e alcançar 305.94 °C para a condição *Quente a Plena Potência* (QPP) à 100% de potência nuclear, o que corresponde a 1876 MWt.

No sistema de instrumentação de Angra 1 o sinal da *temperatura média do circuito primário* (T_m) é calculada através média dos sinais oriundos dos termopares localizados nas pernas frias e quentes do circuito primário.

O valor teórico para a temperatura média, chamado de *temperatura média de referência* (T_{ref}), é calculado a partir do sinal da potência nuclear através da seguinte relação:

$$T_{ref} = 291,7 + 0,4127 * (\text{Sinal Pot. Nuclear em } \%) \quad (4)$$

O *coeficiente de potência*, como explicado anteriormente, é formado pela soma dos *coeficientes de temperatura do moderador*, *coeficientes Doppler* e *coeficiente de vazios* e é calculado levando-se em consideração que o *coeficientes de temperatura do moderador* para determinada potência do reator é obtido através do valor de T_{ref} .

Se a *temperatura média do circuito primário* (T_m) for diferente da *temperatura média de referência* (T_{ref}) haverá uma variação na reatividade relacionada com *coeficientes de temperatura do moderador* que não foi considerada no *defeito de potência*.

O *defeito isotérmico de temperatura* ρ_{iso} é o valor da reatividade inserida no núcleo, devido diferença entre a Temperatura Média do Primário (T_m) e a Temperatura Média de Referência (T_{ref}), sendo ρ_{iso} igual a:

$$\rho_{iso} = \alpha_{iso} * (T_{med} - T_{ref}) \quad (5)$$

onde

α_{iso} = *Coeficiente de Temperatura Isotérmico*, figura 2.2.5.1.

Na tabela 2.2.5.1 pode-se observar a variação do *Defeito Isotérmico de Temperatura* dado em pcm em função da concentração de boro e da temperatura média.

Concentração de Boro(ppm)	Temperatura Média do Moderador						
	270	280	290	291,7	300	306,9	310
0	996,4	534,4	79,6	0	-434	-864,8	-1081
200	863	472,1	71,4	0	-391,2	-781,3	-977,4
400	765,7	425,6	63,7	0	-351,1	-703,6	-881,5
600	634,8	352,9	52,9	0	-293,3	-590,7	-741,8
800	548,4	305,7	45,9	0	-257,1	-521,7	-657
1000	459,5	257,1	38,8	0	-220,7	-451,9	-571,3

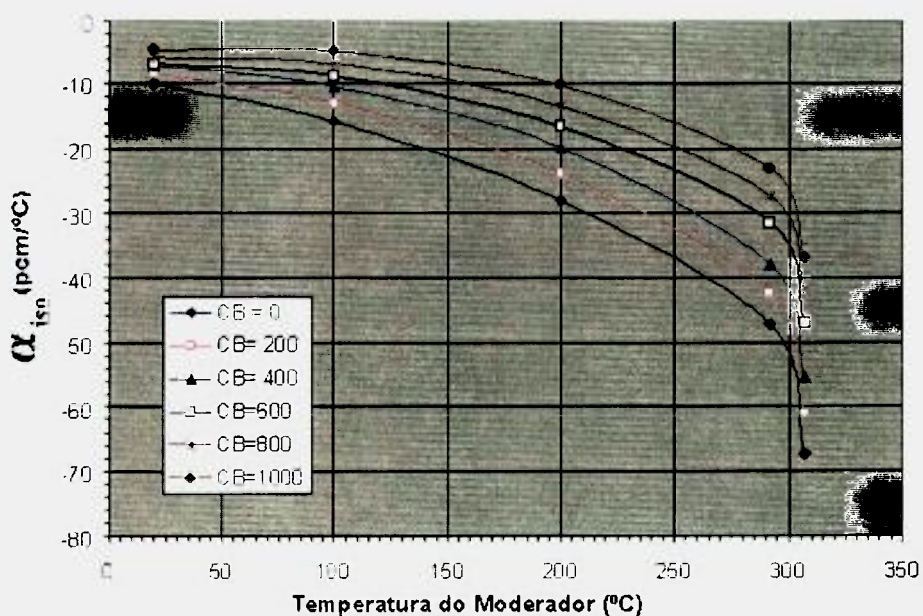


Figura 2.2.5.1 – Coeficiente de Temperatura Isotérmico em função da temperatura do moderador e da concentração de boro no primário.

2.3 Efeitos dos Venenos de Fissão na Reatividade

O Xenônio e o Samário são considerados *Venenos de Fissão* por que possuem altas seções de choque de absorção para nêutrons térmicos (σ_a) que afetam significativamente o valor de k , alterando o valor do K_{ef} da reação em cadeia. O envenenamento pelo Xenônio apresenta um comportamento fortemente dependente da potência do reator.

A determinação das reatividades do Xenônio e Samário em Angra 1 é feita por meio do histórico operacional de potência processado no programa XESM que resolve as seguintes equações:

- Difusão Multigrupo para nêutrons com dois grupos de energia
- Balanço da produção, decaimento e queima do veneno em questão.

A seguir será apresentada a metodologia de cálculo do programa XESM.

2.3.1 Resolução da Equação da Difusão Multigrupo

Na Equação da Difusão Multigrupo [32] mostrada abaixo o primeiro termo é o de fugas do reator, o segundo termo representa as interações ocorridas no grupo considerado; o terceiro termo dá a perda de nêutrons pelo espalhamento do grupo considerado para todos os demais grupos de energia; o último termo dá o número de nêutrons de fissão produzidos no grupo em questão como resultado das fissões ocorridas em todos os outros grupos.

$$-\vec{\nabla} D_g \vec{\nabla} \phi_g(\vec{r}) + \Sigma_{tg}(\vec{r}) \phi_g(\vec{r}) = \sum_{g'=1}^g \Sigma_s(g' \rightarrow g)(\vec{r}) \phi_{g'}(\vec{r}) + \frac{1}{K} \chi_g \sum_{g'=1}^N \nu_{g'} \Sigma_{fg'}(\vec{r}) \quad (6)$$

Foi inserido o Fator de Multiplicação ($1/K$) ao termo da fonte visto que o objetivo deste cálculo é a determinação da reatividade total do sistema.

Considerando-se para dois grupos de energia; um grupo rápido 1 e um grupo térmico 2, a equação (6) torna-se:

$$-\nabla D_1 \nabla_1 \phi_1(\vec{r}) + \Sigma_{R_1} \phi_1(\vec{r}) = \frac{1}{K} [\nu_1 \Sigma_{f_1} \phi_1(\vec{r}) + \nu_2 \Sigma_{f_2} \phi_2(\vec{r})] \quad (7)$$

$$-\nabla D_2 \nabla_2 \phi_2(\vec{r}) + \Sigma_{a_2} \phi_2(\vec{r}) = \Sigma_{S_{(1 \rightarrow 2)}} \phi_1(\vec{r}) \quad (8)$$

Admitindo-se a separabilidade da dependência espacial e energética, e sendo que a dependência espacial é representada equação de Helmotz tem-se que,

$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}) + B^2 \Psi(\vec{r}) = 0 \quad (9)$$

Admitindo-se também a aproximação da separabilidade da dependência espacial e energética dos fluxos de nêutrons rápidos e térmicos:

$$\phi_1(\vec{r}) = \phi_1 \Psi(\vec{r}) \quad (10)$$

$$\phi_2(\vec{r}) = \phi_2 \Psi(\vec{r}) \quad (11)$$

Logo a dependência energética das equações (7) e (8) a dois grupos de energia, é obtida substituindo a equação (9) nas equações (10) e (11) e estas nas equações (7) e (8) resultando no seguinte sistema de equações:

$$\left(D_1 B^2 + \Sigma_{R_1} - \frac{1}{K} \nu_1 \Sigma_{f_1} \right) \cdot \phi_1 - \frac{1}{K} \nu_2 \Sigma_{f_2} \phi_2 = 0 \quad (12)$$

$$-\Sigma_{S_{(1 \rightarrow 2)}} \phi_1 + (D_2 B^2 + \Sigma_{a_2}) \cdot \phi_2 = 0 \quad (13)$$

Aplicando-se a regra de Cramer ao sistema acima, este só terá solução somente se:

$$\left(D_1 B^2 + \Sigma_{R_1} - \frac{1}{K} \nu \Sigma_{f_1} \right) \left(D_2 B^2 + \Sigma_{a_2} \right) - \frac{1}{K} \nu \Sigma_{f_2} \Sigma_{s(1 \rightarrow 2)} = 0 \quad (14)$$

Então o valor do Fator de Multiplicação K do sistema será igual a:

$$K = \frac{\nu \Sigma_{f_1}}{\Sigma_{R_1} + D_1 B^2} + \frac{\Sigma_{s(1 \rightarrow 2)}}{\Sigma_{R_1} + D_1 B^2} \frac{\nu \Sigma_{f_2}}{\Sigma_{a_2} + D_2 B^2} \quad (15)$$

Na condição de referência, ou seja, sem o Xenônio e o Samário a reatividade do sistema será:

$$\rho_o = \frac{K_o - 1}{K_o} \quad (16)$$

Considerando a presença do Xenônio e Samário, os valores de $\Sigma_{R_1} + D_1 B^2$ e $\Sigma_{a_2} + D_2 B^2$ na equação (15) devem ser acrescidos dos valores da suas seções de choque macroscópicas de absorção, considerado-se os dois grupos de energia.

Para o caso do Xenônio o fator de multiplicação K_{Xe} será igual a:

$$K_{Xe} = \frac{\nu \Sigma_{f_1}}{\Sigma_{R_1} + D_1 B^2 + \Sigma_{R_1}^{Xe}} + \frac{\Sigma_{s(1 \rightarrow 2)}}{(\Sigma_{R_1} + D_2 B^2 + \Sigma_{R_1}^{Xe})} \frac{\nu \Sigma_{f_2}}{(\Sigma_{a_2} + D_2 B^2 + \Sigma_{a_2}^{Xe})} \quad (17)$$

Logo a reatividade devido ao Xenônio será igual a:

$$\rho_{Xe} = \frac{K_{Xe} - 1}{K_{Xe}} \quad (18)$$

A variação da reatividade total no sistema, considerando a presença do Xenônio, será:

$$\Delta\rho_{Xe} = \rho_{Xe} - \rho_o = \frac{K_{Xe} - 1}{K_{Xe}} - \frac{K_o - 1}{K_o} = \left(\frac{1}{K_o} - \frac{1}{K_{Xe}} \right) \quad (19)$$

O mesmo raciocínio deve ser empregado para o Samário, sendo a variação da reatividade no sistema igual a :

$$\Delta\rho_{Sm} = \rho_{Sm} - \rho_o = \left(\frac{1}{K_v} - \frac{1}{K_{Sm}} \right) \quad (20)$$

2.3.2 Cálculo das Densidades Atômicas dos Venenos de Fissão

Para o cálculo da densidade atômica dos venenos de fissão, ou seja, a concentração de átomos dos venenos de fissão em átomos/cm³, é preciso determinar o valor da seção de choque macroscópica de absorção do veneno Σ_a^V . O valor de Σ_a^V é igual a $N_V \sigma_a^V$ onde N_V é a densidade e σ_a^V é a seção de choque microscópica de absorção do veneno.

Então, para a determinação da variação da reatividade devida aos referidos venenos é necessário determinar o valor de densidade atômica N_V dos isótopos, em função do tempo t . Para determinar $N^V(t)$ é necessário resolver as equações, descrevendo as variações no processo de produção, decaimento e absorção que afetam a concentração do veneno.

2.3.2.1 Cálculo das Densidade Atômicas do Iodo e Xenônio

O Xenônio-135 é o mais importante veneno de fissão devido à sua alta seção de choque de absorção para nêutrons térmicos e sua relativamente alta fração efetiva de produtos de fissão (yield), mostrados na tabela 2.3.2.1:

Tabela 2.3.2.1 Fração efetiva dos Produtos de Fissão e Constantes de Decaimento.					
Fração efetiva dos Produtos de Fissão	U ²³³	U ²³⁵	Pu ²³⁹	Pu ²⁴¹	Constantes de Decaimento
$\gamma_I(\%)$	4,884	6,386	6,100	7,694	$\lambda_I=0,1035 \text{ h}^{-1}$
$\gamma_{Xe}(\%)$	1,363	0,228	1,087	0,255	$\lambda_{Xe}=0,0753 \text{ h}^{-1}$
$\gamma_{Pm}(\%)$	0,66	1,13	1,9		$\lambda_{Pm}=0,0128 \text{ h}^{-1}$

Para o desenvolvimento aqui proposto foi considerado a hipótese simplificada de que o Xe¹³⁵ é formado diretamente por fissão e pelo decaimento β do I¹³⁵, como mostrado na figura 2.3.2.1:

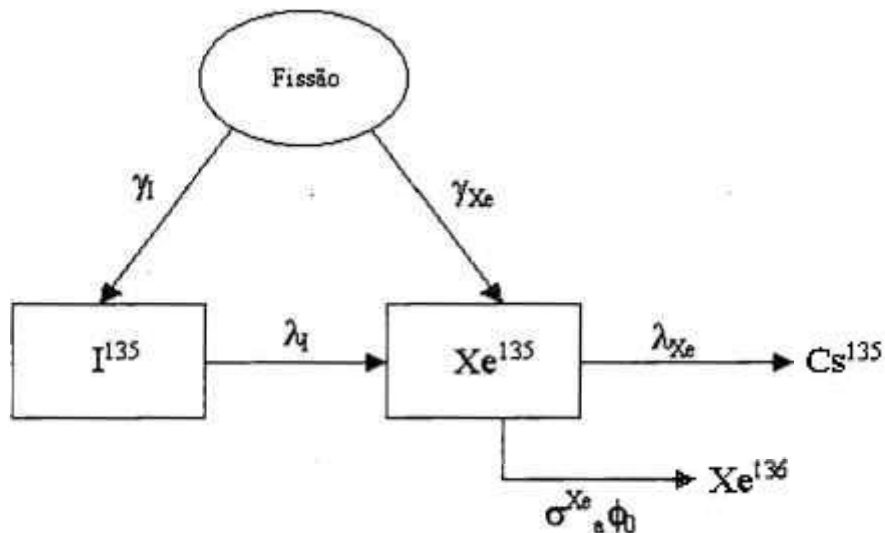


Figura 2.3.2.1 Esquema Simplificado de Decaimento para o Xenônio

As equações que governam a variação das concentrações de I¹³⁵ e Xe¹³⁵, em átomos/cm³, no núcleo do reator em uma posição r a um tempo t são:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = \gamma_I \Sigma_f \phi(r, t) - \lambda_I I(r, t) \quad (21)$$

$$\frac{\partial Xe}{\partial t} = \gamma_{Xe} \Sigma_f \phi(r,t) + \lambda_I I(r,t) - \lambda_I Xe(r,t) - \sigma_a^{Xe} Xe(r,t) \phi(r,t) \quad (22)$$

Onde $I(r,t)$ e $Xe(r,t)$ são as concentrações e γ_I e γ_{Xe} denotam a fração efetiva do I^{135} e do Xe^{135} . O termo $\sigma_a^{Xe} Xe(r,t) \phi(r,t)$ refere-se ao desaparecimento do Xe^{135} por captura de nêutrons, o termo $\gamma_I \Sigma_f \phi(r,t)$ refere-se à formação dos isótopos i por fissão e os outros termos a criação e o desaparecimento por decaimento β .

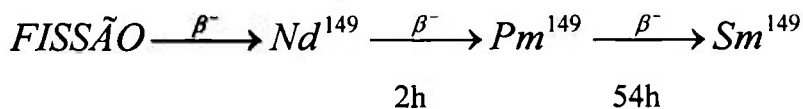
Para a resolução destas equações é necessário informações a respeito do fluxo $\phi(r,t)$ no reator o que será discutido a seguir. Considerando o caso de um reator estacionário com $\phi(r,t) = \phi_0$ a um tempo t , com uma concentração inicial de Iodo (I_0) e uma concentração de Xenônio (Xe_0) tem-se, pela resolução das equações (21) e (22):

$$I(r,t) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I} + \left(I_0 - \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_I} \right) \exp(-\lambda_I \cdot t) \quad (23)$$

$$Xe(r,t) = \frac{\gamma_I \Sigma_f \phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \phi_0} + \left(\frac{\gamma_I \phi_0}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \phi_0} + Xe_0 - \frac{I_0 \lambda_I}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \phi_0} - \frac{\gamma_{I-Xe} \Sigma_f \phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \phi_0} \right) \exp(-(\lambda_{Xe} + \sigma_a^{Xe} \phi_0) \cdot t) + \left(\frac{I_0 \lambda_I}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \phi_0} - \frac{\gamma_I \phi_0}{\lambda_{Xe} - \lambda_I + \sigma_a^{Xe} \phi_0} \right) \exp(-\lambda_I \cdot t) \quad (24)$$

2.3.2.2 Cálculo das Densidade Atômicas do Promécio e Samário

O envenenamento do núcleo por Samário, especificamente o Sm^{149} , é semelhante ao Xenônio. O Sm^{149} é caracterizado por produção alta na fissão e grande absorção ($\sigma_a = 58500$ barns). A formação do Sm^{149} segue o esquema de decaimento:



É consistente desconsiderar o Nd^{149} e assumindo que a fissão forma diretamente o Pm^{149} , as equações de balanço governando a concentração de Promécio e Samário podem ser escritas:

$$\frac{\partial Pm}{\partial t} = \gamma_{Pm} \Sigma_f \phi(r, t) - \lambda_{Pm} Pm(r, t) \quad (25)$$

$$\frac{\partial Sm}{\partial t} = \lambda_{Pm} Pm(r, t) - \sigma_a^{Sm} Sm \phi(r, t) \quad (26)$$

Considerando o caso de um reator estacionário com $\phi(r, t) = \phi_0$ a um tempo t , com uma concentração inicial de Promécio Pm_0 e de Samário Sm_0 , tem-se, a partir da resolução das equações (25) e (26):

$$Pm(r, t) = \frac{\gamma_{Pm} \Sigma_f \phi_0}{\lambda_{Pm}} + \left(Pm_0 - \frac{\gamma_{Pm} \Sigma_f \phi_0}{\lambda_{Pm}} \right) \exp(-\lambda_{Pm} \cdot t) \quad (27)$$

$$Sm(r, t) = \frac{\gamma_{Pm} \Sigma_f}{\sigma_a^{Sm}} + \left(\frac{\gamma_{Pm} \Sigma_f \phi_0}{\sigma_a^{Sm} - \lambda_{Pm}} - Sm_0 - \frac{Pm_0 \lambda_{Pm}}{\sigma_a^{Sm} \phi_0 - \lambda_{Pm}} - \frac{\gamma_{Pm} \Sigma_f}{\sigma_a^{Sm}} \right) \exp(-\sigma_a^{Sm} \cdot t) + \left(\frac{Pm_0 \lambda_{Pm}}{\sigma_a^{Sm} \phi_0 - \lambda_{Pm}} - \frac{\gamma_{Pm} \Sigma_f \phi_0}{\sigma_a^{Sm} - \lambda_{Pm}} \right) \exp(-\lambda_{Pm} \cdot t) \quad (28)$$

2.3.3 Determinação do Grupo de Constantes

Em um reator heterogêneo, para o cálculo do fator de multiplicação da equação (15) e das reatividades dos venenos de fissão nas equações (18) e (20), utiliza-se o modelo da *Célula Unitária* [33] para a determinação das constantes de grupo de todos os materiais que compõe o núcleo do reator. O modelo consiste basicamente em dividir o arranjo periódico da rede do reator em um número igual de *Células Unitárias* e então calcular o grupo de constantes efetivas para uma única célula. Define-se as células unitárias e calcula-se para todas as células do núcleo.

A análise da célula unitária leva em consideração a variação espacial do espectro de energia de nêutrons dentro da célula. A célula unitária é homogeneizada pela média das constantes dos materiais que compõe o núcleo do reator sobre a variação da distribuição espacial do fluxo, para formar o “*Grupo de Constantes de Autoblindagem*” que serão utilizados nas equações de Difusão de Multigrupo.

A figura 2.3.3.1 mostra a Célula Unitária utilizada para a homogeneização de uma seção reta de uma vareta de um elemento combustível, formada de uma pastilha de UO_2 contida em vareta de Zircaloy e circundada pelo moderador de H_2O .

A determinação do *Grupo de Constantes de Autoblindagem* de todos os materiais do núcleo do reator de Angra 1 é realizada pelo código LEOPARD. Para um ciclo normal de operação são considerados os grupos de constantes da média aritmética de três tipos de célula unitárias com as seguintes concentrações isotópicas de U^{235} .

- Célula unitária de elemento combustível com 2,1% de U^{235}
- Célula unitária de elemento combustível com 2,6% de U^{235}
- Célula unitária de elemento combustível com 3,2% de U^{235}

O grupo de constantes σ calculadas pelo código LEOPARD para os grupo 1 (rápido) e grupo 2 (térmico) estão listadas na tabela 2.3.3.1:

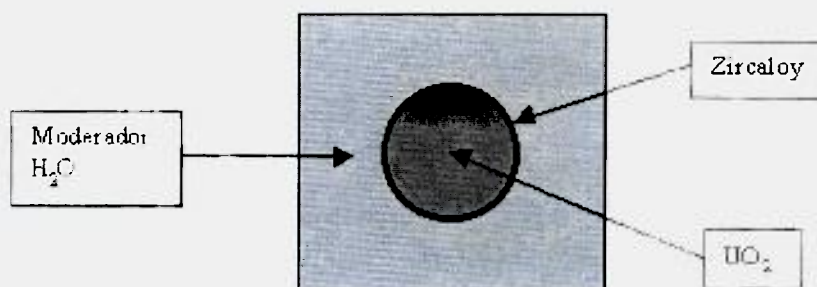


Figura 2.3.3.1 - Célula Unitária de um Sistema Heterogêneo.

Tabela 2.3.3.1		Grupo de Constantes de autoblindagem calculados pelo código LEOPARD
Grupo 1 Rápido	Grupo 2 Térmico	Grupo de Constantes de Autoblindagem
D_1	D_2	Coefficiente de Difusão
Σ_{R1}	Σ_{a2}	Seção de Choque Macroscópica de Absorção
$\nu\Sigma f_1$	$\nu\Sigma f_2$	Seção de Choque Macroscópica de Fissão
σ_{f1}^i	σ_{f2}^i	Seção de Choque Microscópica de Fissão U+Pu
N^{PV}_i		Densidade Atômica do Combustível (Ponderado no Volume)
	N^{PF}_i	Densidade Atômica do Combustível (Ponderado no fluxo)
N^{PV}_{Xe}		Densidade Atômica do Xenônio (Ponderado no Volume)
	N^{PF}_{Xe}	Densidade Atômica do Xenônio (Ponderado no fluxo)
N^{PV}_{Sm}		Densidade Atômica do Samário (Ponderado no Volume)
	N^{PF}_{Sm}	Densidade Atômica do Samário (Ponderado no fluxo)
σ_a^{Xe}	σ_a^{Xe}	Seção de Choque Microscópica de Absorção de Xenônio
σ_a^{Sm}	σ_a^{Sm}	Seção de Choque Microscópica de Absorção de Samário
Σ_r		Seção de Choque Macroscópica de Espalhamento
ϕ_1/ϕ_2		Razão de Fluxo Rápido/Fluxo Térmico

Na homogeneização das densidades atômicas do combustível, *Ponderada no Volume*, para o grupo de nêutrons rápidos, leva-se em consideração o volume da célula V_{cel} e o volume do combustível V_{UO_2} . Então a constante de grupo para nêutrons rápidos da densidade atômica de isótopo i que compõe o combustível pode ser representada por:

$$N_i^{PV} = \frac{N_i^{UO_2} V_{UO_2}}{V_{cel}} \quad (29)$$

Onde i representa o isótopo presente no combustível de acordo com a tabela 3.3.3.2.

Índice i	Isótopo
1	U^{235}
2	U^{236}
3	U^{238}
4	Pu^{239}
5	Pu^{240}
6	Pu^{241}
7	Pu^{242}

Na homogeneização das densidade atômicas do combustível, *Ponderada no Fluxo*, para o grupo de nêutrons térmicos, deve ser levado em consideração que dentro do vareta de combustível há uma forte depressão no fluxo térmico causada pela absorção de nêutrons. Isto leva a uma diminuição do fator de utilização térmica f da fórmula dos quatro fatores. Para nêutrons térmicos a densidade atômica de cada isótopo i do combustível pode ser representada por:

$$N_i^{PF} = \frac{N_i^{UO_2} V_{UO_2} \bar{\phi}_{UO_2}}{V_{cel} \bar{\phi}_{cel}} \quad (30)$$

Onde:

$\bar{\phi}_{UO_2}$ = Fluxo Médio de Nêutrons Térmicos no Combustível

$\bar{\phi}_{cel}$ = Fluxo Médio de Nêutrons Térmicos na Célula

O valor da razão de $\frac{\bar{\phi}_{UO_2}}{\bar{\phi}_{cel}}$ é chamado *Fator de Desvantagem Térmica*.

2.3.4 Cálculo do Fluxo Neutrônico Total

O valor do fluxo total ϕ em nêutrons/cm².seg é utilizado no cálculo das densidades atômicas dos produtos de fissão nas equações (23), (24), (27) e (28) e para a determinação de seu valor as seguintes metodologias são empregadas:

Em um reator de volume V em cm³, irão ocorrer $\Sigma_{\text{comb}}^{\text{fis}}\phi_0$ fissões por cm³ onde:

- $\Sigma_{\text{comb}}^{\text{fis}}$ é a seção de choque macroscópica total de fissão do combustível,
- ϕ_0 é o fluxo neutrônico, neutrons.cm⁻².seg⁻¹.

A Densidade de potência do Reator em Watts/cm³ é igual a:

$$q''' = \Sigma_f^{\text{comb}} \phi_0 \kappa \quad (31)$$

Onde κ é a quantidade de watts, gerado em cada fissão (watts/fissão).

Tem-se que a potência em MWt gerada nesse reator é igual a:

$$P(MW_t) = \frac{V \Sigma_f^{\text{comb}} \phi_0 \kappa}{10^6} \quad (32)$$

O Reator Nuclear de Angra 1, quando é operando à Potência Máxima Nominal, P_N em %, possui uma potência térmica máxima de 1876 MWt. Então o fluxo total ϕ_0 em nêutrons/cm².seg para um determinado nível de potência, neste reator é igual a :

$$\phi_0 = \frac{P_N \cdot 1876 \cdot 10^4}{V \Sigma_f^{\text{comb}} \kappa} \quad (33)$$

Para a determinação do valor de $\Sigma_f^{comb} \cdot \kappa$, deve ser levada em consideração a homogeneização das densidade atômicas do combustível *Ponderadas no Volume* e *Ponderadas no Fluxo*. Ainda pelo fato de que cada isótopo i do combustível libera κ_i watts por fissão, então o valor de $\Sigma_f^{comb} \cdot \kappa$ total é igual a:

$$\Sigma_f^{comb} \cdot \kappa = \left(\sum_{i=1}^7 N_i^{PV} \cdot \sigma_{f1}^i \cdot \kappa_i \right) \cdot \frac{\phi_1}{\phi_2} + \left(\sum_{i=1}^7 N_i^{PF} \cdot \sigma_{f2}^i \cdot \kappa_i \right) \quad (34)$$

2.3.5 Cálculo da Densidade dos Produtos de Fissão e Resolução Das Equações da Reatividade

Para o cálculo das densidades atômicas do Iodo, Xenônio, Promécio e Samário, pelas equações (23), (24), (27) e (28) respectivamente, devem ser levados em consideração:

- a homogeneização das densidades atômicas do combustível, *Ponderadas no Volume* e *Ponderadas no Fluxo*
- também o fato de que as frações efetivas de produtos de fissão do Iodo (γ_I), do Iodo + Xenônio (γ_{Xe+I}) e do Samário (γ_{Sm}) são diferentes para cada isótopo i presente no combustível

O valor de $\gamma_I \Sigma_f^{comb}$ é calculado como:

$$\gamma_I \Sigma_f^{comb} = \left(\sum_{i=1}^7 \gamma_i^I \cdot N_i^{PV} \cdot \sigma_{f1}^i \right) \cdot \frac{\phi_1}{\phi_2} + \left(\sum_{i=1}^7 \gamma_i^I \cdot N_i^{PF} \cdot \sigma_{f2}^i \right) \quad (35)$$

A mesma metodologia é empregada para calcular o valor de $\gamma_{I-Xe} \Sigma_f^{comb}$ e $\gamma_{Sm} \Sigma_f^{comb}$.

Então os valores de $\gamma_I \Sigma_f^{comb}$, $\gamma_{I_Xe} \Sigma_f^{comb}$ e $\gamma_{Sm} \Sigma_f^{comb}$ nas equações de decaimento do Iodo, Xenônio, Promécio e Samário podem ser considerados constantes por se tratar de uma multiplicação de constantes.

Com o valor das constantes $\gamma_I \Sigma_f^{comb}$, $\gamma_{I_Xe} \Sigma_f^{comb}$, $\gamma_{Sm} \Sigma_f^{comb}$ e o valor do ϕ_0 calcula-se as densidades atômicas do Xenônio (N^{Xe}) e do Samário (N^{Sm}) através das equações (24) e (28) respectivamente.

O valor da densidade atômica do Xenônio é multiplicado pelas suas seções de choque microscópicas de absorção rápidas e térmicas, obtendo-se os valores de $\Sigma_{R1}^{Xe} = N^{Xe} \sigma_1^{Xe}$ e $\Sigma_a^{Xe} = N^{Xe} \sigma_2^{Xe}$.

Aplicando-se estes valores na equação (14) determina-se a reatividade do Xenônio. O mesmo raciocínio é empregado com os valores de $\Sigma_{R1}^{Sm} = N^{Sm} \sigma_1^{Sm}$ e $\Sigma_a^{Sm} = N^{Sm} \sigma_2^{Sm}$ para a determinação da reatividade do Samário.

2.4 Balanços de Reatividade

Quando um reator nuclear de potência é desligado uma grande quantidade negativa de reatividade é introduzida pelos *bancos de controle* e pelos *bancos de desligamento*, fazendo com que o K_{ef} da reação em cadeia fique menor que 1 interrompendo a reação em cadeia.

Para garantir que o reator permaneça no estado sub-crítico 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, equação 1, com os valores das reatividade dos fatores que influenciam a reatividade total do reator para a condição em que se quer deixar (estado sub- crítico) ou levar o reator (nova criticalização).

Na condição em que o reator está crítico com a potência estável a equação (1) pode ser escrita como:

$$-\rho_{ex} = (\rho_{Ac. Borico} + \rho_{B. Controle} + \rho_{potência} + \rho_{iso} + \rho_{Xenônio} + \rho_{Samário}) \quad (36)$$

Após um desligamento deve-se procurar no histórico operacional da usina os parâmetros do reator no estado crítico para as condições mais estáveis próximas ao seu desligamento ou de sua última criticalização.

Para este instante a data e a hora, os valores da concentração de boro, da posição dos bancos de controle, da potência nuclear, da temperatura média do circuito primário 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. Esta é a base do procedimento PP-R 14 – Parâmetros Referenciais de Reatividade, equação (37).

$$\rho_{total \text{ anterior ao desligamento}} = (\rho_{Ac. Borico} + \rho_{B. de Controle} + \rho_{potência} + \rho_{iso} + \rho_{Xenônio} + \rho_{Samário}) \quad (37)$$

No desligamento a reatividade total do reator será igual a:

$$\rho_{total \text{ no desligamento}} = (\rho_{Ac. Borico} + \rho_{B. de Controle} + \rho_{B. de Desligamento} + \rho_{iso} + \rho_{Xenônio} + \rho_{Samário}) \quad (38)$$

No desligamento não ocorre mais a formação do Xenônio direto das fissões nem seu desaparecimento através da queima. Isto pode ser observado na equação (22) fazendo com que o valor do fluxo neutrônico seja igualado a zero. O Xenônio então é formado apenas pelo decaimento do Iodo e desaparece pelo seu decaimento para Césio.

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 1 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 22 horas após o desligamento a variação de reatividade Xenônio passa a ser positiva ao reator. A reatividade devida ao Xenônio atinge um valor próximo de zero em torno de 100 horas após desligamento, reator *livre de Xenônio*, figura 2.4.1

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, figura 2.4.2

Quando o reator estiver em um patamar de potência e ocorrer um desligamento o *defeito de potência* introduzirá uma quantidade positiva de reatividade ao reator.

Quando o reator está na condição *desligado quente* (DQ) ou em *quente potência zero* (QPZ) a temperatura média do moderador deve ser igual a 291,7 °C, neste caso o *defeito isotérmico de temperatura* introduz reatividade nula. Se a temperatura do moderado for maior que 291,7 °C a reatividade introduzida será negativa caso contrário positiva.

É requerido pelas especificações técnicas que o reator tenha sempre margem de desligamento superior a 2000 pcm de reatividade negativa, se a temperatura do primário estiver acima de 93°C, e superior a 1000 pcm de reatividade negativa, se a temperatura do primário for menor que 93°C. Isto garante que o reator não sofrerá uma criticalização inesperada.

De modo a garantir a *margem de desligamento* requerida pelas especificações técnicas, deve ser realizado o balanço entre a reatividade total anterior ao desligamento e a reatividade total do desligamento, considerando as variações de reatividade que ocorrem durante o desligamento, equações (39) e (40).

$$\rho_{\text{total do desligamento}} - \rho_{\text{total anterior ao desligamento}} < -2000 \text{ pcm} \quad (\text{Se } T_{\text{med}} \geq 93^{\circ}\text{C}) \quad (39)$$

$$\rho_{\text{total do desligamento}} - \rho_{\text{total anterior ao desligamento}} < -1000 \text{ pcm} \quad (\text{Se } T_{\text{med}} < 93^{\circ}\text{C}) \quad (40)$$

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 PP-R03 – Cálculo da Margem de Desligamento.

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 (41) seja satisfeita. O acionamento destes controles devem compensar efeitos $\rho_{\text{Xenônio}}$, $\rho_{\text{Samário}}$, $\rho_{\text{potência}}$ e ρ_{iso} que sofrem variação enquanto o reator esteve na condição de desligado:

$$\rho_{\text{total anterior ao desligamento}} - \rho_{\text{total nova criticalização}} = 0 \quad (41)$$

A reatividade total da nova criticalização é igual a:

$$\rho_{\text{total nova criticalização}} = (\rho_{\text{Boro}} + \rho_{\text{B. Controle}} + \rho_{\text{iso}} + \rho_{\text{Xenônio}} + \rho_{\text{Samário}}) \quad (42)$$

O balanço de reatividade para a nova criticalidade deve determinar a:

- A posição dos bancos de controle quando é conhecido a concentração de boro no circuito primário.
- A concentração de boro no circuito primário quando é conhecida a posição dos bancos de controle.

Com o valor de $\rho_{\text{B. de Controle}}$ ou do ρ_{Boro} calculado pelo balanço de reatividade determina-se a posição dos bancos de controle ou a concentração de boro para a criticalização. O cálculo da posição de bancos de controle é chamado de PCE (Posição Crítica estimada) e deve ser realizado em toda a operação de criticalização feita em

Angra 1. Esta é a base do procedimento PP-R04 - Determinação de Posição de Bancos de Controle ou Concentração de Boro para a Criticalidade.

Pelos procedimentos de operação de Angra 1, a posição dos bancos de controle no momento da criticalização deve estar dentro dos limites superior e inferior de + ou - 500 pcm da posição dos bancos de controle preditos pelos cálculos da PCE.

Os balanços de reatividade são utilizados na operação de criticalização para avaliar os desvios existentes entre os valores das reatividades previstas, quando o projeto do núcleo foi calculado, e os valores reais das reatividades do núcleo. Uma grande diferença, maior que $1\% \Delta K/K$ (1000 pcm), poderia ser o resultado de uma mudança não prevista no combustível, no valor das barras de controle ou nas condições de operação não consistentes com aquelas previstas para a reatividade do núcleo, que poderiam potencialmente resultar em uma perda da *margem de desligamento* ou poderiam ser ultrapassados os limites de projeto do combustível [34].

Se, através do gráfico de multiplicação sub-crítica ($1/M$) feito durante a criticalização [35], for constatado que a criticalidade ocorrerá fora da faixa calculada para as barras de controle pela PCE a operação de criticalidade deve ser interrompida, as barras de controle devem ser novamente inseridas e o cálculo da PCE deve ser refeito.

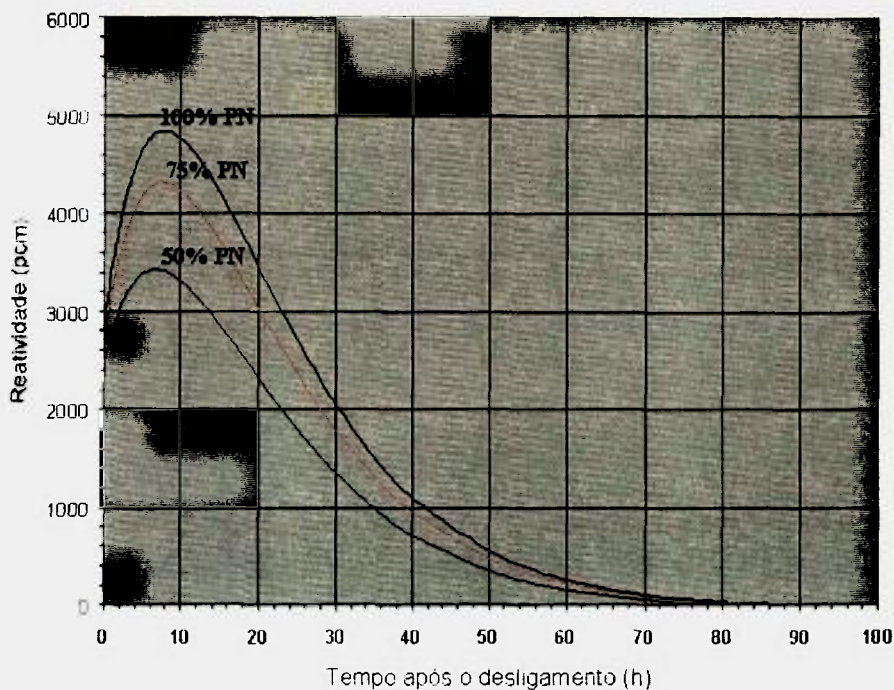


Figura 2.4.1 Reatividade do Xenônio Após o Desligamento do Reator para o Reator que Operou em 100%, 75% e 50% de Potência Nominal (PN), PP-R11 – Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

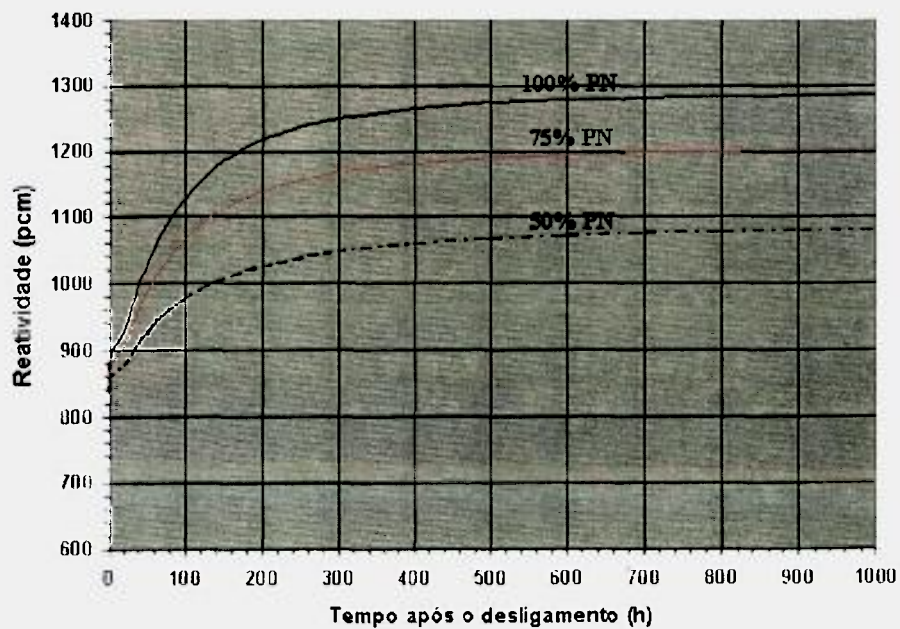


Figura 2.4.2 Reatividade do Samário Após o Desligamento do Reator para o Reator que Operou em 100%, 75% e 50% de Potência Nominal (PN), PP-R11 – Livro de Dados do Reator, Ciclo 9

2.5 Cálculo da Queima Total do Combustível

A unidade de queima de combustível nuclear utilizada em Angra 1 é o megawatt-dia por tonelada métrica de urânio (MWD/TMU). Um MWD/TMU equivale a operar com 1000 Kg de urânio, numa potência de 1 megawatt durante um dia. Quando se refere ao núcleo inteiro, a queima torna-se um meio de medir o número de Dias Efetivos a Plena Potência (DEPP).

Para o cálculo da queima do combustível em Angra 1, é considerado que o reator possui uma massa total de Urânio de X (TMU), funcionando por um tempo t em minutos, a um nível de potência nuclear P_N em %. O valor da queima do combustível neste intervalo de tempo é igual a:

$$Queima(MWD/TMU) = \frac{P_{i,max}(MW_i) \cdot P_N \cdot 10^{-2} \cdot t}{X \cdot 1440} \quad (43)$$

O valor de $P_{i,max}(MW_i)$ para Angra 1 é 1876 MW_t.

O número de dias efetivos a plena potência ($P_N=100\%$) para o reator operando por um período de tempo t pode ser calculado por:

$$N_{DEPP} = \frac{Queima(MWD/TMU) \cdot X}{P_{i,max}(MW_i)} \quad (44)$$

2.6 Anomalia de Reatividade

A confirmação periódica da reatividade do núcleo é necessária para assegurar que as análises referentes aos Acidentes Básicos de Projeto (DBA) e aos transientes de segurança permanecem válidos [36]. As especificações técnicas de Angra 1 exigem que se faça uma comparação mensal entre a concentração de boro crítica real na condição Quente

a Plena Potência (QPP) e a concentração de boro prevista pelo projeto do núcleo, Concentração Crítica de Boro Versos Queima, Figura 2.5.1. A diferença entre essas concentrações, expressa em reatividade, é chamada “Anomalia de Reatividade”. O procedimento PI-R07 - Anomalia de Reatividade é utilizado para este fim.

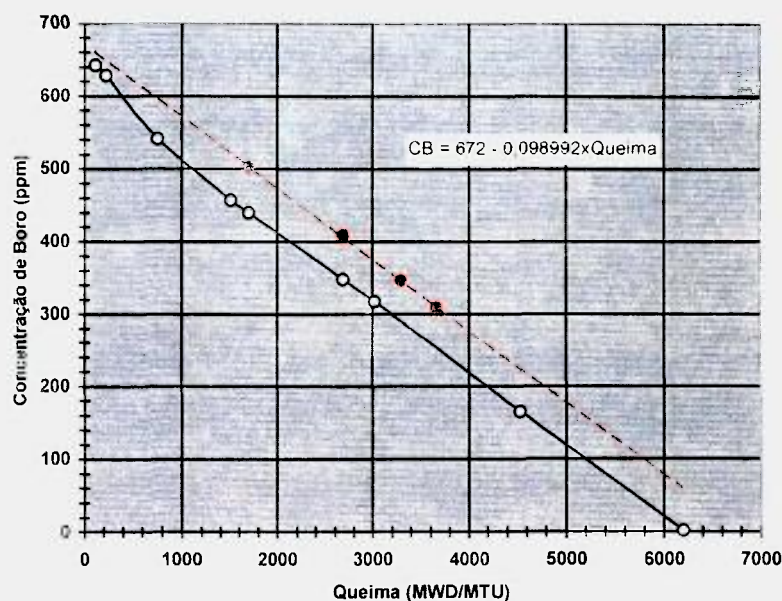


Figura 2.5.1 Concentração Crítica de Boro Versos Queima em QPP, comparação entre valores de projeto e dados de operação, PP-R11 – Livro de Dados do Reator, Ciclo 9

O cálculo da *Anomalia de Reatividade* deve ser feita preferencialmente com as reatividades de Xenônio de Samário em equilíbrio, ou deverão ser realizadas correções. Esta anomalia deve ser sempre inferior a 1000 pcm, caso este valor seja ultrapassado um relatório sobre a ocorrência deverá ser emitido. Será apresentado no item 5 deste trabalho, Desenvolvimento e Teste do Sistema, de detalhadamente e com exemplos, a metodologia de cálculo dos procedimentos acima mencionados e como estes foram automatizados pelo sistema desenvolvido.

3 OSCILAÇÕES DO XENÔNIO

O fato da distribuição espacial de densidade de potência no núcleo do reator, durante operação normal, estar exposta a influências locais, seja através de movimentação de barras de controle ou por pequenas variações de temperatura média e local do refrigerante, traz consigo também efeitos retroativos retardados da variação local da densidade de potência causada pela distribuição espacial do Xenônio.

Esses efeitos podem, sobretudo em núcleos de reatores de grande porte do tipo PWR, desenvolver uma dinâmica própria, que conduz a redistribuição cíclica auto-sustentada da densidade de potência em torno de um eixo fixo.

As oscilações axiais de Xenônio têm operacionalmente uma importância essencial, pela qual se desenvolvem, máximos de densidade de potência alternadamente nas metades superior (topo) e inferior (base) do núcleo. Isto acontece de tal forma que, à medida que a densidade local de potência aumenta em uma metade do núcleo, é diminuída de maneira correspondente na outra metade, repetindo-se o fenômeno automaticamente de maneira inversa, após um tempo determinado.

Além disso, podem também ser observadas oscilações azimutais de Xenônio, onde a distribuição de densidade de potência oscila de maneira semelhante em torno do eixo radial principal ou das diagonais principais da seção reta do núcleo. Oscilações azimutais de Xenônio ocorrem, porém, somente após um estímulo externo, por exemplo, devido a queda individual de uma barra de controle, e mostram a tendência a auto-estabilização, e não será abordado neste trabalho.

3.1 Oscilações Axiais do Xenônio

A influência do envenenamento local do Xenônio sobre as redistribuições espaciais da densidade de potência, pode ser observada no exemplo da evolução temporal da distribuição axial da densidade de potência, que é proporcional ao fluxo neutrônico, ao longo da altura ativa do núcleo, na figura 3.1.1.

Pequenas variações operacionais da distribuição da densidade de potência, como por exemplo, pela inserção de alguns passos do Banco de Controle D, para controle da temperatura média do refrigerante, atuam de tal forma que a densidade de potência aumenta levemente em uma das metades, enquanto baixa de maneira correspondente na outra metade.

Considerando que a densidade de potência aumente na metade inferior do núcleo será então também estimulada uma pequena queima local do Xenônio, enquanto simultaneamente na metade superior do núcleo, em função da diminuição densidade local de potência, a produção retardada de Xenônio, oriunda do Iodo, causará um leve crescimento do envenenamento local de Xenônio. Ambos os efeitos mostram inicialmente a tendência de reforçar a pequena redistribuição causada, até que as condições locais modificadas de densidade de potência se façam também notar na produção local de Xenônio a partir do Iodo.

Na metade inferior do núcleo, o aumento da densidade de potência conduz a um aumento da concentração de Iodo e, com isto, de acordo com sua meia-vida a um aumento retardado na produção de Xenônio. Na metade superior do núcleo, o desenrolar é exatamente oposto: a redução da densidade de potência local está ligada a uma diminuição da concentração de Iodo, que se traduz numa diminuição retardada na produção de Xenônio.

Após uma melhora inicial da redistribuição axial, através da modificação contrária do envenenamento do Xenônio, a tendência se inverte, o envenenamento local de Xenônio aumenta na metade inferior do núcleo e diminui na metade superior.

Este mecanismo básico da oscilação do Xenônio, que se traduz em uma redistribuição correspondente da distribuição espacial de densidade de potência, pode ser melhorado ou atenuado através de diferentes condições de contorno. Aqui são importantes a geometria do núcleo do reator, a forma da distribuição da densidade de potência e também o coeficiente de temperatura local.

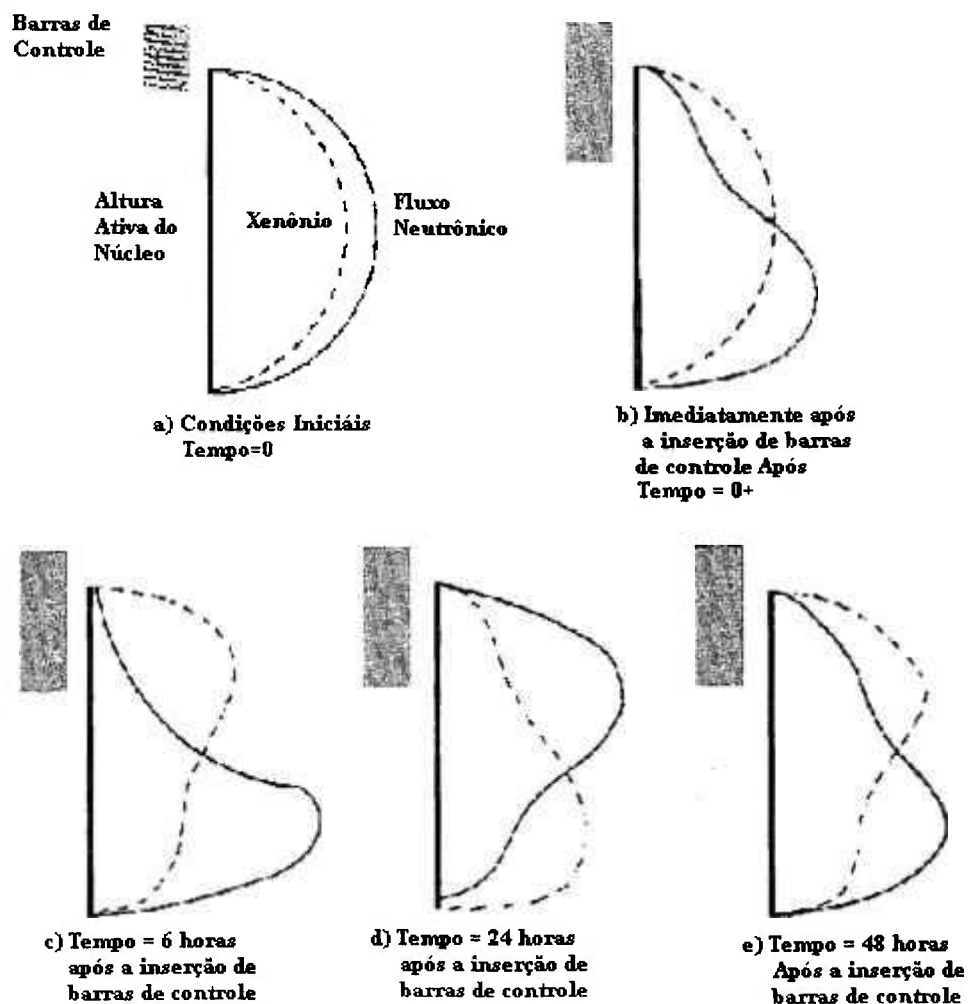


Figura 3.1.1 - Exemplo de uma oscilação de Xenônio após uma Variação Axial da Densidade de Potência.

3.2 Detetores da Faixa de Potência

Em Angra 1 os circuitos da faixa de potência consistem de quatro canais operando independentemente, designados canais da faixa de potência: N41, N42, N43 e N44. Estes canais são utilizados, entre outras funções, para a determinação instantânea da potência do reator e para monitoração da distribuição axial da densidade de potência no caso de uma oscilação de Xenônio, figura 3.2.1.

Cada canal emprega um detetor do tipo câmara de ionização não compensada de dupla seção, dois sinais de nível de corrente são fornecidos por cada canal, que são designados sinal de saída do detetor A e sinal de saída do detetor B. Os circuitos da faixa de potência, portanto monitoram efetivamente um total de oito sinais de fluxo de nêutrons.

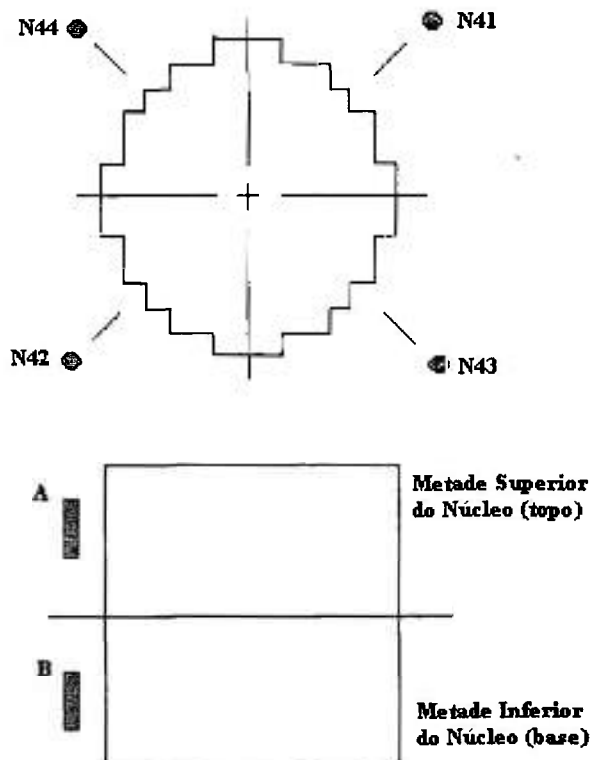


Figura 3.2.1 - Esquema dos Detetores da Faixa de Potência Utilizados em Angra 1

Dentro de cada canal da faixa de potência, os sinais das duas seções são somados e condicionados, para desenvolver um sinal de saída que é diretamente proporcional a potência do reator. Este sinal de saída é calibrado em termos de percentagem de potência do reator, variando de 0 a 120% e é usado para fim de proteção, permissíveis, funções de controle, bem como fornecer sinais para os circuitos de taxa, registro remoto, indicação remota e para o computador.

A calibração dos sinais de saída das câmaras de ionização em porcentagem da potência nominal (P_N) é realizada através do balanço calorimétrico do circuito secundário [37].

3.3 Diferença Axial de Fluxo e “Axial Offset”.

A diferença axial de fluxo (ΔI) para cada canal da faixa de potência é definida como a diferença entre a potência na parte superior do núcleo (topo) e a parte inferior do núcleo (base) [38], ou seja:

$$\Delta I = P_t - P_b = [(T_s - T_1)/T_{100\%(s+1)}] \quad (45)$$

Onde:

T_s = Tensão, em volts, de um canal superior de potência (topo)

T_1 = Tensão, em volts, de um canal inferior de potência (base)

$T_{100\%(s+1)}$ = tensão no topo + tensão na base a 100% de potência.

O “Axial Offset” (AO) para cada canal da faixa de potência é definida como:

$$AO = (P_t - P_b)/(P_t + P_b) = [(T_s - T_1)/(T_s + T_1)] \quad (46)$$

Isolando $(T_s - T_l)$ na equação (46) e substituindo na equação (54), obtem-se:

$$\Delta I = p \cdot AO \quad (47)$$

Onde p = fração de potência ($p = 0$ para 0%; $p = 0,5$ para 50%; $p = 1$ para 100%)

O reator de Angra 1 é operado pelo princípio CAOC (“Constant Axial Offset Control”): “O perfil axial de potência no reator deve ser sempre igual ao perfil que ocorreria se o reator estivesse a 100% de potência nuclear, Xenônio em equilíbrio e todas as barras retiradas, qualquer que seja a potência real”, dentro de uma tolerância estabelecida nas especificações técnicas. Esta tolerância é atualmente de $\pm 5\%$, figura 3.3.1. Estas condições produzem a distribuição mais estável da densidade de potência axial e o valor de ΔI é dito estar no *valor alvo*.

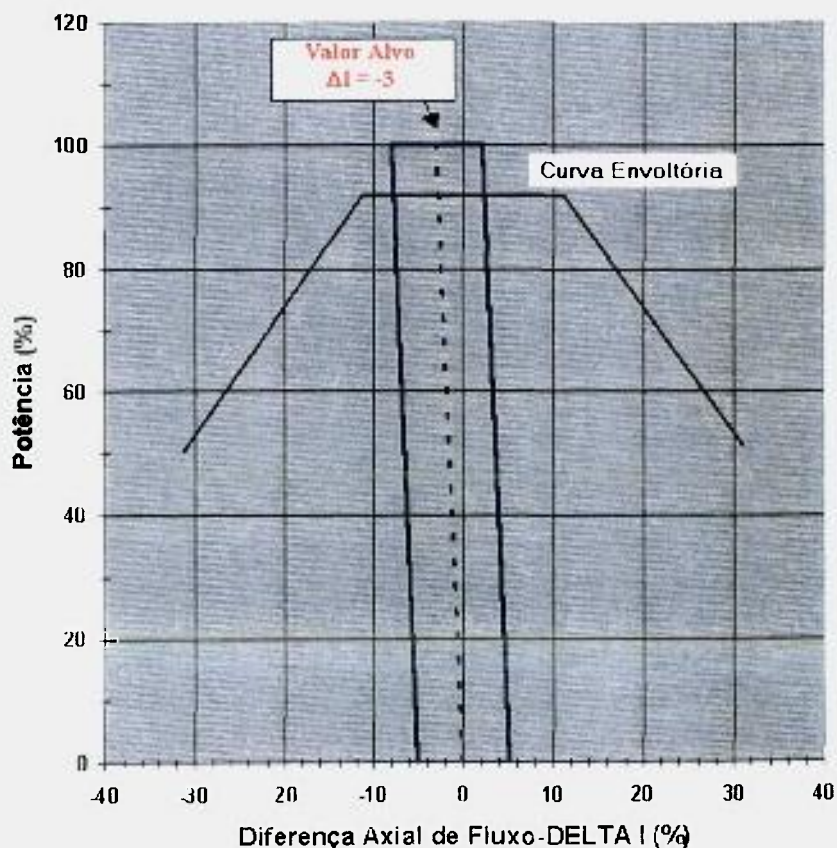


Figura 3.3.1 - Controle do Reator por Assimetria Axial Constante.
PP-R11

É previsto pelo CAOC (“Constant Axial Offset Control”) que o reator opere com o valor de ΔI - dentro do limite estabelecido de $\pm 5\%$ do *valor alvo*. Algumas penalidade são previstas nas especificações técnicas, caso o reator opere com o valor ΔI fora dos limites estabelecidos, em um determinado patamar de potência. As principais penalidades são:

- (1) Acima de 90% de potência nuclear, o reator deve ser levado imediatamente para um patamar de potência abaixo de 90%.
- (2) Entre 50% e 90%, o valor de ΔI deve ser levado para o alvo em até uma hora; se isto não ocorrer, a potência deve ser reduzida para 50%. Se o valor de ΔI ultrapassar a curva envoltória o reator deve ser levado imediatamente para um valor abaixo de 50%.
- (3) Menor que 50%, pode permanecer fora da faixa limite, mas o reator deve permanecer pelo menos 24 horas dentro da faixa limite antes que a potência do reator seja novamente aumentada.

Na figura 3.3.2 é possível observar a variação de ΔI de cada canal da faixa de potência durante uma oscilação de Xenônio de pequena amplitude, dentro da faixa permitida, ocorrida no ciclo 9 e o início da movimentação no banco de controle D realizada para controlar esta oscilação.

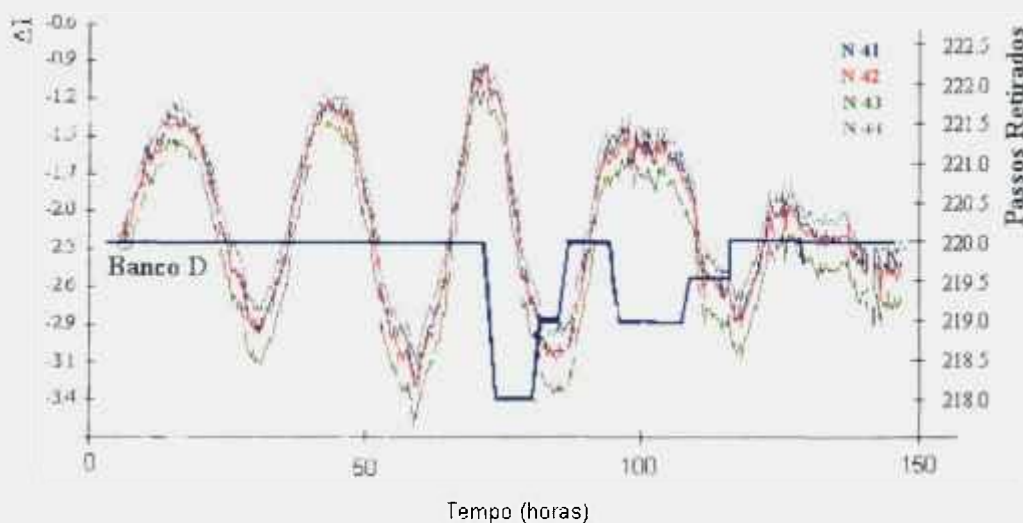


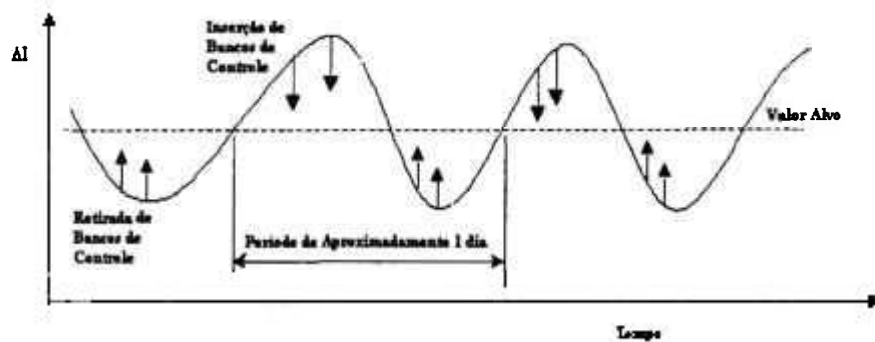
Figura 3.3.2 - Variação de ΔI para cada detetor de faixa de potência e banco de controle D, durante uma oscilação de Xenônio, de 03/11/2000 à 09/11/2000, Módulo Gráfico do Programa SICA

3.4.4 Técnicas Utilizadas para o Controle de Oscilações Axiais de Xenônio

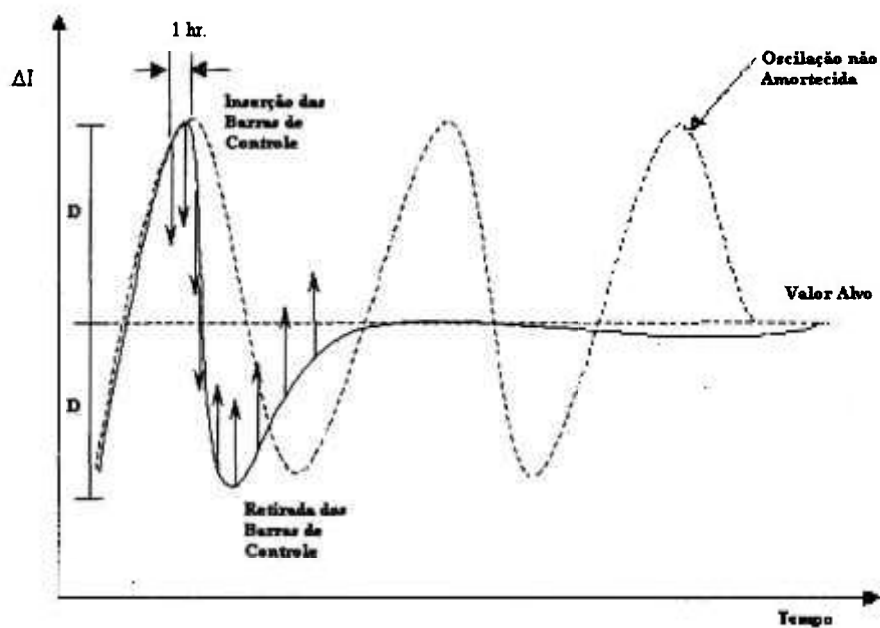
São três as estratégias de controle utilizadas para o amortecimento das oscilações de ΔI (oscilações de Xenônio):

- Amortecimento à Meio Ciclo “Half-Cycle Dampening” devido a sua simplicidade esta é a estratégia de controle mais utilizada pelos operadores durante o funcionamento normal do reator. Se o valor de ΔI esta posicionado acima do valor alvo, as barras de controle são inseridas de modo a fazer com que ΔI seja direcionado para o alvo, se o contrário ocorrer, as barras de controle são retiradas com o mesmo fim. Um ou dois passos dos bancos de controle são movimentados por semana de modo a fazer com que o valor de ΔI seja continuamente direcionado para o valor alvo. Esta estratégia de controle de oscilação de Xenônio é simples de ser empregada, entretanto esta técnica é mais efetiva quando a oscilação de ΔI é relativamente pequena com um longo período de operação normal, figura 3.4.4.1 a.

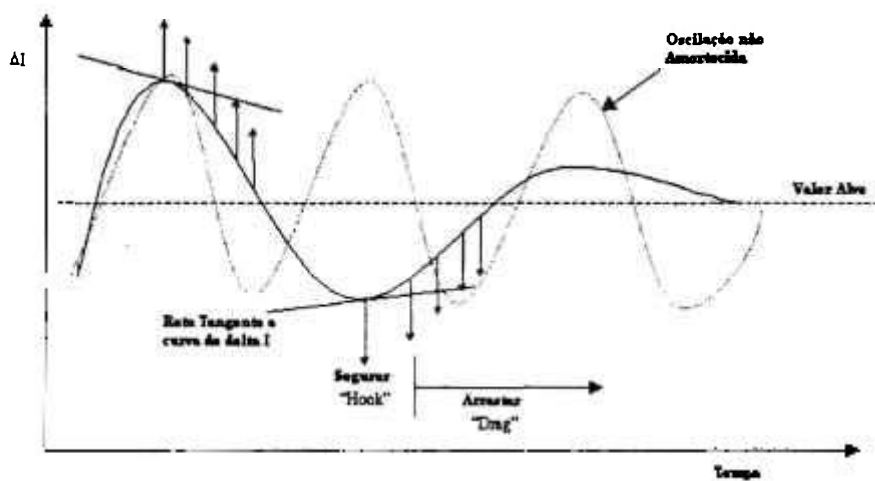
- “Bang-Bang” esta é uma técnica muito efetiva se planejada e executada corretamente. Esta técnica é mais eficaz se a amplitude do ΔI for grande e com um período da oscilação conhecido. Nesta técnica deve-se prever com uma hora de antecedência quando o valor de ΔI atingirá o pico (positivo ou negativo) quando então o valor da diferença (D) entre o valor de ΔI e o valor alvo deve ser registrado. Neste momento, admitindo que ΔI seja positivo, os barras de controle devem ser inseridas de modo que o valor de ΔI atinja o valor alvo. O ΔI continuará a se deslocar no sentido negativo, abaixo do valor alvo, mesmo com as barras de controle paradas. Quando o valor de ΔI atingir uma diferença igual a D abaixo do valor alvo as barras de controle devem ser retiradas fazendo com que o valor de ΔI alcance novamente o valor alvo, quando então a oscilação deve ser suprimida, figura 3.4.4.1.b. Nesta técnica é importante iniciar a movimentação antes do período de uma hora para o pico de ΔI por que se não a oscilação poderá ser incrementada.
- Segurar e Arrastar “Hook-n-drag” esta técnica utiliza a movimentação contrária das barras de controle a tendência da curva de ΔI . Nesta técnica a movimentação das barras de controle deve ser realizada após o ΔI atingir o máximo da curva tanto acima quanto abaixo do seu valor alvo. Quando o coeficiente angular de uma reta tangente a curva de ΔI estiver acima de seu valor alvo e começar a diminuir sua inclinação as barras de controle devem ser retiradas. O contrário deverá ocorrer quando o coeficiente angular da reta tangente a curva de ΔI estiver abaixo de seu valor alvo e começar a aumentar sua inclinação. O termo segurar “hook” representa o início da movimentação das barras de controle e o termo arrastar “drag” representa o efeito provocado na diminuição da taxa de inclinação da reta tangente a curva de ΔI e no amortecimento da Oscilação, figura 3.4.4.1.c.



a - Amortecimento à Meio Ciclo



b - Amortecimento por meio da Técnica do "Bang-Bang"



c - Segurar e Arrastar

Figura 3.4.4.1 Técnicas Utilizadas para o Controle de Oscilações Axiais de Xenônio

4 TRIAX - O NOVO CONCEITO DE “AXIAL OFFSET”

Uma nova metodologia para o acompanhamento e o controle de oscilações de Xenônio tem se mostrado efetivo em reatores do tipo PWR de grande porte no Japão, através do processamento direto dos sinais dos canais da faixa de potência de uma usina.

Esse conceito é baseado no cálculo de dois valores adicionais de “Axial Offset são os:

- “Axial Offset” de Iodo (AO_I)
- “Axial Offset” de Xenônio (AO_{Xe}).

O AO_I é definido como o “Axial Offset” da distribuição de potência que induziria a distribuição atual de Iodo em condições de equilíbrio. O AO_{Xe} é definido do mesmo modo que o AO_I para o Xe. Este tipo de controle de oscilação de Xenônio recebe o nome de TRIAX, três sinais de “Axial Offset”.

As oscilações de Xenônio, como visto anteriormente, são causadas por um desequilíbrio entre a distribuição de potência e de Xenônio. Durante as condições estáveis estas distribuições estão em equilíbrio, bem como a distribuição do Iodo, que é o precursor do Xenônio. Então, em qualquer condição de equilíbrio, o que significa que nenhuma Oscilação de Xenônio deverá ocorrer; os três valores de “Axial Offset” devem ser iguais. Esta simples condição pode então ser utilizada como critério para o controle de Oscilações de Xenônio.

Em um modelo simples de reator de dois pontos [39], as seguintes expressões podem ser escritas:

$$P = \frac{(P_t + P_b)}{2} \quad (48)$$

$$AO_p = \frac{P_t - P_b}{P_t + P_b} \quad (49)$$

Dividindo o reator em duas metades as equações que calculam as concentrações de Iodo e Xenônio (21) e (22) respectivamente podem ser separadas e escritas como:

$$\frac{dI_t}{dt} = \gamma_i \sum_f \phi P_t - \lambda_i I_t \quad (50)$$

$$\frac{dI_b}{dt} = \gamma_i \sum_f \phi P_b - \lambda_i I_b \quad (51)$$

$$\frac{dXe_t}{dt} = \gamma_{Xe} \sum_f \phi P_t + \lambda_i I_t - (\sigma_a \phi P_t + \lambda_{Xe}) Xe_t \quad (52)$$

$$\frac{dXe_b}{dt} = \gamma_{Xe} \sum_f \phi P_b + \lambda_i I_b - (\sigma_a \phi P_b + \lambda_{Xe}) Xe_b \quad (53)$$

Onde:	P	Potência Relativa do Núcleo
	P_t	Potência Relativa na Parte Superior do Núcleo (topo)
	P_b	Potência Relativa na Parte Inferior do Núcleo (base)
	AO_p	“Axial Offset” de Potência
	γ_i, γ_{Xe}	Fração efetiva do Iodo e do Xenônio (“Fission Yields”)
	λ_i, λ_{Xe}	Constantes de Decaimento do Iodo e do Xenônio
	Σ_f	Seção de Choque Macroscópica de Fissão
	ϕ	Fluxo neutrônico Total em 100% de Potência Nominal
	σ_a	Seção de Choque Microscópica de Fissão do Xenônio
	I_t, I_b	Concentração de Iodo na parte Superior do Núcleo e na Parte Inferior do Núcleo
	Xe_t, Xe_b	Concentração de Xenônio na parte Superior do Núcleo e na Parte Inferior do Núcleo

Quando o reator estiver em equilíbrio com $P_t = P_t^{Eq}$ e $P_b = P_b^{Eq}$, as concentrações de Iodo e de Xenônio para o equilíbrio podem ser calculadas como [40]:

$$I_t^{Eq} = \frac{\gamma_i \Sigma_f \phi P_t^{Eq}}{\lambda_i} \quad (54)$$

$$I_b^{Eq} = \frac{\gamma_i \Sigma_f \phi P_b^{Eq}}{\lambda_i} \quad (55)$$

$$Xe_t^{Eq} = \frac{(\gamma_i + \gamma_{xe}) \Sigma_f \phi P_t^{Eq}}{\sigma_a \phi P_t^{Eq} + \lambda Xe} \quad (56)$$

$$Xe_b^{Eq} = \frac{(\gamma_i + \gamma_{xe}) \Sigma_f \phi P_b^{Eq}}{\sigma_a \phi P_b^{Eq} + \lambda Xe} \quad (57)$$

Quando a distribuição de Iodo é conhecida, ou seja, as concentrações de Iodo na parte superior e inferior do núcleo são conhecidas, pode-se avaliar a potência relativa da parte superior (P'_t) e da parte Inferior (P'_b) que daria a distribuição de Iodo em condições de equilíbrio, utilizando as equações (54) e (55). Então pode-se calcular o "Axial Offset" de potência equivalente para o equilíbrio (AO_I) com base na distribuição de Iodo utilizando-se os valores de P'_t e P'_b .

$$AO_I = \frac{P'_t - P'_b}{P'_t + P'_b} = \frac{I_t - I_b}{I_t + I_b} \quad (58)$$

Utilizando as equações (56) e (57) o "Axial Offset" de potência equivalente para o equilíbrio (AO_{Xe}) baseado na distribuição de Xenônio é:

$$AO_{Xe} = \frac{(\gamma_i + \gamma_{xe}) \Sigma_f (Xe_t - Xe_b)}{(\gamma_i + \gamma_{xe}) \Sigma_f (Xe_t + Xe_b) - 2\sigma_a Xe_t Xe_b} \quad \dots\dots\dots(59)$$

Quando o valor de P'_t for igual ao valor da potência nuclear de equilíbrio (P_{eq}) para a parte superior do núcleo e o valor de P'_b for igual ao valor P_{eq} para a parte inferior do núcleo, então, o reator estará em equilíbrio com os três valores de "Axial Offset" iguais.

$$AO_p = AO_I = AO_{Xe} \quad (60)$$

4.1 Método Direto para o Controle Ótimo da Oscilação de Xenônio

Baseado na teoria apresentada no item anterior, quando os três sinais de “Axial Offset” forem iguais, nenhuma oscilação de Xenônio será induzida e o controle da oscilação de Xenônio pode ser feito do seguinte modo, figura 4.1.1:

- (1) Monitorando os sinais de ΔO_P (medido), ΔO_I e ΔO_{Xe} (sinais calculados) de modo “on-line” durante as oscilações.
- (2) Controlando a distribuição de potência de modo que os valores de ΔO_I e ΔO_{Xe} se encontrem, através da movimentação de barras de controle.
- (3) Quando os valores de ΔO_I e ΔO_{Xe} se encontrarem, novamente através da movimentação de barras de controle fazer com que o valor de ΔO_P atinja o valor de ΔO_I e ΔO_{Xe} .

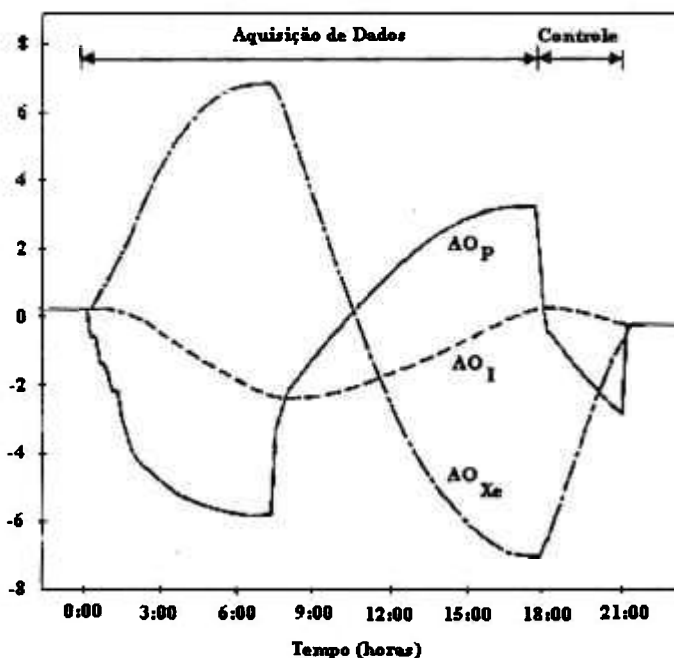


Figura 4.1.1: Comportamento do transiente dos três sinais de “Axial Offset” durante o Oscilação de Xenônio e o seu controle através da técnica do “Bang-Bang” em um reator de 4 “loops” no Japão. *T. Proc. Int. On the Physic of Reactors; Operation, Design and Computation, Marseille, France, April, 1990. Vol. 1 pg. 110.*

4.2 Procedimento Guia de Movimentação de Barras de Controle para o Controle de Oscilações de Xenônio

O método direto visto no item anterior pode determinar a escolha do momento ideal para iniciar a movimentação dos bancos de controle para se atingir o valor alvo de AO_p . Entretanto este método não orienta o operador do Reator no que se refere à direção e à quantidade de deslocamento das barras de controle, para a eliminação de Oscilação de Xenônio.

Para compensar tal desvantagem, foi proposto um método que fornece informações sobre as oscilações de Xenônio, através da visualização “on line” da relação dos três sinais de “Axial Offset”, pela trajetória da curva ($AO_p - AO_{Xe}$) versus ($AO_I - AO_{Xe}$) em um plano X-Y.

Através do comportamento característico desta curva foi desenvolvido um procedimento operacional para controlar a oscilação de Xenônio, onde salienta-se as seguintes características, figura 4.2.1:

- (1) Quando a oscilação de Xenônio for estável (não for convergente ou divergente) a trajetória da curva é uma elipse cujo eixo principal está a um ângulo fixo do eixo X. O eixo principal recai sobre o primeiro e o terceiro quadrante.
- (2) A direção de visualização da curva é sempre no sentido anti-horário e “percorre” uma elipse completa durante um ciclo de Oscilação de Xenônio.
- (3) Quando a oscilação for divergente a curva será uma espiral que se tornará cada vez maior, o contrário ocorrerá se a oscilação for convergente.

A comprovação teórica para a afirmativa acima se encontra na referência [25].

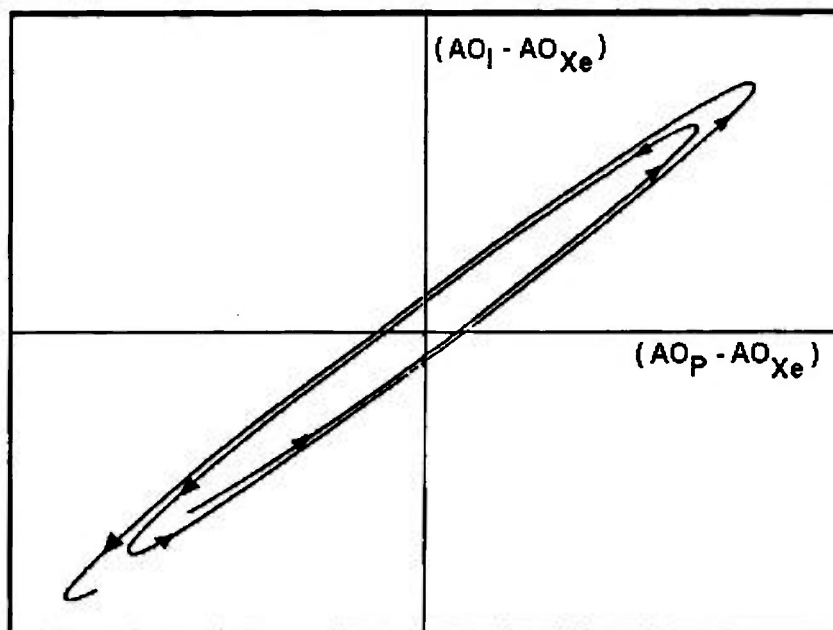


Figura 4.2.1 – Exemplo da Trajetória da Elipse da Oscilação de Xenônio, Journal of Nuclear Science and Technology, February 1995, 32[2], pg. 96.

Quando as barras de controle são movimentadas a trajetória da curva responde do seguinte modo:

- (1) Quando as barras de controle são inseridas, de um passo, de modo a efetuar uma mudança negativa de AO_P a curva se move em uma direção negativa paralela ao eixo X. O contrário ocorre quando as barras de controle são retiradas do reator.
- (2) Quando as barras de controle param, a curva novamente se torna uma elipse, com as mesmas características anteriores, a partir do ponto da parada da movimentação das barras de controle.

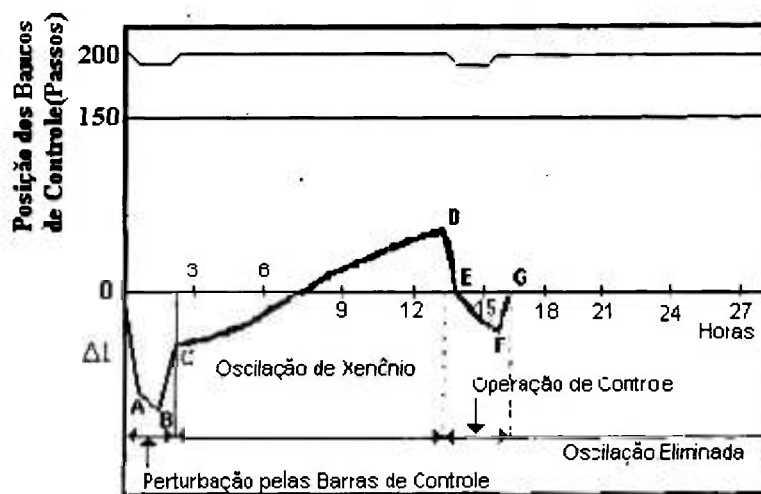
Quando a curva está na sua origem a oscilação de Xenônio não mais existe.

Como explicado anteriormente a característica da curva é simples e definida e a oscilação de Xenônio pode ser suprimida fazendo a curva se mover para a sua origem.

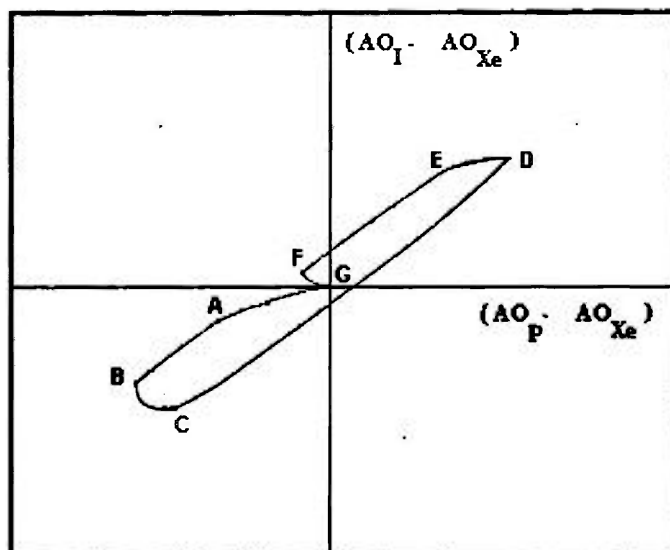
Com base no perfil da trajetória da curva a seguinte estratégia de controle pode ser aplicada, figura 4.2.2:

- (1) Identificar a posição atual das correntes na curva, se ela está abaixo ou acima do eixo principal.
- (2) Se o valor de $(AO_1 - AO_{Xe})$ for positivo provocar uma mudança negativa no valor de AOp, inserindo barras de controle. Se o valor de $(AO_1 - AO_{Xe})$ for negativo provocar uma mudança positiva no valor de AOp, retirando barras de controle.
- (3) Esperar que a curva se aproxime do eixo X.
- (4) Quando a curva alcançar o eixo X, fazer a mesma se aproximar da origem através da mudança no valor de AOp: retirando bancos de controle se a curva atingir o eixo X pelo lado positivo de $(AO_1 - AO_{Xe})$ e inserindo bancos de controle se o inverso ocorrer.

Com este método as informações sobre a direção e o total de movimentação de barras de controle podem ser determinadas através da visualização “on-line” uma informação qualitativa do efeito da movimentação das barras de controle no perfil da curva.



a – Transientes do Reator Durante o Controle das Oscilações de Xenônio



b – Curva da Oscilação de Xenônio Durante o Controle.

Figura 4.2.2 - Journal of Nuclear Science and Technology, February 1995, 32[2], pg.99.

5 DESENVOLVIMENTO E TESTE DO SISTEMA

O sistema computacional desenvolvido neste trabalho recebeu o nome de *REATIV*, abreviação da palavra reatividade. A linguagem de computador utilizada foi o MS-VISUAL BASIC [41],[42]. Esta linguagem de programação permite que o sistema utilize todas as interfaces gráficas do sistema operacional MS-WINDOWS, o mais utilizado atualmente.

O banco de dados utilizado pelo *REATIV*, onde são armazenados em forma de tabelas os valores adquiridos da instrumentação, os valores proveniente dos cálculos e os valores das constantes do projeto do núcleo, é o MS-ACCESS , já utilizado em Angra 1 pelo SICA 2.0 para a geração e análise de históricos operacionais da usina.

O *REATIV* é composto por formulários (telas do programas), “procedures” , funções e relatórios que foram programados separadamente e agrupados em módulos que realizam funções específicas, deste modo o programa ficou compacto e versátil.

O *REATIV* foi dividido em três módulos principais, figura 5.1:

- Acompanhamento e Controle dos Parâmetros de Reatividade do Reator
- Acompanhamento da Queima do Combustível Nuclear e Procedimentos de Supervisão (“Surveillance”)
- Acompanhamento e Controle das Oscilações Axiais de Xenônio

A aquisição dos dados da instrumentação pelo *REATIV* pode ser feita de três modos: atualização manual (utilizando o teclado e o “mouse”), atualização através do processamento do histórico operacional de um parâmetro operacional da usina através de um banco de dados gerado pelo SICA 2.0 ou através do acesso direto ao banco de dados do SICA 2.0 que é atualizado em tempo real (“on line”) pêlos sinais provenientes do sistema de instrumentação da usina.



Figura 5.1 - Tela de Entrada do Sistema REATIV.

5.1 Acompanhamento e Controle dos Parâmetros de Reatividade do Reator

Este módulo foi desenvolvido para substituir de modo integrado os programas que trabalham com reatividade, que estão atualmente no módulo Sistemas de Funções do Reator do SICA 2.0, foi dividido em seis submódulos conforme mostrado na tela de seleção do sistema, figura 5.5.1.

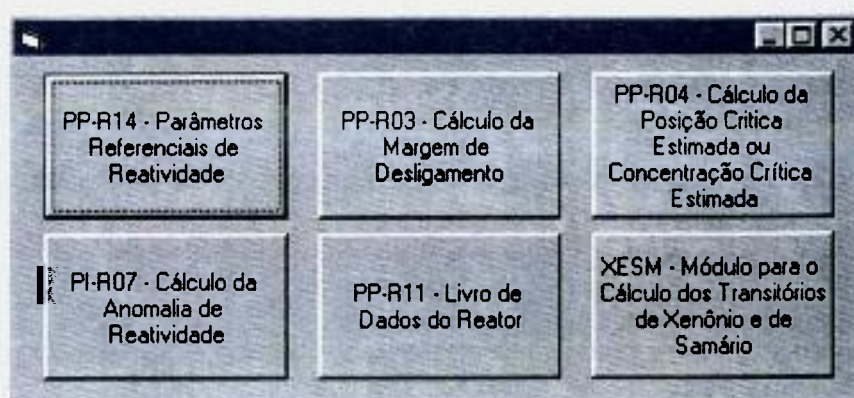


Figura 5.1.1 - Seleção dos Módulos que Trabalham com Parâmetros de Reatividade

5.1.1 PP-R11 - Livro de Dados do Reator

Uma inovação introduzida no sistema *REATIV* foi o módulo referente ao Livro de Dados do Reator, (PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Procedimento de Operação do Reator). Este procedimento contém os dados que são necessários para a partida e operação eficiente e segura do reator e do turbo gerador. Suas tabelas e figuras são atualizadas pelos profissionais do Setor de Engenharia de Reatores da Eletronuclear, sendo as mesmas utilizadas rotineiramente tanto pelos operadores do reator quanto pelos Físicos e Engenheiros do Reator, figura 5.1.1.1.

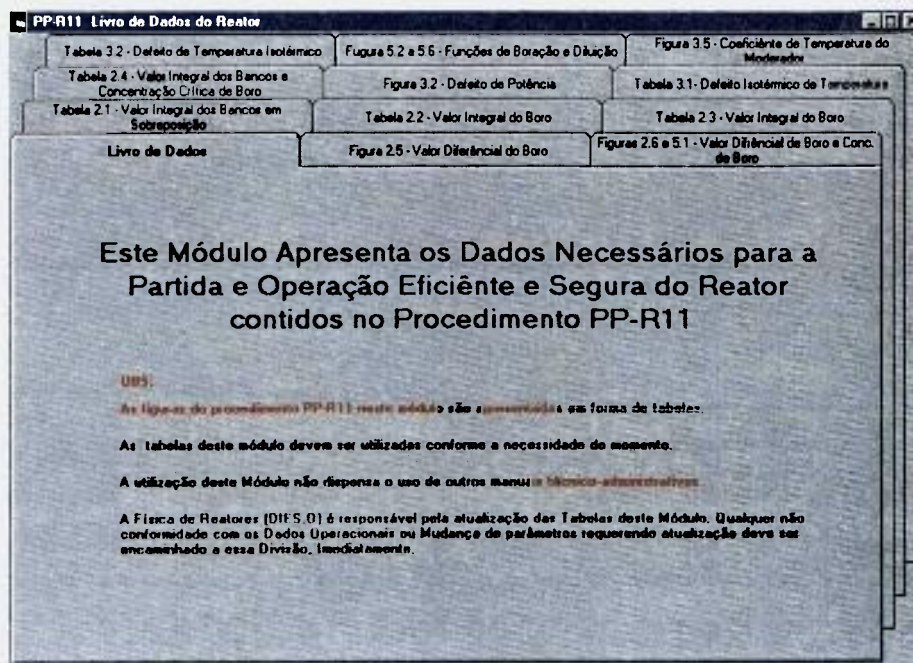


Figura 5.1.1.1 Tela de Entrada do Módulo PP-R 11 Livro de Dados do Reator

Neste módulo o valor das constantes das tabelas do Livro de Dados do Reator, que estão relacionados com a reatividade do núcleo, e que foram geradas pelo código ANC quando o projeto do núcleo foi confeccionado, podem ser facilmente atualizadas nas tabelas no banco de dados do *REATIV* através de planilhas, figuras 5.1.1.2 à 5.1.1.12, basta digitar no campo da planilha que tem a constante que se quer modificar o seu valor atualizado, e esta será automaticamente inserida no lugar da anterior no banco de dados do sistema. O sistema confere se o usuário tem permissão para realizar atualizações de constantes antes de salvar as alteração no banco de dados.

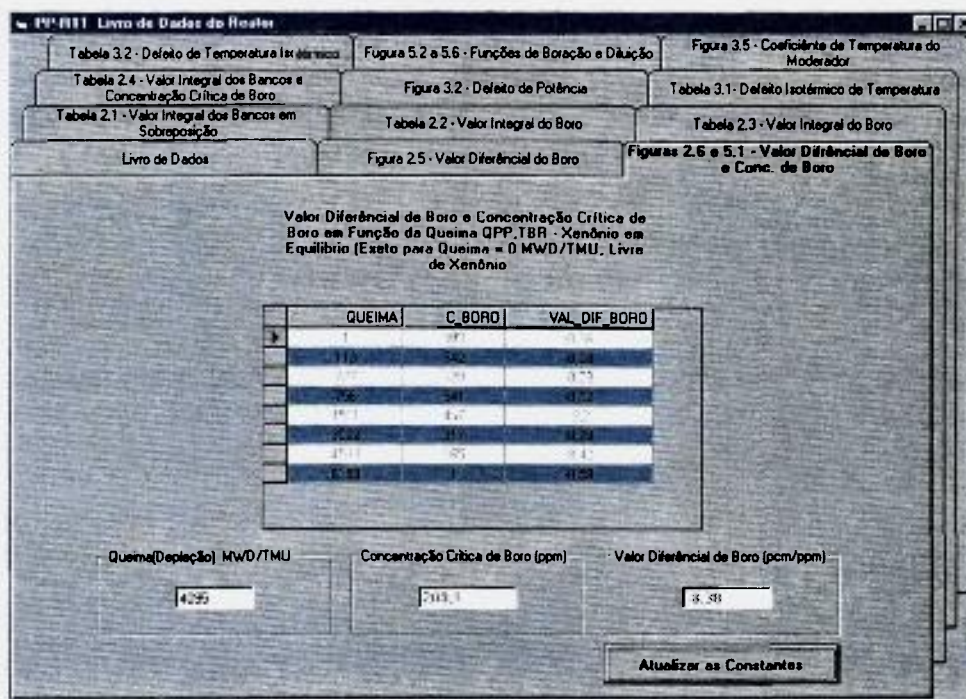


Figura 5.1.1.3. - Valor Diferencial de Boro em Função da Queima do Combustível QPP, TBR e Concentração Crítica de Boro em Função da Queima do Combustível QPP, TBR - Xenônio em Equilíbrio (exceto para Queima = 0 MWD/MTU, livre de Xenônio), Figuras 2.6 e 5.1 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

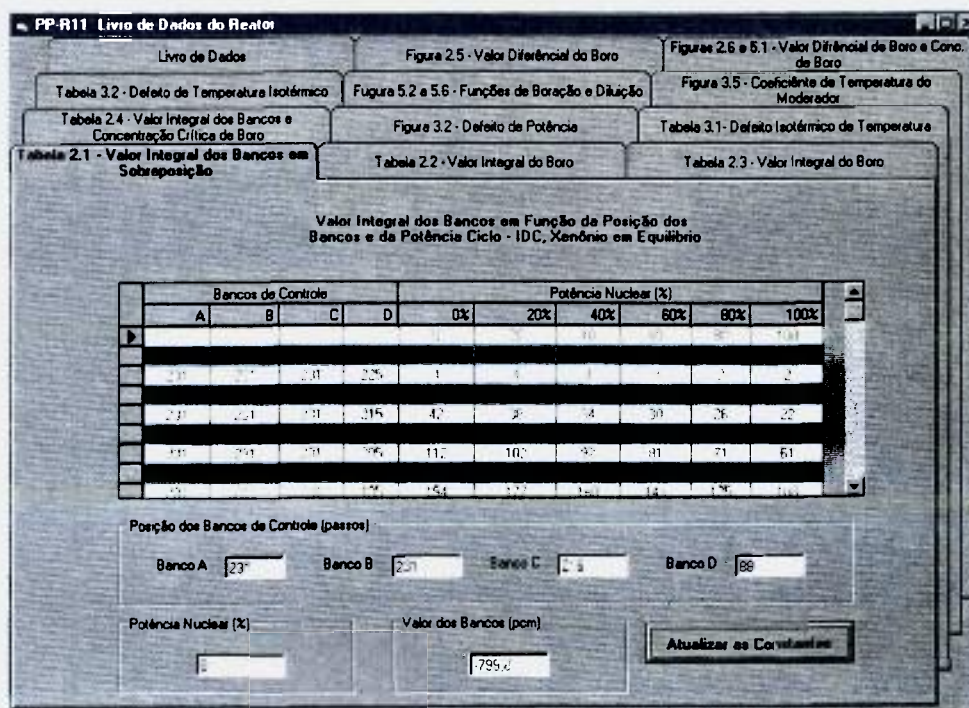


Figura 5.1.1.4. - Valor Integral dos Bancos em Sobreposição em Função da Posição dos Bancos e da Potência do Reator- IDC (113 MWD/MTU, 3 DEPP) - Xenônio em Equilíbrio, Tabela 2.1 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

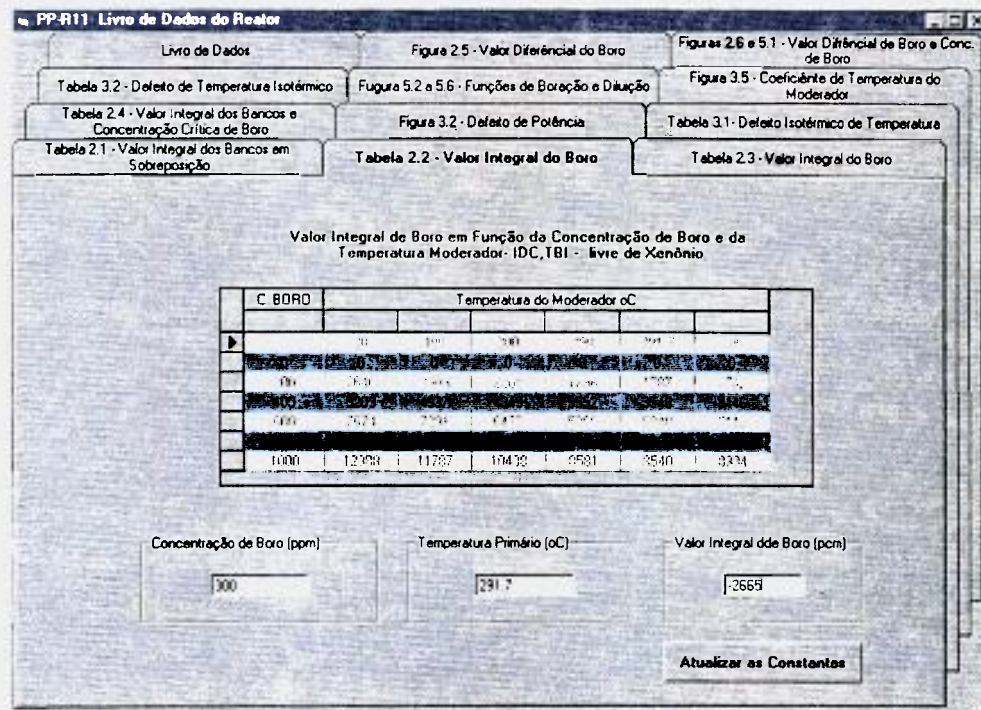


Figura 5.1.1.5 – Valor Integral de Boro em Função da Concentração de Boro e da Temperatura do Moderador IDC, TBI (Inclui os Bancos de Desligamento) - Livre de Xenônio, Tabela 2.2 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

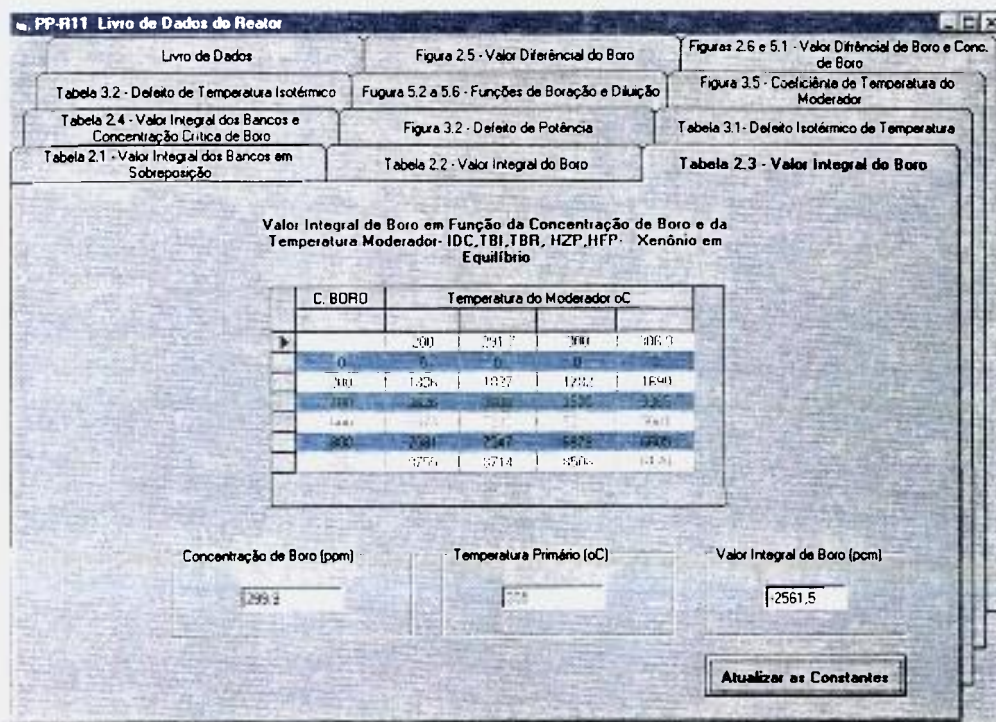


Figura 5.1.1.6 – Valor Integral de Boro em Função da Concentração de Boro e da Temperatura do Moderador QPZ, TBR, IDC e FDC - Xenônio em Equilíbrio, Tabela 2.3 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

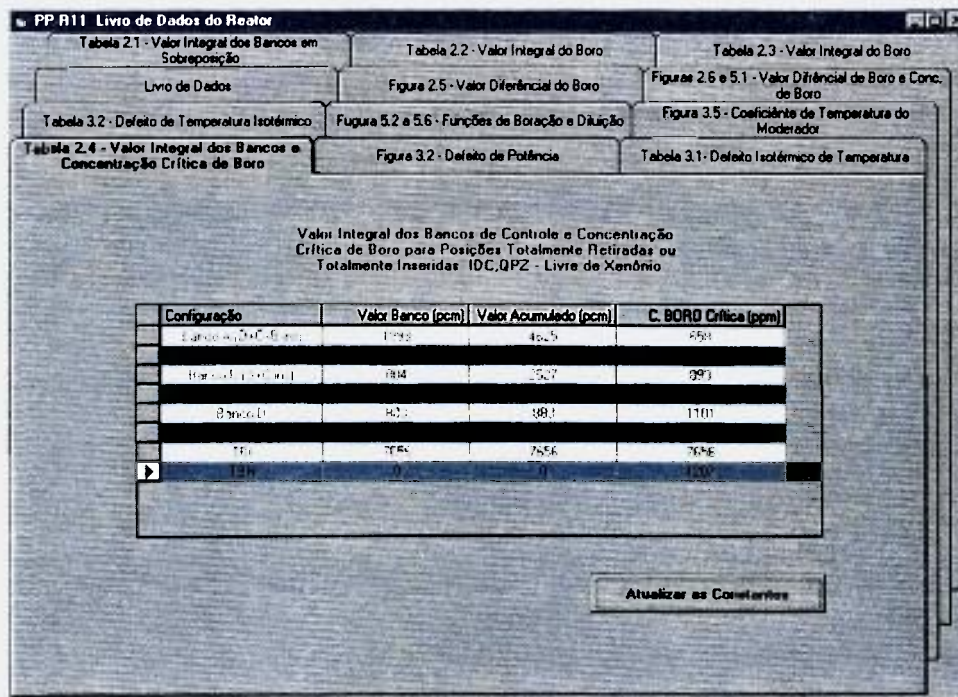


Figura 5.1.1.7 – Valor Integral dos Bancos de Controle e Concentração Crítica de Boro para Posições Totalmente Retiradas ou Totalmente Inseridas IDC, QPZ - Livro de Xenônio, Tabela 2.4 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

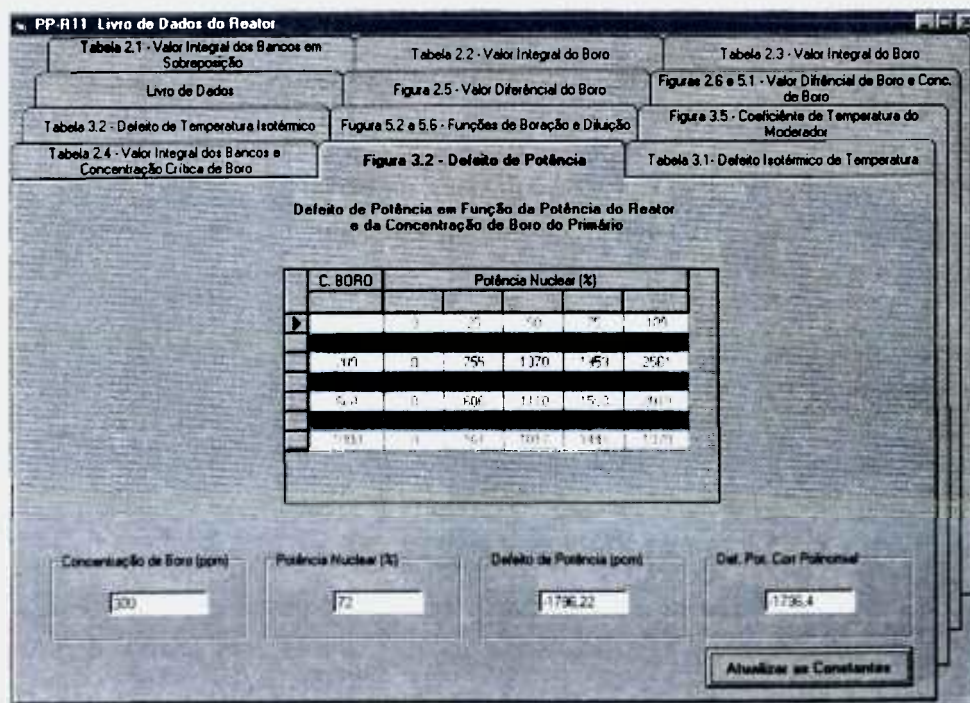


Figura 5.1.1.8 – Defeito de Potência em Função da Potência do Reator e da Concentração de Boro no Primário, Figura 3.2 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

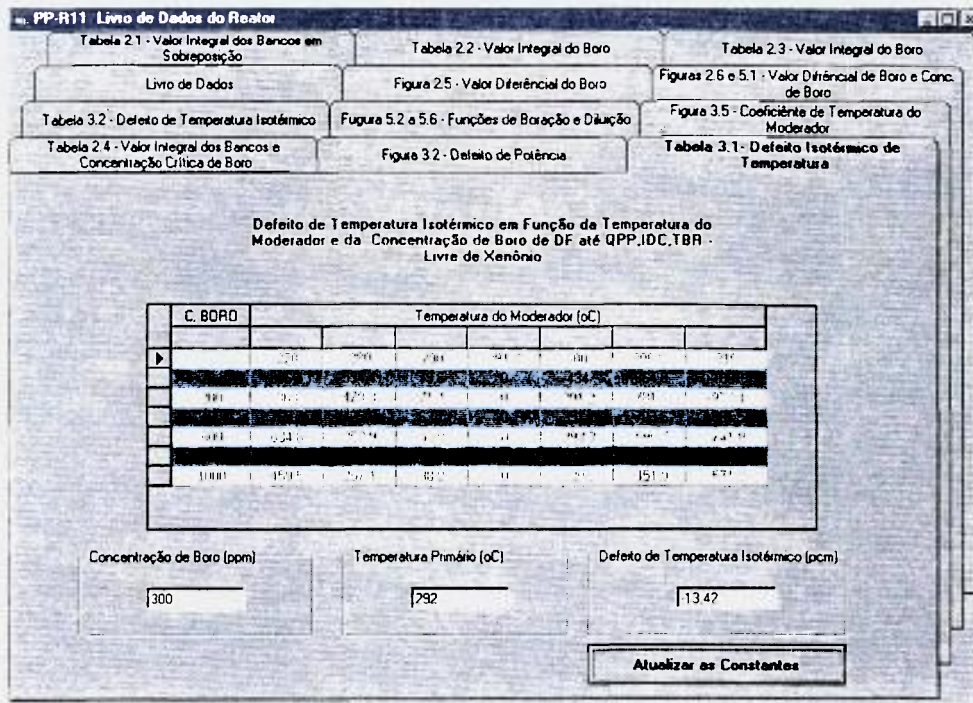


Figura 5.1.1.9.– Defeito de Temperatura Isotérmico em Função da Temperatura do Moderador e da Concentração do Boro DF até QPP, IDC, TBR - Livre de Xenônio , Tabela 3.1 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

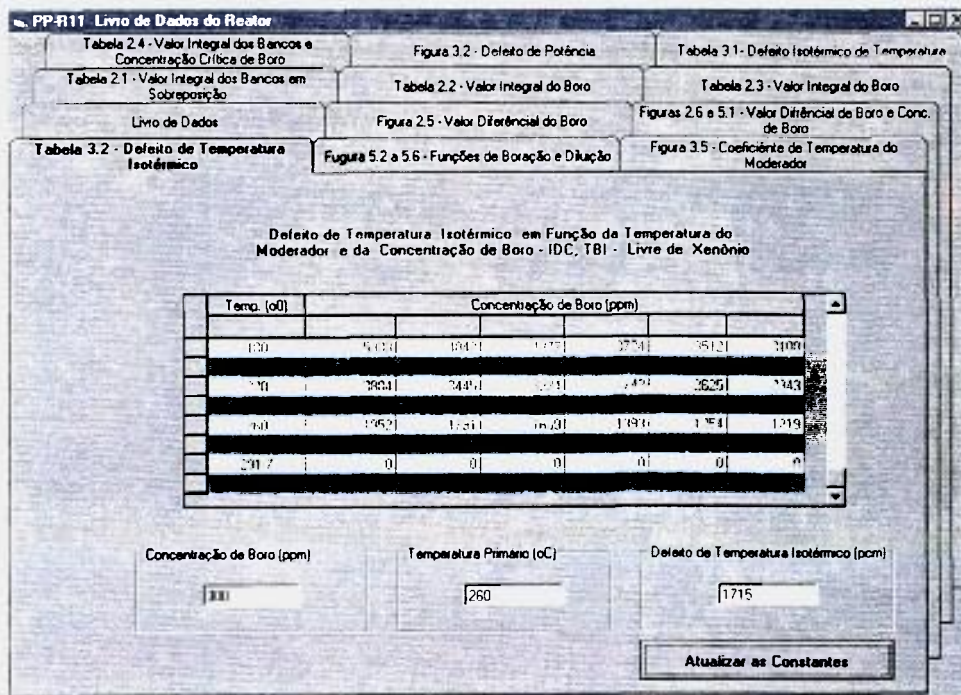


Figura 5.1.1.10 – Defeito de Temperatura Isotérmico em Função da Temperatura do Moderador e da Concentração do Boro IDC, TBI - Livre de Xenônio , Tabela 3.2 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

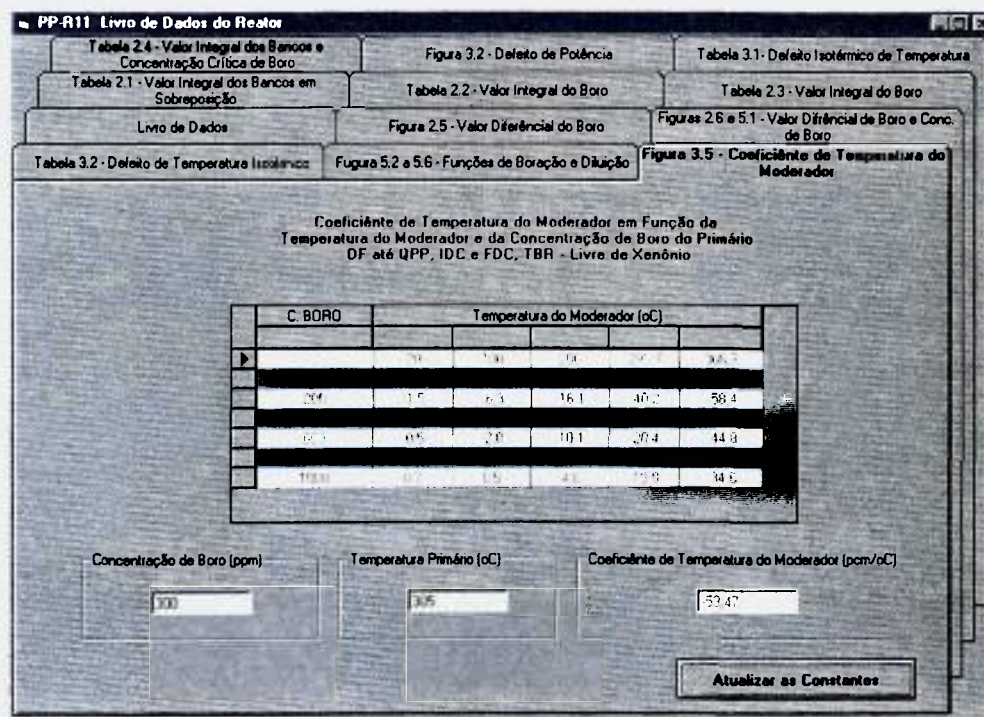


Figura 5.1.1.11 - Coeficiente de Temperatura do Moderador em Função da Temperatura do Moderador e da Concentração de Boro no Primário DF até QPP, IDC e FDC, TBR - Livre de Xenônio, Figura 3.5 do PP-R11 - Livro de Dados do Reator, Ciclo 9.

5.1.2 XESM - Módulo para o Cálculo dos Transitórios de Xenônio e de Samário

Este foi o primeiro módulo desenvolvido no sistema e é um dos principais módulos de atualização e teste do REATIV. Com base nas equações dos itens 2.3 e 2.5, que estão diretamente relacionadas com os transientes de potência nuclear para a determinação dos valores das reatividades do Xenônio, do Samário e com a queima do combustível nuclear, foram desenvolvidas as seguintes funções em *Visual Basic*:

- $I(I_0, P, t)$ - determina a concentração de *Iodo* em átomos/cm³, conhecendo-se a concentração inicial de *Iodo* e a potência nuclear, após um intervalo de tempo.

- **Xe**(Xe₀, I₀, P, t) - determina a concentração de *Xenônio* em átomos/cm³, conhecendo-se a concentrações iniciais de Iodo, Xenônio e a potência nuclear, após um intervalo de tempo.
- **Pm**(Pm₀, P, t) - determina a concentração de *Promécio* em átomos/cm³, conhecendo-se a concentração inicial de Promécio e a potência nuclear, após um intervalo de tempo.
- **Sm**(Sm₀, Pm₀, P, t) - Determina a concentração de *Samário* em átomos/cm³, conhecendo-se a concentração inicial de Promécio, Samário e a potência nuclear, após um intervalo de tempo.
- **ρ_{Xe}**(Xe) - determina o valor da reatividade introduzida pelo *Xenônio* em pcm, conhecendo-se a concentração de Xenônio.
- **ρ_{Sm}**(Sm) - determina o valor da reatividade introduzida pelo *Samário* em pcm, conhecendo-se a concentração de Samário.
- **QUEIMA**(P, t) - Determina a queima total de combustível em MWD/TMU, conhecendo-se o valor da potência nuclear após um intervalo de tempo.

As funções acima descritas foram testadas neste módulo e são bastante utilizadas nos demais módulos do sistema. As funções que determinam as concentrações de Iodo e Xenônio foram fundamentais para a utilização da metodologia TRIAX para o controle das oscilações de Xenônio.

Neste módulo as constantes de grupo geradas pelo programa LEOPARD podem ser consultadas e atualizadas diretamente através das planilhas do módulo, isto significa que as constantes que fazem parte das funções são armazenadas no banco de dados do sistema não havendo a necessidade de se gerar um novo programa executável a cada atualização de constantes, figura 5.1.2.1.

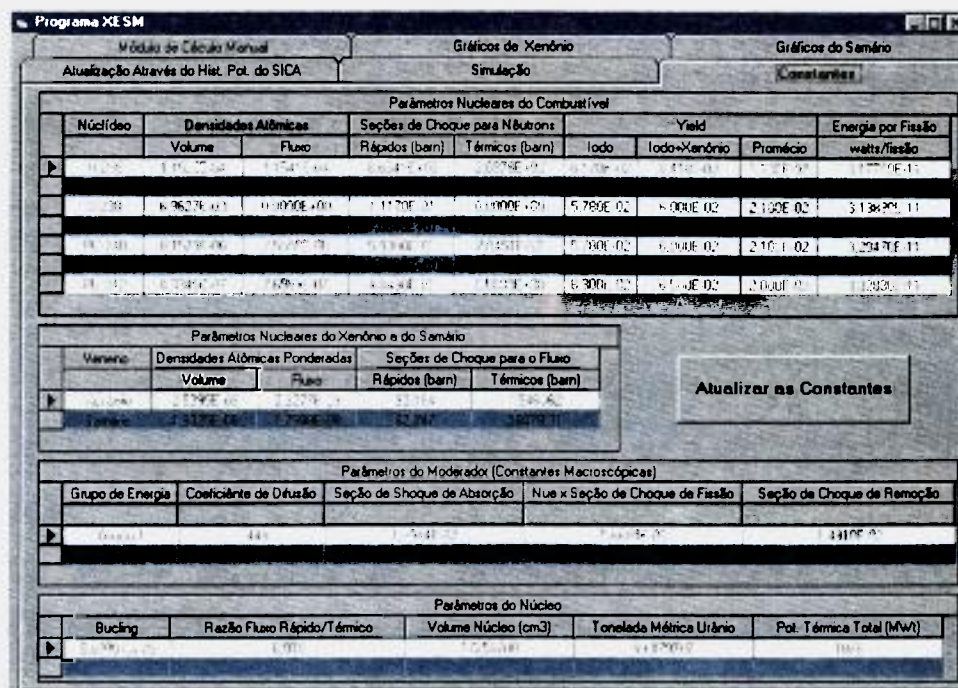


Figura 5.1.2.1 - Módulo de Atualização de Constantes do Módulo XESM.

Também foi desenvolvido neste módulo uma rotina de simulação onde é possível acompanhar as variações das concentrações de Iodo, Xenônio, Promécio e Samário, do valor da reatividade do Xenônio e do Samário, da queima do combustível nuclear para as seguintes situações operacionais da usina: variação de potência nuclear a uma taxa definida, reator nuclear funcionando com a potência constante por um determinado período de tempo, reator desligado por um determinado período de tempo, Figura 5.1.2.2.

Na interface gráfica do módulo, figura 5.1.2.3. é possível observar através de uma simulação a variação da potência nuclear e do valor da reatividade do Xenônio para seguintes situações operacionais: reator em 100% de potência nominal com Xenônio em equilíbrio durante três dias, descida de potência a uma taxa de 3% por minuto para 50% de potência nominal, funcionamento em 50% de potência nominal por três dias, subida de potência para 100% a uma taxa de 3% por minuto, funcionamento em 100% de potência nominal por mais três dias.

É possível observar pela figura 5.1.2.3 que em função da diminuição da potência nuclear, a produção de Xenônio, oriunda do decaimento do Iodo, causará um crescimento inicial do envenenamento do Xenônio. O envenenamento pelo Xenônio atinge um máximo e diminui devido a redução na produção de Xenônio pelo decaimento do Iodo que diminui com a redução da potência. O efeito inverso ao descrito acima é observado devido ao aumento da potência nuclear.

Pelos procedimentos operacionais de Angra 1 é necessário fazer um registro diário dos seguintes parâmetros: concentrações de Iodo, Xenônio, Promécio e Samário, valores da reatividades do Xenônio e Samário, quantidade diária e total de combustível nuclear consumido durante um ciclo de operação. Se o sistema não estiver operando em tempo real com a instrumentação, o registro destes dados podem ser atualizados no banco de dados do sistema através de duas rotinas inseridas neste módulo: Atualização do Histórico Operacional Diário através do processamento de um *histórico de potência* gerado pela SICA 2.0, Figura 5.1.2.4, e Módulo de Cálculo Manual através da atualização manual dos valores da potência nuclear. Figura 5.1.2.5.

The screenshot shows the 'Programa XESM' interface with the following data fields:

- Data e Hora:** 11/03/2001 09:15
- Pot. Nuclear Média 24h anteriores (%):** 72.3
- Concentrações de Produtos de Fissão (Átomos/cm3):**
 - Iodo: 1.49E+09
 - Xenônio: 1.13E+09
 - Promécio: 5.14E+08
 - Samário: 1.50E+08
- Reatividade dos Venenos de Fissão (pcm):**
 - Xenônio: 75.761
 - Samário: 771.7
- Queima (Depleção) MWD/TMU:**
 - Período: 27.2
 - Acumulado: 1.301.3
- Histórico de Potência do SICA:**
 - Data e Hora: 11/03/2001 09:15
 - Potência Nuclear (%) TMRM07: 72.42
 - Intervalo de Tempo entre os Registros: 30

Figura 5.1.2.4 - Módulo de Atualização do Histórico Operacional Diário Através do Processamento de um Histórico de Potência Gerado pelo SICA2.0.

Programa XI SM

Atualização através do Hist. Pot. do SICA Simulação Constantes

Módulo de Cálculo Manual Balanço de Xenônio Gráficos do Xenônio

Date e Hora Iniciais: 14/02/2001 00:00:00

Concentrações Iniciais de Produtos de Fissão (Átomos/cm³)

Iodo	Xenônio	Promécio	Samário
5,4356E-09	2,2409E-09	8,5144E-09	1,5807E-09

Queima Inicial Acumulada (MWD/TMU): 5 929,9

Int. Tempo (Min)	Potência	Data e Hora	Real Xenônio	Real Samário	Queima	Queima (Acum.)
480	72	13/02/2001 08:00	-2,573,62	-771,95	9,03	5,938,93
480	73	13/02/2001 16:00	-2,562,02	-771,58	9,15	5,948,08
480	72,5	14/02/2001 00:00	-2,573,30	-771,54	9,03	5,957,11

Date e Hora Finais: 14/02/2001 00:00:00

Concentrações Finais de Produtos de Fissão (Átomos/cm³)

Iodo	Xenônio	Promécio	Samário
5,4517E-09	2,2437E-09	8,5141E-09	1,5807E-09

Queima Final do Período (MWD/TMU): 9,03

Queima Final Acumulada (MWD/TMU): 5 957,11

Atualize os Valores Iniciais dos Produtos de Fissão e da Queima

Atualize o Resultado do Cálculo no Histórico Diário

Figura 5.1.2.5 - Módulo de Atualização do Histórico Operacional Diário através da Atualização Manual dos Valores da Potência Nuclear.

5.1.3 PP-R14 - Parâmetros Referenciais de Reatividade

Os seguintes dados operacionais do reator para uma determinada data e hora na sua condição mais estável anterior ao seu desligamento devem ter seus valores registrados:

- Provenientes do Sistema de Instrumentação: Potência Nuclear, Temperatura Média do Circuito Primário e Posição dos Bancos de Controle.
- Provenientes de Cálculos: Concentração de Iodo, Xenônio, Promécio, Samário e queima total do combustível nuclear.
- Provenientes de Análises Químicas do Circuito Primário: concentração de boro no SRR(Sistema de Refrigeração do Reator) e no PZR (pressurizador).

Os valores das reatividades introduzidas no reator p elos parâmetros acima descritos tamb em devem ter seus dados registrados. O conjunto organizado destes registros são chamados de *parâmetros referenciais de reatividade*.

Os valores das reatividade dos *parâmetros referenciais de reatividade* são utilizados tanto nos cálculos que garantem a permanência do reator no estado subcrítico como nos cálculos que determinam a concentra o de ácido bórico ou a posi o de barras de controle para uma nova opera o de criticaliza o. Para o cálculo e atualiza o no banco de dados dos *parâmetros referenciais de reatividade* foi desenvolvido no sistema o módulo PP-R14 - Parâmetros Referenciais de Reatividade, figura 5.1.3.1.

No módulo PP-R 14 a atualiza o dos dados operacionais provenientes do sistema de instrumenta o no banco de dados do *REATIV* pode ser realizada de dois modos:

- Através de uma consulta em tempo real do banco de dados do SICA 2.0, op o "ON LINE" com a instrumenta o, no módulo PP-R14.
- Atualiza o manual dos dados, feita diretamente pelo usuário do sistema, op o "OFF LINE" com a instrumenta o, no módulo PP-R14.

Os valores das concentra es de Iodo, Xenônio, Promécio e Samário, e da queima do combustível, para a mesma data e hora de atualiza o dos dados operacionais provenientes da instrumenta o, são automaticamente calculados pelo sistema e atualizados no banco de dados se o módulo PP-R14 estiver operando no modo "ON LINE" com a instrumenta o, caso contrário, esta atualiza o pode ser realizada pelo módulo XESM.

Não existe atualmente em Angra 1 uma instrumenta o automatizada para a determina o da concentra o de boro no circuito primário. A atualiza o dos valores das concentra es de boro no SRR e no PZR no banco de dados do *REATIV* deve ser realizada pelo menos uma vez por dia pelos usuários do sistema, "imput" manual.

Figura - 5.1.3.1 Módulo PP-R14 , Atualiza os Dados Operacionais que formam os Parâmetros Referenciais de Reatividade.

O módulo PP-R14 calcula e grava em uma tabela do banco de dados do *REATIV* os dados operacionais e o valores das reatividades dos *parâmetros referenciais de reatividade*, figuras 5.1.3.2 e 5.1.3.3.

Três situações operacionais distintas da usina, anteriores ao desligamento do reator, devem ter seus dados registrados para servirem como *parâmetros referenciais de reatividade*:

- (1) Reator crítico logo após a operação de criticalização.
- (2) Reator crítico quando este operou por pelo menos 72 horas (3 dias) com a potência estável.
- (3) Reator crítico na iminência de um desligamento, operando com a potência estável há pelo menos 72 horas.

A escolha de qual a situação operacional do qual os dados dos *parâmetros referenciais de reatividade* serão utilizados nos cálculos que garantem a margem de desligamento e nos cálculos da posição dos bancos de controle ou da concentração de ácido bórico para uma nova criticalidade dependerá das condições da usina que antecederam o seu desligamento. Se o desligamento ocorreu até 48 horas após a última operação de criticalização, a condição mais estável será a da criticalidade, então devem ser utilizados os *parâmetros referenciais de reatividade* para a condição (1). Se o reator esteve variando potência quando desligou devem ser utilizados o último valor registrado para a condição (2). Se, no entanto, o reator estava com a potência estável quando ocorreu o seu desligamento a condição (3) deverá ser utilizada.

Este módulo do sistema também emite um relatório, que pode ser impresso, dos dados de saída do procedimento PP-R14 - Parâmetros referenciais de Reatividade, tabela 5.1.3.1.

Se o *REATIV* estiver operando de modo "ON LINE" com a instrumentação, este reconhece o sinal de criticalidade ou de desligamento no SICA 2.0 e os *parâmetros referenciais de reatividade* são automaticamente atualizados no banco de dados do sistema para as três condições operacionais descritas anteriormente. O registro dos *parâmetros referenciais de reatividade* para a condição (2) é efetuado diariamente no banco de dados do sistema para as zero horas de um determinado dia, se a potência nuclear para esta hora não desviar mais do que 1,0 % da potência nuclear média das 72 horas anteriores.

Neste trabalho, como exemplo e teste do sistema, serão utilizados os registros dos *parâmetros referenciais de reatividade* do desligamento ocorrido em Angra 1 às 2 hora e 30 minutos do dia 08/12/2000 do ciclo nove.

As figuras e tabelas deste item já trazem os dados operacionais de Angra 1 para este desligamento.

PP-R14 Parâmetros Referências de Reatividade

Atualização de Dados

08/12/2000 02:30

Posição dos Bancos de Controle (pessoas)

Banco A	231	Banco B	231
Banco C	231	Banco D	179

Sistema de Refrigeração do Reator:

Concentração de Boro (ppm)

08/12/2000 02:30

Primário: 336

Resfriador: 336

Temperatura (oC)

Média: 300,5

Referência: 301,56

Potência do Nuclear (%)

70

Concentração de Xenônio (Átomos/cm³)

2,2272E-9

Concentração de Samário (Átomos/cm³)

1,7035E-8

OBS Reator Crítico na iminência de um Desligamento.

Valor dos Bancos de Controle

223,5 pcm

Valor Integral do Boro

2150,7 pcm

Defeito da Temperatura Isotérmico

0,7 pcm

Defeito de Potência

1718,1 pcm

Reatividade da Xenônio

7554,5 pcm

Reatividade do Samário

431,0 pcm

Reatividade Total

1272 pcm

Histórico dos Parâmetros Referências

Referências

Tabela 2.1 do PP-R11 Valor Integral dos bancos em Sobreposição em Função da Posição dos Bancos e da Potência do Reator - Xenônio em Equilíbrio.

Tabela 2.3 do PP-R11- Valor Integral do Boro em Função da Concentração de Boro e da Temperatura do Moderador.

Tabela 3.1 do PP-R11 Defeito da Temperatura Isotérmico em Função da Concentração de Boro e da Temperatura Média menos Defeito Isotérmico de Temperatura em Função da Concentração de Boro e da Temperatura de Referência.

Figura 3.2 do PP-R11 Defeito de Potência em Função da Potência do Reator e da Concentração de Boro.

Programa XESM, função da concentração de Xenônio determinado através do Histórico de Potência.

Programa XESM função da concentração de Samário determinado através do Histórico de Potência.

Figura - 5.1.3.2 Módulo PP-R14 , Calcula os Valores das Reatividades que formam os Parâmetros Referenciais de Reatividade.

PP-R14 Parâmetros Referências de Reatividade

Atualização de Dados

PP-R14 Parâmetros Referências de Reatividade

Histórico dos Parâmetros Referências

Parâmetros Referências de Reatividade

Data e Hora	Bancos de Controle				Concentração de Boro						
	Data e Hora	BCC	BOD	POI	V. Banco	Data e Hora Atz	C. Boro	T. Nuc	T. Ref	Def. Iso	Def. Pot
28/09/2000 00:00	231	223	100	5,6	20/09/2000 00:00	504	305,9	305,9	0,0	-2150,7	-4241,8
29/11/2000 00:00	231	221	95,45	9,6	29/11/2000 00:00	300	305,2	305,2	0,4	-2331,5	2557,6

Parâmetros Referências do Reator Crítico Após a Operação de Calibração

Parâmetros Referências do Reator Crítico quando Operou com a Potência Constante por pelo menos 22 horas

Parâmetros Referências do Reator Crítico na iminência de um Desligamento

Visualizar Parâmetros Referências de Reatividade por Data e hora

Figura - 5.1.3.3 Módulo PP-R14 , Permite a Consulta dos Parâmetros Referências de reatividade Gravados no Sistema.

Tabela 5.1.3.1 - Relatório Emitido pelo REATIV com os *parâmetros referenciais de reatividade* para o desligamento ocorrido em 08/12/2000 às 02:30.

PP-R14 Parâmetros Referenciais de Reatividade			
Data: 08/12/2000 Hora: 02:30		Queima(Depleção) 4.095,2 MWD/TMU	
Condição do Reator: Reator Crítico na Iminência de um Desligamento.			
Posição dos Bancos de Controle		Valor dos Bancos	Referências:
1	Banco A: 231 passo Banco B: 231 passo Banco C: 231 passo Banco D: 179 passo	-225,4 pcm	Tabela 2.1 do PP-R11 Posição dos Bancos e da Potência do em Sobreposição em Função da Reator - Xenônio em Equilíbrio
Sistema de Refrigeração do Reator			
2	Concentração de Boro Atualizada em: 08/12/2000 02:30	Def. Isot. De Temperatura	Tabela 2.3 do PP-R11 Defeito de Temperatura Isotérmico em Função da Conc. de Boro e temperatura Média menos Defeito de Temperatura Isotérmico em Função da Conc. de Boro e da Temperatura de Referência.
	SRR 336 ppm PZR 336 ppm	61,7 pcm	
3	Temperatura: Média: 300,5 °C Referência: 301,6 °C	Val. Integral do Boro -2.954,1 pcm	Tabela 2.3 do PP-R11 Valor Integral do Boro em Função da Concentração de Boro e da Temperatura do Moderador
4	Potência Nuclear:	Defeito de Potência	Figura 3.2 do PP-R11 Defeito de Potência em Função da Potência do Reator e da Concentração de Boro.
	70,0 %	-1.718,1 pcm	
5	Concentração de Xenônio:	Reatividade do Xenônio	Função para Cálculo do Xenônio Atualizada Através do Histórico de Potência
	2,2272E-9 Átomos/cm ³	-2.554,4 pcm	
6	Concentração de Samário:	Reatividade do Samário	Função para Cálculo do Samário Atualizada Através do Histórico de Potência
	1,7035E-8 Átomos/cm ³	-831,5 pcm	
Reatividade Total (Soma 1+2+3+4+5+6)		-8.222,0 pcm	

5.1.4 PP-R03 - Cálculo da Margem de Desligamento

Como citado anteriormente é exigido pelas especificações técnicas de Angra 1 que o reator carregado com elementos combustíveis e desligado tenha as seguintes *margens de desligamento*: superior a 2000 pcm de reatividade negativa quando a temperatura do circuito primário estiver acima de 93°C e superior a 1000 pcm de reatividade negativa se a temperatura do circuito primário for menor que 93°C.

O procedimento PP-R03 – Calculo da Margem de Desligamento traz um roteiro para o cálculo da *margem de desligamento* e deve ser executado o mais rapidamente possível toda vez que ocorre um desligamento em Angra 1. Neste procedimento a *margem de desligamento* que é exigida para atender aos critérios das especificações técnicas é calculada levando-se em consideração as variações na temperatura, na concentração de Boro, Xenônio e de Samário que ocorrem durante o desligamento do reator. Se a *margem de desligamento* calculada pelo procedimento PP-R03 para um determinado instante após o desligamento do reator for menor do que o exigido pelas especificações técnicas, realiza-se o cálculo da concentração de boro à ser adicionada ao circuito primário para que a condição de requerida pelas seja atendida.

A figura 5.1.4.1 mostra a primeira tela do módulo PP-R03 desenvolvido no *REATIV* que calcula a *margem de desligamento*. Nesta tela através do acionamento dos comandos localizados na parte inferior da mesma pode ser selecionado o último registro, que estão gravados em uma tabela do banco de dados do sistema, dos *parâmetros referenciais de reatividade* para as três condições operacionais descritas no item anterior, ou pode ser feita a seleção de qualquer registro da tabela de *parâmetros referenciais de reatividade* do *REATIV* informando-se o valor de registro da data e hora do mesmo.

Como no item anterior, para exemplo e teste do sistema, foi calculada a *margem de desligamento* do reator para o desligamento ocorrido em Angra 1 às 2 hora e 30 minutos do dia 08/12/2000 do clico 9, para 300 ppm de concentração de boro no SRR e para 260 °C de temperatura mínima atingida na condição de desligado.

Na figura 5.1.4.1 foi acionado com o "mouse" o comando *Parâmetros de Reatividade para o Reator Crítico na Iminência de um Desligamento* e o ultimo valor registrado para esta condição foi carregado na tela.

Figura 5.1.4.1 - Modulo PP-R03 Cálculo da Margem de Desligamento. Tela de Seleção dos Parâmetros Referenciais de Reatividade.

O cálculo da margem de desligamento pode ser realizado para as seguintes condições, figura 5.1.4.2:

- Livre de Xenônio: Neste caso a Margem de Desligamento é válida indefinidamente, desde que não haja retirada de barras e que as Concentrações de Boro e a Temperatura permaneçam constantes ou aumentando.
- Com validade definida.

A seleção de qual condição será utilizada dependerá do tempo de retorno da usina. Se a segunda condição for selecionada o usuário deverá informar ao sistema a data e a hora da validade do cálculo.

Neste módulo o usuário deverá informar ao sistema os seguintes parâmetros: o valor da concentrações de ácido bórico e o valor da temperatura média mínima do refrigerante durante a condição de desligado do reator. O usuário também deverá selecionar se os bancos de controle estão totalmente inseridos, ou se ocorreu o evento de uma barra presa, e se os bancos de desligamento estão totalmente inseridos ou retirados.

O sistema só realizará o cálculo da *margem de desligamento* se o usuário fornecer todos os dados acima mencionados, se algum dos dados não for fornecido, quando o usuário acionar na parte inferior da tela do módulo o comando *Cálculo da Reatividade Total do Desligamento/Margem de Desligamento* aparecerão no sistema "caixas de mensagens" solicitando ao usuário fornecer os dados que faltam.

The screenshot shows the following data and controls:

- Condições Iniciais:**
 - Data e Hora do Desligamento: 06/12/2000 02:30:00
 - Livre de Xenônio: Cálculo Válido Até: [] Tempo Decorrido Após o Desligamento: []
- Condições da Usina Durante a Condição de Desligado:**
 - Concentração de Boro:** SRR: [300] pcm
 - Temperatura Mínima:** Condição de Desligado: [350]
 - Reatividade dos Produtos de Fissão:** Xenônio: [] pcm, Samário: [331.543] pcm
 - Valor Integral do Boro:** Reatividade: [2527.1] pcm
- Reatividade de Bancos de Controle:**
 - Bancos de Controle Totalmente Inseridos: Reatividade: [452.5] pcm
 - Bancos de Controle com a Barra Presa: Reatividade: [] pcm
- Reatividade dos Bancos de Desligamento:**
 - Totalmente Inseridos: Reatividade: [203.1] pcm
 - Totalmente Retirados: Reatividade: [] pcm
- Defeito de Temperatura Instável:** Reatividade: [1775.3] pcm
- Reatividade Total:** [4647.56] pcm

Right Panel (Results):

- Reatividade Anterior ao Desligamento:** Reatividade: [8277.5] pcm
- Reatividade Resonante:** Reatividade: [574.436] pcm
- Margem de Desligamento Requerida:** Reatividade: [3119] pcm
- Quantidade de Boro a Ser Adicionada: 15% de Conservatismo:** [12.5] ppm
- Concentração Final de Boro: Necessária Para Manter a Margem de Desligamento Requerida:** [301.4] ppm

Bottom Button: Cálculo: Reatividade Total devido ao Desligamento, Margem de Desligamento

Figura 5.1.4.2 - Segunda Tela do Módulo PP-R03 - Cálculo da Margem de Desligamento, Entrada de Dados e Cálculo da Margem de Desligamento.

Após a realização do cálculo da margem de desligamento com este módulo é possível emitir um relatório que é basicamente um roteiro do cálculo utilizado pelo procedimento PP-R03, Tabela 5.1.4.1.

Tabela 5.1.4.1 – Relatório Emitido pelo Módulo PP-R03 do sistema *REATIV*

Angra 1		PP-R03 Cálculo da Margem de Desligamento	
Tipo de Cálculo: Livre de Xenônio Data e Hora Desligamento: 08/12/2000 02:30 Data e Hora do Cálculo: 08/12/2001 03:16 Tempo decorrido Após o Desligamento:			<i>Referências</i>
1	Posição dos Bancos de Controle: Bancos de Controle Totalmente Inseridos	Valor dos Bancos -4.625,0 pcm	Tabela 2.4 PP-R11
2	Posição dos Bancos de Desligamento: Totalmente Inseridos:	Valor dos Bancos -3.031,0 pcm	Tabela 2.4 PP-R11
3	Concentração de Boro: 300,0 ppm	Valor Integral Boro -2.808,0 pcm	Tabela 2.2 do PP-R11 Valor Integral do Boro em Função da Conc. de Boro e da Temp. Média
4	Temperatura Mínima da Condição Desligado: 270,0 °C	Def. isot. Temperatura 1.196,3 pcm	Tabela 3.2 do PP-R11 Defeito de Temperatura Isotérmico e Função da Conc. de Boro e da Temp. Média e da Conc. de Boro
5	Concentração de Xenônio: 0,0000E00 Átomos/cm ³	Reatividade do Xenônio 0,0 pcm	Função para Cálculo do Xenônio atualizada para zero de Potência
6	Concentração de Samário: 1,7035E-08 Átomos/cm ³	Reatividade do Samário -831,5 pcm	Função para Cálculo do Samário Atualizada para zero de Potência
7	Reatividade Total do Desligamento: <i>Soma (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)</i>	-10.099,2 pcm	
8	Reatividade Anterior ao Desligamento: Atualizada em: 08/12/2000 02:30 Queima: 4,095,20MWD/TMU	-8.222,0 pcm	Reatividade Total do PP-R14
9	Margem de Desligamento Requerida: -2000 pcm se Tmed > 93 oC -1000 pcm se Tmed < 93 oC	-2.000 pcm	
10	Reatividade Remanescente: <i>Item (7 - 8 - 9)</i>	122,7 pcm	
11	OBS.: Se a reatividade do item 10 for positiva, Quantidade de Boro a ser dicionada: será necessário determinar a concentração de equivalente a esta reatividade. O valor encontrado para a concentração de boro é multiplicado por 1,15 por conservantismo.	Conc. de Boro: 15,0 ppm	Tabela 2.2 do PP-R11 Valor Integral do Boro em Função da Conc. o de Boro e da Temp. Média (função inversa)
12	Concentração Final de Boro Necessária para manter a Margem de Desligamento:	Conc. de Boro: 315,0 ppm	

5.1.5 PP-R04 - Cálculo Concentração Crítica de Boro Estimada (CCE) ou Cálculo da Posição de Bancos de Controle Crítica Estimada (PCE)

O procedimento PP-R04 – Cálculo da Posição Crítica Estimada de Bancos de Controle (PCE) ou Cálculo Concentração Crítica de Boro Estimada (CCE) é executado após um desligamento da usina visando o retorno do reator à condição crítica de modo à atender ao critério operacional de não se inserir uma quantidade de 1000 pcm de reatividade não prevista no reator. Nos cálculos da CCE devem ser fornecidos os valores da *posição dos bancos de controle* e a *temperatura média do circuito primário* para a criticalidade, nos cálculos da PCE devem ser fornecidos a *concentração de boro* e a *temperatura média do circuito primário* para a criticalidade. Estes dois cálculos se completam em uma situação de desligamento da usina.

A primeira tela do módulo PP-R04 é igual a primeira tela do módulo PP-R03, figura 5.1.4.1, onde foram selecionados os *parâmetros referenciais de reatividade* para o desligamento ocorrido em Angra 1 no dia 08/12/2000 às 02:30 horas.

Neste trabalho, para o teste do sistema em uma situação real da usina, foram refeitos os cálculos da PCE utilizando o módulo PP-R04 do sistema REATIV para a criticalidade que ocorreu no dia 08/12/2000 às 10:57 com a concentração de boro igual a 301 ppm e com a temperatura média do refrigerante em 291,7 °C, figura 5.1.5.1. Para esta condição o sistema calculou que o reator ficaria crítico com o banco de controle C em 196 e D em 88 passos. Este também determinou que a posição inserida máxima do banco D seria de 182 passos e a posição inserida mínima do banco D seria 30 passos.

Na criticalidade real ocorrida no dia 08/12/2000 às 10:57 h o reator ficou crítico com o banco de controle C em 231 e D em 105 passos portanto dentro da margem de erro permitida para este cálculo que é de +- 500 pcm. Esta diferença entre a posição teórica calculada e a posição real encontrada na criticalidade pode ser analisada através de um comando inserido no módulo que carrega uma rotina chamada *de balanço de reatividade*, figura 5.1.5.2.

Através do balanço de reatividade foi possível constatar uma diferença de 81 pcm entre o valor da reatividade dos bancos de controle real e prevista na criticalidade. Este valor está dentro da média das diferenças encontradas nos últimos desligamentos de Angra 1 que é de aproximadamente 130 pcm. A diferença encontrada entre o predito e o medido na posição dos bancos de controle que ocorreu durante a criticalização do reator pode ser explicada através dos seguintes fatores: o cálculo realizado utiliza o modelamento pontual do reator para a determinação dos valores das reatividade de todos os parâmetros envolvidos, também ocorrem variações nos parâmetros físicos do reator, tais como, a modificação no perfil axial do fluxo do reator, o valor diferencial do boro, o coeficiente de temperatura, etc. em decorrência da queima do combustível nuclear e as constantes do sistema que representam estes parâmetros podem não estar atualizadas.

Nestes trabalho também foram refeitos os cálculos da CCE, utilizando o módulo PP-R04 do sistema REATIV com a posição dos bancos A = 231 passos, B = 231, C = 231 passos e D = 105 passos e com a temperatura média do refrigerante em 291,7 °C, para a criticalidade que ocorreu no dia 08/12/2000 às 10:57, figura 5.1.5.3. Para esta condição o programa calculou que o reator ficaria crítico com a concentração de boro de 310 ppm.

Com o balanço de reatividade para o cálculo da CCE, figura 5.1.5.4, também constatou-se que a diferença entre a reatividade dos valores da concentração de boro real e prevista foi de 83 pcm, um dos fatores que também pode explicar esta diferença é a incerteza de 5 ppm na determinação da concentração de boro do primário feita pelo laboratório de análises químicas da usina.

Foi inserido no módulo PP-R04 do REATIV duas rotinas que fazem os cálculos da CCE e da PCE de dez em dez minutos a partir da data e da hora do desligamento e dispõem os resultados na forma de planilhas. Esta forma de apresentar os dados são um grande avanço em relação a forma de apresentação do programa PP-R04 do SICA, com esta metodologia não há necessidade de geração de uma nova rodada de cálculo se o tempo de retorno da usina não ocorrer no horário planejado, o que pode significar que o tempo gasto com os cálculos pode reverter em uma antecipação da criticalidade. No módulo PP-R04 do sistema REATIV também é possível emitir os relatórios que são basicamente os roteiros dos

cálculos utilizados para a determinação da PCE e da CCE no procedimento PP-R04, tabelas 5.1.4.1 e 5.1.4.2.

PP-R04 Condições Iniciais Cálculo da Conc. de Boro Crítica Estimada Cálculo da Pos. de Bancos Crítica Estimada

Data e Hora do Deslig: 08/12/2000 02:30:00

Produtos de Fissão (Atomos/cm3)
Iodo: 131Iodo Xenônio: 135Xe

Reatividade na Críticação (pcm):
Valor Integral do Boro: -2954.1
Defeito Isot. de Temp.: 61.7
Reat. do Xenônio: -1718.1
Reat. do Smário: -831.6
Valor do Banco: 796.5
Reatividade Total: -2776.4

Posição Crítica de Bancos de Controle
Banco A: 231 passos
Banco B: 231 passos
Banco C: 231 passos
Banco D: 105 passos

Posição Limites das Barras - Banco D
Posição Inserida Máxima: 182 passo
Posição Inserida Mínima: 30 passo

Balanco de Reatividade

Data Hora	Real. Produtos de Fissão	Soma Reatividades	Val. Int. Bancos	Posição dos Bancos	Pos. Limite banco D
DATA_HORA	Xenônio	Smário		BCC	BCD Máxima Mínima
08/12/2000 02:30	3827.3	-874.3	7428.0	217	89 182 30
08/12/2000 10:57	3222.1	-874.3	7428.0	217	89 182 30
08/12/2000 11:02:00	2915.5	-874.3	7428.0	217	89 182 30
08/12/2000 11:05:00	2611.1	-874.3	7428.0	217	89 182 30

Figura 5.1.5.1 - Módulo PP-R04, Cálculo da Posição Crítica Estimada (PCE) de Bancos de Controle.

Balanco de Reatividade

	Reatividade Anterior ao Desligamento	Reatividade Prevista para a Críticação	Varição da Reatividade
	(pcm)	(pcm)	Tempo (Sub-Criticalidade)
Data e Hora:	08/12/2000 02:30	08/12/2000 10:57	8 hor. 27 min.
Valor do Banco:	-2954.1	-796.5	-571.1
Defeito de Potência:	-1718.1		1718.1
Defeito Isot. de Temp.:	61.7	0.0	61.7
Reat. do Xenônio:	-1718.1	-1874.2	-1269.7
Reat. do Smário:	-831.6	-874.9	-43.3
Valor Integral do Boro:	-2954.1	-2776.4	227.7

Parâmetros Reais Encontrados na Críticação

Reatividade Real na Críticação

Varição de Reatividade (Real - Previsto)

Posição Real dos Bancos de Controle

Banco A: 231 Banco C: 231
Banco B: 231 Banco D: 105

Valor dos Bancos (pcm): -715

B. de Controle (pcm) - 81.5

Con. de Boro: ppm Temp. Primário: °C Valor Int. do Boro (pcm): Boro (pcm):

Figura 5.1.5.2 Módulo Balanco de Reatividade do PP-R04, Diferença dos Valores da Reatividade da Posição de Bancos de Controle Real e Calculada.



Figura 5.1.5.3 - Módulo PP-R04, Cálculo da Concentração de Boro Crítica Estimada (CCE).

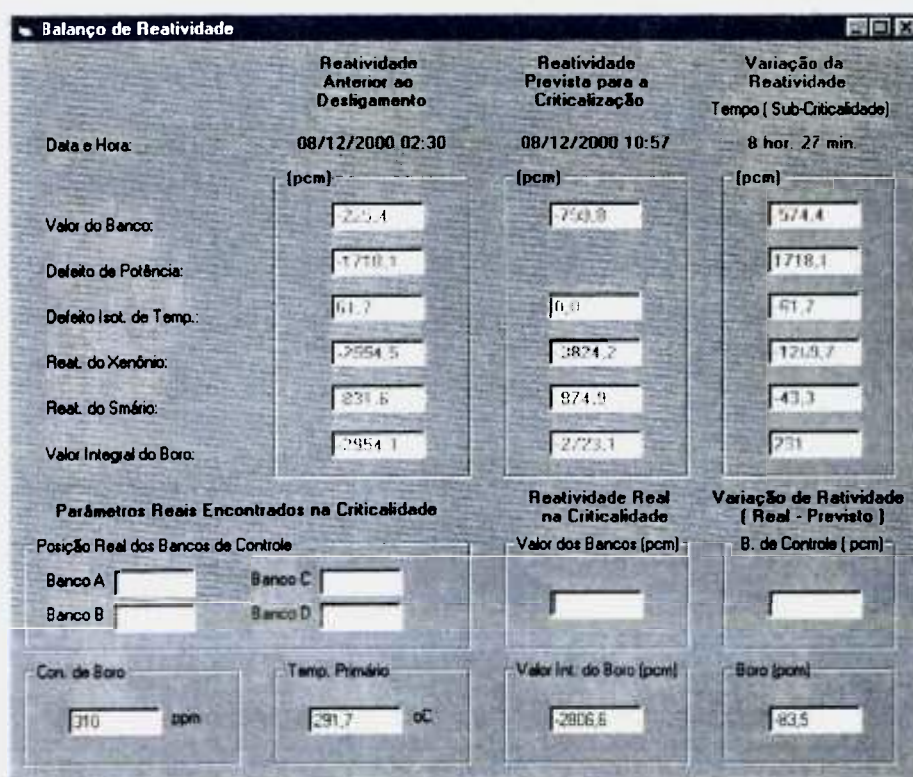


Figura 5.1.5.4 Módulo Balanço de Reatividade do PP-R04, Diferença dos Valores da Reatividade da Concentração de Boro Real e Calculada.

Tabela 5.1.5.1 - Relatório Emitido com os Cálculos da PCE do Módulo PP-R04 do sistema *REATIV*

Angra 1		PP-R04 Posição Crítica Estimada de Bancos de Controle	
Data e Hora Desligamento : 08/12/2000 02:30		Data e Hora da Criticalidade: 08/12/2000 10:57	
1	Concentração de Boro na Criticalização:	Valor Integral de Boro:	<i>Referências:</i>
	301 ppm	-2.726,4 pcm	Tabela 2.3 do PP-R11 Função da Concentração de Boro e da Temperatura Média
2	<i>Sistema de Refrigeração do Reator:</i>	Defeito de Temp. Isotérmic	Tabela 2.3 do PP-R11 Defeito de Temperatura Isotérmico em Função da Conc. de Boro e da Temperatura Média menos Defeito de Temperatura de Referência
	Temperatura Média: 291,70 oC	0,0 pcm	
3	Concentração de Xenônio:	Reatividade do Xenônio	Função para Cálculo do Xenônio Atualizada com a Potência igual a zero
	3,3464E-09 Átomos/cm ³	-3.824,2 pcm	
4	Concentração de Samário:	Reatividade do Samário	Função para Cálculo do Samário Atualizada com a Potência do reator igual a zero
	1,7925E-08 Átomos/cm ³	-874,9 pcm	
5	<i>Soma (1 + 2 + 3 + 4)</i>	-7.425,5 pcm	
6	Reatividade Anterior ao Desligamento: Atualizada em: 08/12/2000 02:30 Queima: 4.095,20MWD/TMU	-8.222,0 pcm	Reatividade Total do PP-R14
7	Reatividade a ser Compensada com Bancos <i>Item (6 - 5)</i>	Valor dos Bancos:	
		-796,5 pcm	
8	Posição Crítica dos Bancos de Controle:		Tabela 2.1 do PP-R11 Valor Integral dos Bancos de Controle em Sobreposição em Função da Posição dos Bancos e da Potência do Reator - Xenônio em Equilíbrio
	Banco A	231 passos	
	Banco B	231 passos	
	Banco C	216 passos	
	Banco D	88 passos	
9	Posição Limite das Barras	Posição do Banco D	Item 7 - 500 pcm Item 7 + 500 pcm
	<i>Valor de Banco Mínimo:</i>	<i>Inserida Máxima:</i>	
	-296,5 pcm	182 passos	
	<i>Valor de Banco Máximo:</i>	<i>Retirada Máxima:</i>	
	-1.296,5 pcm	31 passos	

Tabela 5.1.5.2 - Relatório Emitido com os Cálculos da CCE do Módulo PP-R04 do sistema REATIV

Angra 1		PP-R04 - Concentração Crítica de Boro Estimada	
Data e Hora Desligamento : 08/12/2000 02:30		Data e Hora da Criticalidade: 08/12/2000 10:57	
1	Posição dos Bancos de Controle:	Valor dos Bancos	Referências:
	Banco A 231 passos Banco B 231 passos Banco C 231 passos Banco D 105 passos	-715,0 pcm	Tabela 2.1 do PP-R11 Valor Integral dos Bancos de Controle em Sobreposição em Função da Posição dos Bancos e da Potência do Reator - Xenônio em Equilíbrio
2	Sistema de Refrigeração do Reator:	Defeito de Isot. Temp.	Tabela 2.3 do PP-R11 Defeito de Temp. Isot. em Função da Conc. de Boro e da Temp. Média menos Defeito de Temp. em Função da Conc. de Boro e da Temp. Referência
	Temperatura Média: 291,70 °C	0,0 pcm	
3	Concentração de Xenônio:	Reatividade do Xenônio	Função para Cálculo do Xenônio Atualizada Através do Histórico de Potência
	3,3464E-09 Átomos/cm ³	-3.824,2 pcm	
4	Concentração de Samário:	Reatividade do Xenônio	Função para Cálculo do Samário Atualizada Através do Histórico de Potência
	1,7925E-08 Átomos/cm ³	-874,9 pcm	
5	Soma (1 + 2 + 3 + 4)	-5.414,1 pcm	-
6	Reatividade Anterior ao Desligamento: Atualizada em: 08/12/2000 02:30 Queima: 4.095,20 MWD/TMU	-8.222,0 pcm	Reatividade Total do PP-R14
7	Reat. à ser Compensada com Boro: Item (6 - 5)	-2.807,9 pcm	-
8	Concentração de Boro na Criticalização:	310,1 ppm	Tabela 2.3 do PP-R11 Função Inversa do Valor Integral de Boro e da Temperatura Média
9	Posição Limite dos Bancos:	Posição do Banco D	Item 1 - 500 pcm Item 1 + 500 pcm
	Valor de Banco Máximo:	Inserida Máxima :	
	-215,0 pcm	192 passos	
	Valor de Banco Mínimo:	Retirada Máxima:	
	-1.215,0 pcm	40 passos	

5.1.6 PI-R07 Cálculo da Anomalia de Reatividade

Neste módulo do sistema foi automatizado o procedimento PI-R07 - Anomalia de Reatividade. Através deste procedimento é realizada uma comparação mensal entre a concentração de boro na condição Quente à Plena Potência (QPP) e a concentração de boro prevista no PP-R11 - Livro de Dados do Reator. A diferença entre essas concentrações, expressa em reatividade, é denominada *Anomalia de Reatividade*. Neste módulo são utilizados como dados de entrada para o cálculo da anomalia de reatividade os *parâmetros referêncius de reatividade* gravados no banco de dados do REATIV para as seguintes condições, figura 5.1.6.1:

- (1) Reator crítico quando este operou por pelo menos 72 horas com a potência estável.
- (2) Reator crítico na iminência de um desligamento, operando com a potência estável há pelo menos 72 horas.

Figura 6.1.6.1 Módulo PI-R07 onde São Selecionados os Parâmetros Referenciais de Reatividade.

Após a seleção do registro dos *parâmetros referenciais de reatividade* o sistema calcula automaticamente a anomalia de reatividade, Figura 5.1.6.2.

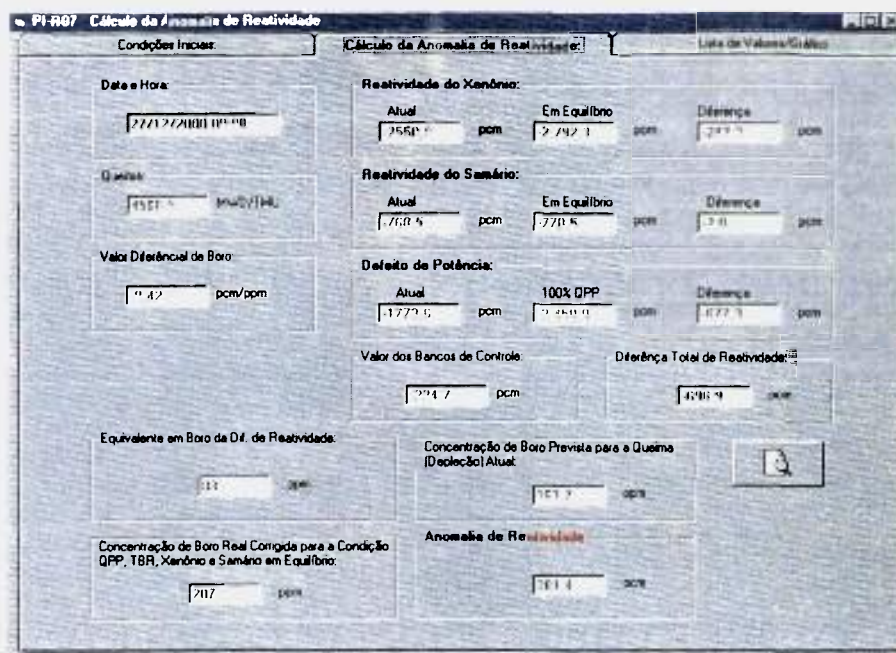


Figura 6.1.6.2 - Módulo PI-R07 – Cálculo da Anomalia de Reatividade

O sistema armazena em uma tabela do banco de dados do *REATIV* todos os cálculos de *anomalia de reatividade* realizados com o sistema, também é possível observar em formato de planilha ou de gráfico o resultado dos cálculos, figura 6.1.6.3.

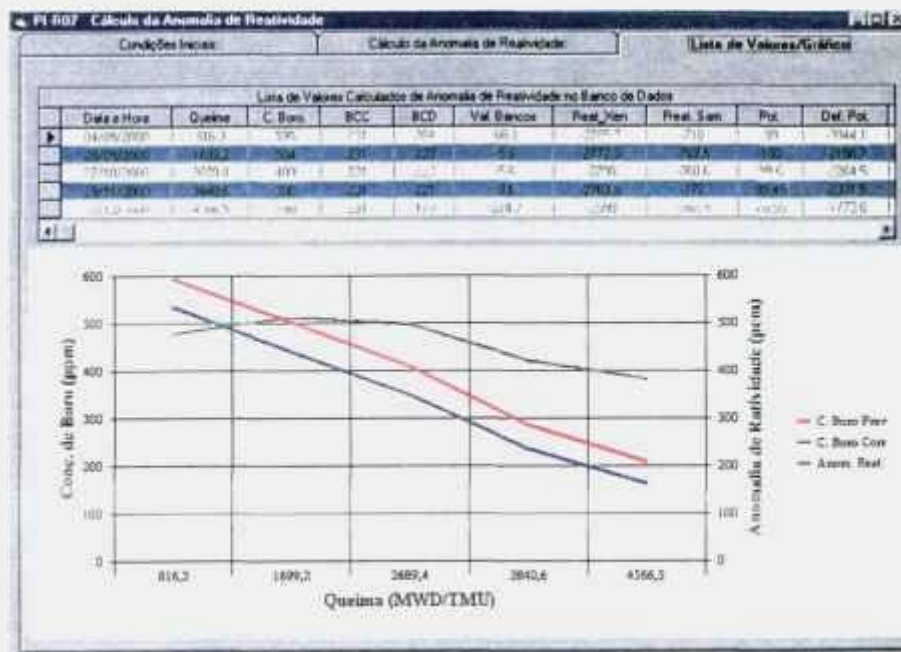


Figura 6.1.6.3 – Planilha e Gráfico dos Resultados dos Cálculos de Anomalia de Reatividade.

Este módulo também emite um relatório que é basicamente um roteiro do cálculo realizado pelo procedimento PI-R07 – Anomalia de Reatividade, Tabela 6.1.6.1.

Tabela 6.1.6.1– Relatório Emitido pelo Módulo PI-R07.

ANGRA 1		PI-R07 Cálculo da Anomalia de Reatividade	
Data e Hora: 27/12/2000 00:00			Referências:
1	Concentração Atual de Boro:	290,0 ppm	
2	Queima (Depleção) atual do Ciclo:	4566,5 MWD/TMU	
3	Valor Diferencial do Boro para a Queima do Item 2:	-8,42 pcm/ppm	Figura 2.6 PP-R11
4	Posição dos Bancos de Controle: □ BCC: 231,00 passos □ BCD: 179,00 passos	Valor Int. dos Bancos de Controle:	Tabela 2.1 PP-R11
		-224,7 pcm	
5	Reatividade do Xenônio para o Momento do Cálculo:	-2.550,0 pcm	PP-R14
6	Reatividade do Samário para o Momento do Cálculo:	-768,5 pcm	PP-R14
7	Potência do Reator: 70,55 %	Reatividade do Defeito de Potência:	Figura 2.3 PP-R11
		-1.773,6 pcm	
8	Reatividade do Xenônio em Equilíbrio em 100% QPP:	-2.792,3 pcm	Figura 4.1 PP-R11
9	Reatividade do Samário em Equilíbrio em 100% QPP:	-770,5 pcm	Figura 4.5 PP-R11
10	Reatividade do Defeito de Potência em 100% de Potência:	-2.450,9 pcm	Figura 3.2 PP-R11
11	Diferença Total de Reatividade	-696,9 pcm	
	<i>Item: (8 - 5) + (9 - 6) + (10 - 7) - 4</i>		
12	Equivalente em Boro da Diferença de Reatividade:	83,0 ppm	
	<i>Item: 12/3</i>		
13	Concentração de Boro Real Corrigida para a Condição QPP, TBR, Xenônio e Samário em Equilíbrio:	207,0 ppm	
	<i>Item: (1 - 12)</i>		
14	Concentração de Boro Prevista para a Queima (Depleção) Atual:	161,7 ppm	Figura 5.1 PP-R11 Normalizada Conforme Item 16.4.8.4 Especificações Técnicas
15	Anomalia de Reatividade:	381,4 pcm	
	<i>Item: (13 - 14) * 3</i>		
16	Resultado da Aplicação do Critério de Aceitação (Menor que 1000 pcm)	Aceitável	Item 16.4.8.3 Especificações Técnicas

5.2 Acompanhamento da Queima do Combustível Nuclear e Procedimentos de Supervisão (“Surveillance”)

Nesse módulo do sistema foram desenvolvidos as funções e os procedimentos que fazem o acompanhamento da queima do combustível nuclear para um determinado ciclo de funcionamento da usina, a partir dos registros que estão armazenados na tabela do histórico diário da queima do combustível nuclear do banco de dados do REATIV.

Na figura 5.2.1 é possível verificar o valor da queima diária e total do combustível em MWD/TMU, a quantidade de dias efetivos à plena potência (DEPP) que o reator operou, a energia térmica produzida e o total do combustível consumido no ciclo. Também é possível determinar a data para o final do ciclo para diversos patamares de potência (término do ciclo) e fazer um *planejamento de carga*, determinando assim, a quantidade de combustível consumido entre duas datas em que o reator operar com um determinado patamar de potência elétrica. O sistema emite um relatório com estes dados.

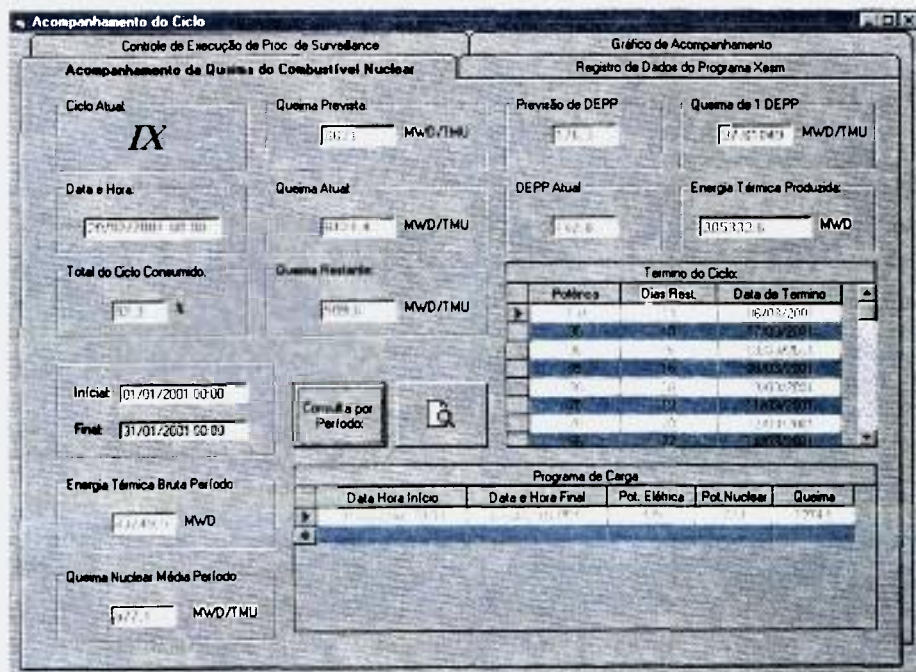


Figura 5.2.1 – Módulo do Sistema REATIV que faz o Acompanhamento da Quantidade de Combustível Nuclear Consumido em Angra I.

Os seguintes procedimentos operacionais de Angra 1 têm o objetivo de garantir que a distribuição de potência no núcleo do reator esteja sempre dentro do limite estabelecido pelas especificações técnicas: PI-R02 - Assimetria Axial de Fluxo, PI-R03 - Fator de Canal Quente para Fluxo Térmico (F_Q^1), PI-R04 - Fator de canal Quente para Entalpia Nuclear ($F_{\Delta H}^N$), PI-R09 - Determinação das Correntes de Calibração dos Detetores de Potência. Estes procedimentos são chamados de procedimentos de supervisão ou "Surveillance".

Nestes procedimentos são utilizados os sinais de corrente dos detetores internos, que fazem uma varredura do fluxo de nêutrons, onde os valores de corrente encontrados são gravados em um arquivo de computador, seguindo-se então a execução do programa "INCORE" onde são obtidos os parâmetros requisitados nos procedimentos acima descritos. Estes procedimentos devem ser executados a cada mês efetivo a plena potência, com exceção PI-R09 que deve ser executado a cada 3 meses efetivos a plena potência. Neste módulo foi desenvolvido, com a utilização de planilhas, uma rotina para determinação da data em que deverá ser executado cada procedimento, levando-se em consideração a queima da última data de execução do procedimento, a queima atual em DEPP e o patamar de potência previsto para o funcionamento do reator. Os procedimentos acima listados podem ser executados dentro do prazo de aproximadamente 7 dias da data prevista.

The screenshot shows the 'Acompanhamento do Ciclo' (Cycle Monitoring) module. It features a header with 'Acompanhamento da Queima do Combustível Nuclear' and 'Registro de Dados do Programa Xerox'. Below this, there are sections for 'Controle de Execução de Proc. de Surveillance' and 'Gráfico de Acompanhamento'. The main area contains three tables, each with columns for 'Executado', 'DEPP', 'Data de Execução', 'Potência', 'DEPP', 'Data Prevista', 'Data Mínima', and 'Data Máxima'.

PI-R02 Assimetria Axial de Fluxo							
Controle de Execução				Previsão de Execução			
Executado	DEPP	Data de Execução	Potência	DEPP	Data Prevista	Data Mínima	Data Máxima
<input type="checkbox"/>					01/10/2000		
<input type="checkbox"/>					30/10/2000		
<input type="checkbox"/>					29/11/2000		30/12/2000
<input type="checkbox"/>					10/01/2001		

PI-R03 Fator de Canal Quente para Fluxo Térmico PI-R04 Fator de Canal Quente para Entalpia Nuclear							
Controle de Execução				Previsão de Execução			
Executado	DEPP	Data de Execução	Potência	DEPP	Data Prevista	Data Mínima	Data Máxima
<input type="checkbox"/>					16/09/2000		
<input type="checkbox"/>					01/10/2000		
<input type="checkbox"/>					26/10/2000		31/11/2000
<input type="checkbox"/>					29/11/2000		
<input type="checkbox"/>					10/01/2001		

PI-R09 Determinação da Corrente de Calibração dos detetores de Faixa de Potência							
Controle de Execução				Previsão de Execução			
Executado	DEPP	Data de Execução	Potência	DEPP	Data Prevista	Data Mínima	Data Máxima
<input type="checkbox"/>					11/11/2002		
<input type="checkbox"/>					08/04/2001		

Figura 5.2.2 – Módulo do Sistema REATIV que faz o Controle de Execução dos Procedimentos de "Surveillance".

5.3 Acompanhamento das Oscilações de Xenônio

Em algumas situações operacionais de um reator tipo PWR/WESTINGHOUSE é necessária a atuação do operador do Reator para o amortecimento das oscilações de Xenônio. Atualmente em Angra 1 o único meio de se acompanhar e planejar uma estratégia para o controle de uma oscilação de Xenônio é através da interface do SICA 2.0 selecionando as variações de ΔI para cada canal da faixa de potência, figura 3.3.2 .

Quando o procedimento PI-R09 – Determinação da Corrente de Calibração dos Detetores da Faixa de Potência é executado, para a determinação da relação entre os desvios axiais do sistema de detetores internos (INCORE) e dos detetores da faixa de potência (EXCORE), uma oscilação de Xenônio é induzida. Durante o procedimento de 4 a 6 mapeamentos do fluxo de nêutrons são executados varrendo uma ampla faixa de ΔI . Logo após o término dos mapeamentos a oscilação de Xenônio é amortecida pela técnica do “bang-bang”.

Para fornecer uma ferramenta operacional que auxilie os operadores do reator quando for necessário o controle de uma oscilação de Xenônio foi desenvolvido o módulo TRIAX ANGRA 1 - Acompanhamento das Oscilações de Xenônio no sistema REATIV utilizando a metodologia TRIAX. Esta metodologia atualmente é comercializada pela - Mitsubishi Heavy Industries (MHI) do Japão. Com o desenvolvimento deste módulo foi realizado um estudo para avaliar as proposições apresentadas nos itens 4.1 e 4.2 utilizando dados reais de operação do mês de setembro de 2000 em Angra 1.

Os seguintes sinais provenientes da instrumentação são consultados no banco de dados do SICA 2.0 pelo módulo TRIAX ANGRA 1:

- (1) DATA e HORA (Em um único registro)
- (2) N41S, N42S, N43S e N44S: correspondendo aos sinais dos detetores superiores da faixa de potência, em volts.

- (3) N41I, N42I, N43I e N44I: correspondendo aos sinais dos detetores inferiores da faixa de potência, em volts.
- (4) TMRM07: correspondendo à média dos sinais de potência nuclear em %.
- (5) BCD: Posição do Banco de Controle D, em unidades de passos retirados.

Estes sinais são processados pelo módulo TRIAX ANGRA 1 do seguinte modo:

- $MEDIA_NS = (N41S+N42S+N43S+N44S)/4$:Média dos Sinais Provenientes dos Detetores Externos da Parte Superior do Núcleo em Volts)
- $MEDIA_NI = (N41I+N42I+N43I+N44I)/4$:Média dos Sinais Provenientes dos Detetores Externos da Parte Inferior do Núcleo em Volts)
- $K = TMRM07*2 / (MEDIA_NS + MEDIA_NI)$:Constante de Transformação dos Sinais da Faixa de potência de volts para % da potência nuclear do reator
- $POT_SUP = MEDIA_NS*K$:Potência Nuclear em % na Parte Superior do Núcleo)
- $POT_INF = MEDIA_NI*K$:Potência Nuclear em % na Parte Inferior do Núcleo
- $AOP = (POT_SUP - POT_INF) / (POT_SUP + POT_INF)*100$:“Axial Offset de Potência”

Os dados acima relacionados são registrados a cada minuto em uma tabela do banco

de dados do REATIV chamada de TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS. Neste trabalho esta tabela recebeu os dados operacionais válidos de Angra 1 para o mês de setembro do ano 2000, quando o reator operou praticamente o tempo todo em 100% de potência nominal. Os valores com a DATA e HORA, POT_SUP, POT_INF, AOP e a posição do banco de controle D foram armazenados para cada minuto formando um total de 39609 registros, Tabela 5.3.1.

Tabela 5.3.1		TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS - Valores dos Sinais Processados da Instrumentação, para o Mês de Setembro de 2000, Armazenados em uma Tabela do banco de dados do REATIV (Esquema da Tabela)			
DATA_HORA	POT_SUP	POT_INF	AOP	BCD	
01/09/00 00:00:00	96,999	100,237	-1,641	205	
01/09/00 00:01:00	96,821	100,145	-1,687	205	
01/09/00 00:02:00	97,119	100,388	-1,655	205	
.....	
.....	
.....	
29/09/00 23:57:00	94,757	97,614	-1,485	214	
29/09/00 23:58:00	94,854	97,667	-1,461	214	
29/09/00 23:59:00	94,600	97,440	-1,479	214	

No sistema REATIV foram desenvolvidas as seguintes funções em *Visual Basic*:

- **I_EQUI(P)** - determina a concentração de *Iodo* em átomos/cm³ para o equilíbrio de Iodo com o reator operando com uma determinada potência nuclear, esta função foi desenvolvida fazendo o termo da derivada da equação (21) de decaimento do Iodo igual a zero.
- **Xe_EQUI(P)** - determina a concentração de *Xenônio* em átomos/cm³ para o equilíbrio da Xenônio para o reator operando com uma determinada potência nuclear, esta função foi desenvolvida fazendo o termo da derivada da equação (22) de decaimento do Xenônio igual a zero.

- **AO_I** (I_{SUP} , I_{INF}) – determina o “Axial Offset de Iodo” (AO_I) conhecendo-se a concentração de Iodo da parte superior e inferior do núcleo. Esta função foi desenvolvida a partir da equação (58).
- **AO_Xe** (Xe_{SUP} , Xe_{INF}) – determina o “ Axial Offset de Xenônio” (AO_{Xe}) conhecendo-se a concentração de Xenônio da parte superior e inferior do núcleo. Esta função foi desenvolvida a partir da equação (59).

Neste trabalho os dados da tabela **TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS** foram processados no módulo **TRIAX ANGRA 1** do sistema **REATIV** para avaliar a metodologia **TRIAX**, figura 5.3.2. No início do processamento considerou-se que o reator estava em equilíbrio e o primeiro registro da tabela **TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS** referente data e hora de 01/09/2000 00:00 foi carregado na tela preenchendo os seguintes campos do módulo **TRIAX ANGRA 1**: Potência Nuclear Média na Parte Superior do Núcleo, Potência Nuclear Média na Parte Inferior do Núcleo, “ Axial Offset de Potência” e Posição dos bancos de controle D.

Simultaneamente foram calculados, utilizando as funções acima descritas, os valores das concentrações de Iodo e Xenônio na parte superior e inferior do núcleo, o “Axial Offset de Iodo” (AO_I), o “Axial Offset de Xenônio” (AO_{Xe}), ($AOP - AO_{Xe}$) e ($AOP - AO_I$). Pela metodologia **TRIAX** quando o reator está em equilíbrio os três valores de “Axial Offset” são iguais, como pode ser observado no módulo **TRIAX ANGRA 1**, figura 5.3.1.

Os dados da tabela **TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS** foram processados pelo módulo **TRIAX ANGRA 1** utilizando as seguintes funções: **I** (I_o , P , t), **Xe** (Xe_o , I_o , P , t), **AO_I**(I_{SUP} , I_{INF}) e **AO_Xe** (XE_{SUP} , XE_{INF}). Sendo conhecido as concentração iniciais de Iodo e Xenônio na parte superior e inferior do núcleo, utilizando a diferença de tempo (t) entre data e hora de dois registros consecutivos e os valores da potência nuclear na parte superior e inferior do núcleo, o resultado do processamento atualizou os dados de uma tabela chamada de **TRIAX_AXIAL_OFFSET** no banco de dados do **REATIV**, com 39608 registros, tabela 5.3.2.

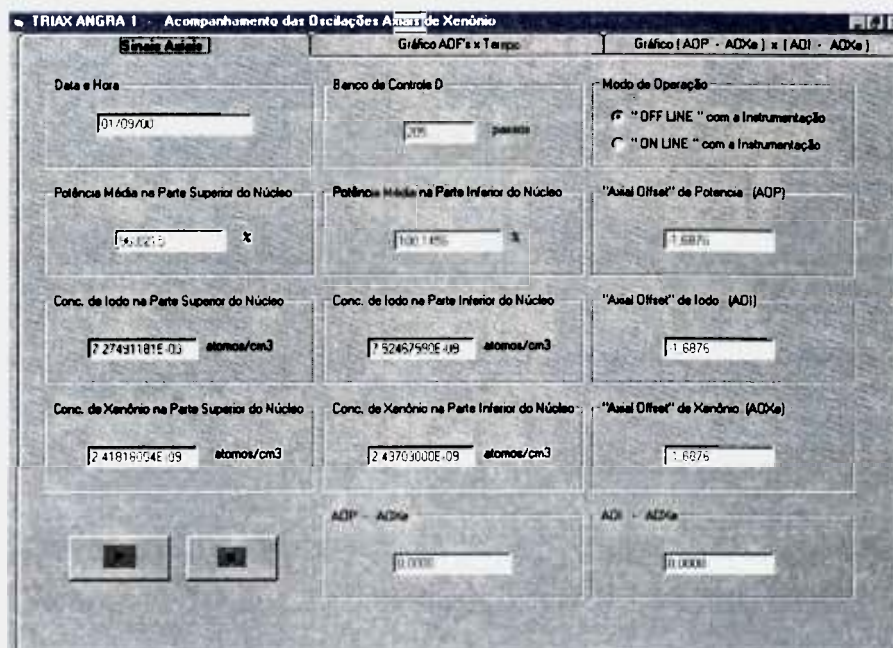


Figura 5.3.1 – Módulo TRIAX ANGRA 1. Calcula e Grava na Tabela TRIAX_AXIAL_OFFSET do Banco de Dados do REATIV as Concentrações de Iodo e Xenônio na Parte Superior e Inferior do Núcleo, AO_I, AO_{Xe}, (AOP – AO_{Xe}) e (AO_I – AO_{Xe}).

Tabela 5.3.2		TRIAX_AXIAL_OFFSET - Valores das Concentração de Iodo e Xenônio na parte Superior e Inferior do núcleo e Valores de AO _I e AO _{Xe} , calculados pelo módulo TRIAX ANGRA 1 do sistema REATIV				
DATA_HORA	I SUP	I INF	AO I	Xe SUP	Xe INF	AO Xe
01/09/2000 00:01	7,2749E-09	7,5246E-09	-1,6876	2,4181E-09	2,4370E-09	-1,6876
01/09/2000 00:02	7,2749E-09	7,5247E-09	-1,6875	2,4181E-09	2,4370E-09	-1,6885
01/09/2000 00:03	7,2749E-09	7,5247E-09	-1,6874	2,4181E-09	2,4369E-09	-1,6894
01/09/2000 00:04	7,2749E-09	7,5247E-09	-1,6874	2,4181E-09	2,4369E-09	-1,6895
.....
.....
.....
29/09/2000 23:56	7,2393E-09	7,3738E-09	-0,9211	2,4369E-09	2,4550E-09	-1,6382
29/09/2000 23:57	7,2391E-09	7,3737E-09	-0,9221	2,4370E-09	2,4549E-09	-1,6240
29/09/2000 23:58	7,2389E-09	7,3737E-09	-0,9230	2,4370E-09	2,4548E-09	-1,6114
29/09/2000 23:59	7,2387E-09	7,3736E-09	-0,9239	2,4371E-09	2,4547E-09	-1,5981

Se o módulo TRIAX ANGRA 1 estiver operando com a opção “ “ON LINE” com a instrumentação ” os registros nas tabelas TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS e TRIAX_AXIAL_OFFSET são atualizadas automaticamente pelo processamento dos sinais da instrumentação oriundos de uma consulta feita ao banco de dados do SICA 2.0 a cada minuto, caso o modulo esteja operando na opção “ “OFF LINE” com a instrumentação ” este módulo é utilizado para analisar os dados que estão armazenados nas tabelas do banco de dados do REATIV.

5.3.1 Estudo do Método Direto para o Controle Ótimo das Oscilações de Xenônio

Com a primeira interface gráfica do módulo TRIAX ANGRA 1 é possível acompanhar as variações do AOI, AOXe, AOP e a posição do banco de controle D para determinado intervalo de tempo selecionado pelo usuário, utilizando os dados das tabelas TRIAX_DADOS_OPERACIONAIS e TRIAX_AXIAL_OFFSET. Pode-se observar pela figura 5.3.2 as variações dos sinais de AO_I, AO_{Xe} e AO_P para as seguintes sequências de movimentação de banco de controle D e variações de ΔI (equivalente à AO_P) que ocorreram entre dias 22 e 24 do mês de setembro de 2000, quando foi realizado do teste periódico PI-R09:

- (a,b) O banco de controle D foi inserido para a redução da potência nuclear de 100% para 90%, o que é exigido para a realização do procedimento PI-R09. Pela figura 5.3.2 é possível observar que a partir deste instante ocorreu um aumento no valor do AO_P e uma oscilação de Xenônio foi introduzida como pode ser observado pelos sinais de AOI e AOXe. O aumento no valor de ΔI foi provocado pela diminuição na temperatura média refrigerante devido a redução da potência nuclear, pelo fato do coeficiente de temperatura do moderador ser negativo a mudança na reatividade foi maior na parte superior do núcleo que na parte inferior do núcleo, devido a uma maior redução da temperatura na parte superior do núcleo. Como consequência a distribuição de potência sofreu um deslocamento em direção a parte superior do núcleo reduzindo a concentração de Xenônio nesta região.

- (c,d) O banco de controle D foi inserido para fazer com que o valor de ΔI fosse direcionado novamente para o seu valor alvo. A introdução do banco de controle foi contrabalançada pela diluição do Ácido Bórico.
- (e,f) O banco de controle D foi ligeiramente retirado para manter o valor de ΔI no seu valor alvo enquanto foi realizado o primeiro mapeamento do fluxo de nêutrons com ΔI igual à -0,5.
- (g,h) O banco de controle D foi inserido para fazer com que o valor de ΔI se desviasse para um valor mais negativo. Dois mapeamentos do fluxo do nêutrons foram realizados quando os valores de ΔI eram iguais a -2,5 e -4,8 respectivamente.
- (h,i) O banco de controle D foi retirado para fazer com que o valor de ΔI se desvie para um valor mais positivo.
- (i,j) O banco de controle D foi mantido em uma posição constante enquanto o valor de ΔI tendia para um valor mais positivo. Dois mapeamentos do fluxo do nêutrons realizados quando os valores de ΔI eram iguais a 3,2 e 4,7 respectivamente.
- (j,k) O banco de controle D foi inserido para fazer com que o valor de ΔI fosse direcionado para o seu valor alvo. O valor da diferença (E) entre o valor de ΔI no início da movimentação do banco de controle D e o valor alvo foi registrado. Sendo este o início da movimentação dos bancos de controle para o amortecimento da oscilação de Xenônio pela técnica do “bang-bang”.
- (k,l) O banco de controle D foi mantido em uma posição constante enquanto o valor de ΔI tendia para um valor mais negativo.

- (l,m) Quando a diferença entre o valor de ΔI negativo e o valor alvo alcançou em módulo um valor igual a (E) os bancos de controle foram retirados para fazer com que o valor de ΔI fosse direcionado novamente para o valor alvo.
- (m,n) Como o valor de ΔI ainda apresentava uma tendência a aumentar o banco de controle D foi aos poucos sendo inserido até que o valor de ΔI ficasse constante.

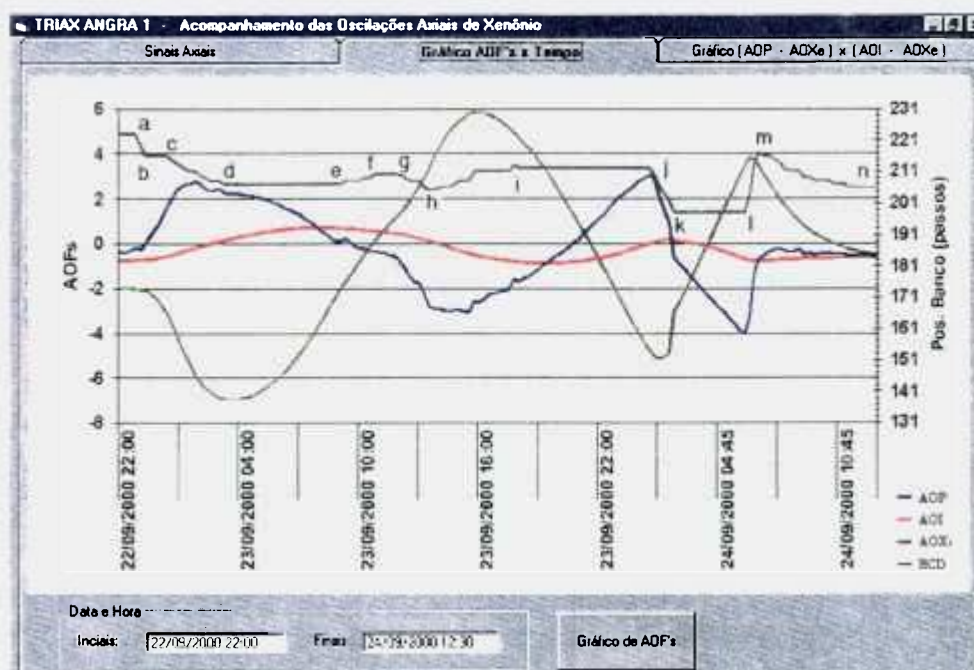


Figura 5.3.2 - Gráfico do Transiente dos Três Sinais de “Axial Offset” do Banco D, Durante a Redução de Potência e o Teste PI-R09, a Oscilação de Xenônio Suprimida pela Técnica do “Bang-Bang”.

Pode-se notar que pelos perfis das curvas da figura 5.3.2 que o transiente dos três sinais de “Axial Offset” da foi semelhante aos formatos das curvas encontrados no gráfico da figura 4.1.1 e que quando o valor de ΔI se estabilizou no final do teste o valor dos três valores de “Axial Offset” tornaram-se praticamente iguais.

A figura 5.3.3 mostra que no final do mês de setembro de 2000 o controle da oscilação de Xenônio era realizado pela técnica de Amortecimento à Meio Ciclo quando a amplitude da oscilação começou a aumentar.

A sequencia de movimentação (a,b) feita neste período não foi suficiente para reverter a tendência do ΔI direcionar-se para um valor mais positivo.

Pode-se observar pelo comportamento da curva dos três sinais de “axial offset” que a oscilação de Xenônio tornou-se divergente. Esta oscilação foi amortecida posteriormente sem que o valor de ΔI tenha se desviado mais do que o valor permitido de $\pm 5\%$ do *valor alvo*.

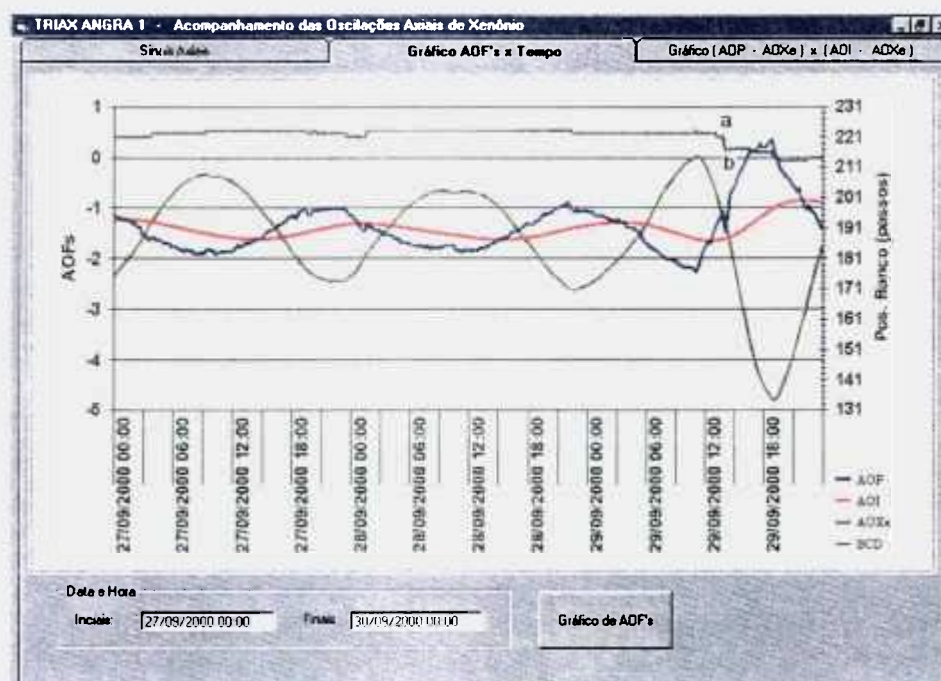


Figura 5.3.3 – Gráfico do Transiente dos Três Sinais de “Axial Offset” e do Banco de Controle D, Durante o Controle da Oscilação de Xenônio pela Técnica de Amortecimento à Meio Ciclo.

5.3.2 Estudo do Procedimento Guia Contínuo para o Controle de Oscilações de Xenônio

Com a segunda interface gráfica do módulo TRIAX ANGRA 1 é possível verificar o perfil da curva (AOP – AOXe) versus (AOI – AOXe) , em um plano X -Y. Neste trabalho a curva característica (AOP – AOXe) versus (AOI – AOXe) da Oscilação de Xenônio foi chamada de gráfico de SHIMAZU, figuras 5.3.4 e 5.3.5.

Observa-se pela curva do gráfico de SHIMAZU na figura 5.3.4, da Oscilação de Xenônio, o comportamento anti-horário em forma de espiral que se torna cada vez maior, como destacado na parte teórica deste trabalho.

Também foi verificado que uma inserção de um passo do banco de controle D faz a curva do gráfico se mover em uma direção paralela ao eixo, X negativa, sequência (a,b) de movimentação de bancos de controle, figura 5.3.3. Também é possível observar que uma elipse completa é formada durante um ciclo de Oscilação de Xenônio.

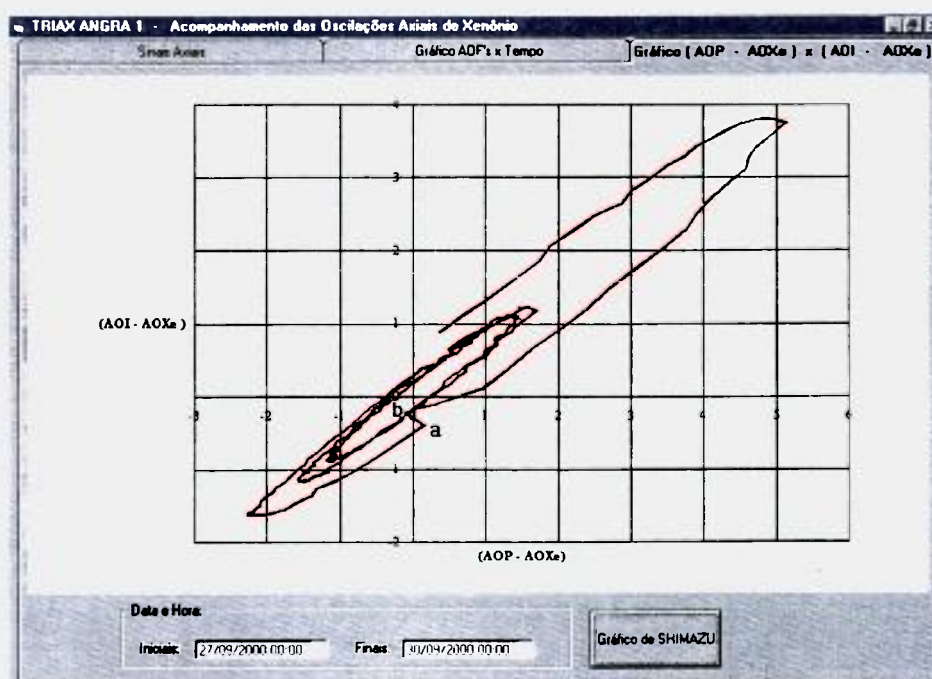
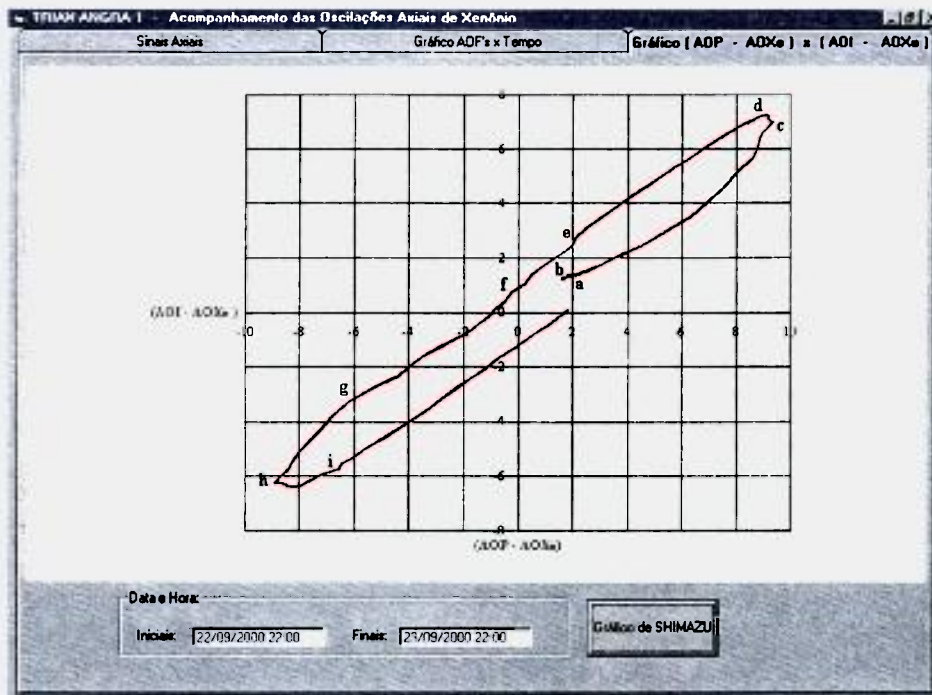
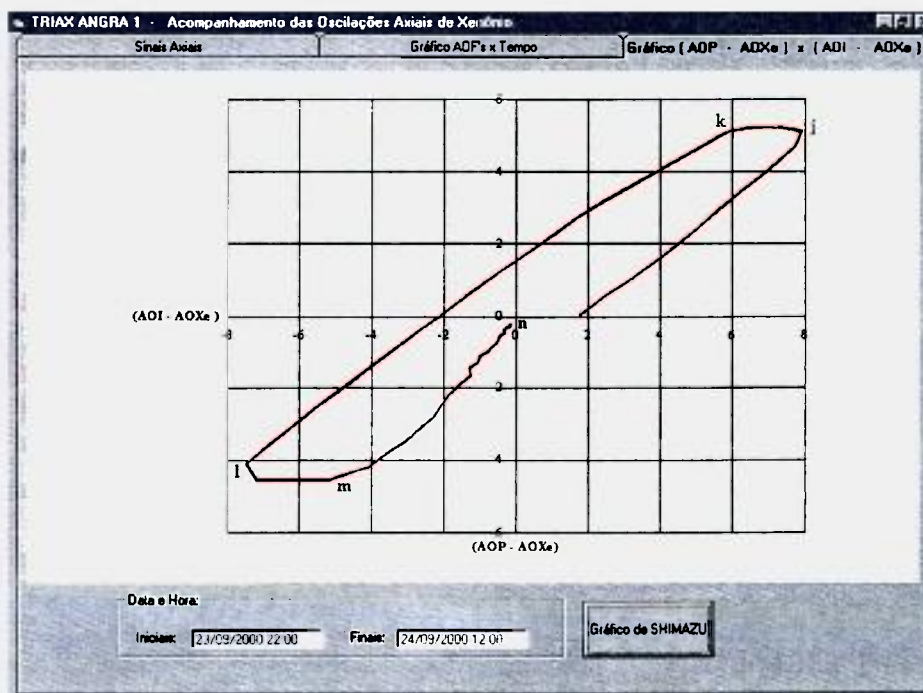


Figura 5.3.4 – Curva (AOp – AOXe , AOI – AOXe), Gráfico de SHIMAZU, durante o controle da Oscilação de Xenônio pela Técnica de Amortecimento à Meio Ciclo.

A figura 5.3.5 mostra o gráfico de SHIMAZU para o período em que se realizou a redução de potência e o procedimento PI-R09. Este gráfico mostra que quando o valor de ΔI foi estabilizado no seu valor alvo a curva dirigiu-se para o centro e a Oscilação de Xenônio foi suprimida.



a)



b)

Figura 5.3.5 – Curva $(AOP - AOX_e)$ versus $(AOI - AOX_e)$, Gráfico de SHIMAZU durante a Redução de Carga e a Realização do Teste PI-R 09.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O sistema computacional desenvolvido possibilitou, através de uma interface gráfica, uma interação eficiente entre o sistema de aquisição de dados da instrumentação, o banco de dados do sistema e o usuário. Com isto houve uma agilização nos métodos de aquisição de dados, reprodução, cálculo, análise dos resultados, automatização de procedimentos e atualização de parâmetros no banco de dados, de todos os fatores que afetam a reatividade do reator e a queima do combustível na usina nuclear de Angra 1.

Uma inovação introduzida no programa foi a atualização de constantes através de planilhas no módulo Livro de Dados do Reator e no módulo XESM. A partir destas rotinas as constantes geradas pelo código ANC e as seções de choque geradas pelo código LEOPARD podem ser atualizadas rapidamente no banco de dados do sistema e consultadas em qualquer situação, para correções e testes, através das funções desenvolvidas no sistema.

Com o desenvolvimento dos módulos PP-R14, PP-R03 e PP-R04 o tempo necessário para a realização dos cálculos e análise dos resultados, da primeira rodada de cálculos necessários para: garantir a *margem de desligamento* ou para se determinar a concentração de boro ou a posição dos bancos para a criticalidade, foi reduzido de 30 para pouco menos de 5 minutos. O programa não necessita ser reinicializado a cada nova rodada de cálculo, então os cálculos relativos aos procedimento acima citados podem ser executados de modo integrado e repetidas vezes, possibilitando desta forma:

- Minimizar o tempo para a ressincronização da Usina.
- Minimizar a geração e processamento de rejeitos líquidos decorrentes de diluições e borações.
- Otimizar a ascensão de potência, procurando para isso criticalizar o reator na posição de bancos de controle esperada.

- Minimizar a probabilidade de não atingir a criticalidade mesmo com as barras totalmente retiradas.

Através do cálculo automatizado da *Anomalia de Reatividade* a curva de *concentração de boro versus a queima do combustível* pode ser atualizada diariamente, o que pode auxiliar no planejamento da carga elétrica que será fornecida para a rede de distribuição, principalmente no final de um ciclo de operação, determinando a quantidade de combustível restante.

Se a atualização dos valores da concentração de boro for diária no REATIV, o banco de dados do sistema poderá ser utilizado como o histórico dos parâmetros operacionais da usina, que estão relacionados com a reatividade, para um determinado ciclo de operação.

As funções que calculam as reatividades do Xenônio e do Samário desenvolvidas neste trabalho, com as seções de choque normalizadas obtidas do projeto do núcleo de Angra 2 e com os demais parâmetros calculados, foram utilizadas nos últimos desligamentos de Angra 2, nos cálculos que determinaram a quantidade água que foi adicionada no primário para se obter a criticalização, com resultados bastante satisfatórios. Recomenda-se que o módulo *Acompanhamento dos Parâmetros de Reatividade do Reator*, desenvolvido no REATIV, seja adaptado para Angra 2.

Os estudos feitos com módulo TRIAX ANGRA 1 do sistema REATIV mostrou que o comportamento das curvas dos três sinais de "Axial Offset" aplicadas em Angra 1, através de suas duas interfaces gráficas, estão de acordo com o comportamento teórico esperado. Portanto pode-se considerar que as equações, metodologias e o sistema apresentados neste trabalho são válidos para o acompanhamento das Oscilações de Xenônio em Angra 1.

Através do Procedimento Guia para o Controle da Oscilação de Xenônio a informação necessária para determinar a direção e o total da barra de controle à ser movimentada é apresentado continuamente na tela do computador e o efeito da operação

de controle também pode ser checado simultaneamente. Isto ajudará ao operador do reator acompanhar os resultados de suas ações no controle de uma oscilação de Xenônio.

Através da utilização do módulo do TRIAX ANGRA 1 o *valor alvo* de ΔI poderá ser determinado quando os três valores de “Axial Offset” forem iguais, para um determinado patamar de potência nuclear.

O módulo TRIAX ANGRA 1 poderá ser uma ferramenta útil para a visualização e o controle rápido e efetivo das Oscilações de Xenônio evitando que o valor de ΔI saia da faixa permitida de $\pm 5\%$ do *valor alvo* e que a potência do reator tenha que ser reduzida para cumprir as penalidades previstas nas especificações técnicas, aumentando assim a disponibilidade de geração da usina.

7 REFERÊNCIAS

1. KLATT, R. D. ; LEGGETT III, W. D. ; EISENHART L. D., **Follow - A Code Providing a Standard Reactivity Follow Procedure by Calculating Effective Critical Boron Concentrations as a Function of Burnup**, Westinghouse Electric Corporation, November 1972.
2. ARAUJO SILVA, R.; ZIMMERMANN, E., **Development of an Integrated Computer System for Angra-1 Nuclear Power Plant. Proceedings of the Conference on Man-Machine Interface in the Nuclear Industry**, 215-223, Tokyo 1988.
3. SENRA MARTINEZ, A.; SCHIRRU, R.; DUTRA THOME, Z. **Improving Safety Parameter Display System for Normal Operation. Proceedings of the Conference on Man-Machine Interface in the Nuclear Industry**. 391-399, Tokyo , 1988.
4. SENRA MARTINEZ, A.; SEIXAS DE OLIVEIRA, L. F.; SCHIRRU, R. ; DUTRA THOME, Z. **A New Concept of Safety Parameter Display System. Proceedings of the Seminar on Nuclear Engineering**. 407-418, Mexico City , 1986,.
5. **BEACON™**. Westinghouse Electric Corporation, Engineering Service and Technology (S & T) Catalogue Summary/Benefits Descriptions, pg. 15.
6. **GARDEL**. Studsvik™Scandpower, 2nd SSP Online Core Monitoring Users Meeting, Nov 2000, Madrid, Spain.
7. **ANC - Multi -Dimencional Nodal Code for Nuclear Core Design Calculations.**, 1987-1993.
8. PONCELET, C. G. **The Historian Code**. WCAP, Dec., 1961.
9. BRANDES, D. Jr. **Metodologia de Cálculo do Programa XESM**. Nota Técnica NT- DIES.O 002/98 – Eletrobrás Termonuclear S.A. , Abril de 1999.

10. **FERNANDES, V. B.; PONZONI, P. F. Qualificação dos Procedimentos de Cálculo de Seções de Choque, Distribuição de Potência e Concentrações Críticas de Boro em Função da Depleção do Núcleo.** Nota Técnica NT-A1013.96 (NT-830) DECS.N/DEN.N – Furnas Centrais Elétricas S.A. , Julho 1996.
11. **VALDERLEI, B. F.; IPOJUCA, T.; FREIRE, J. S. Cálculos Físicos do Reator Relatório de recarga de Angra 1 - Ciclo 9,** GCN.C023.2000, Eletrobrás Termonuclear S. A.
12. **PP-R11 - Livro de Dados do Reator.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
13. **BARRY, R. F. Leopard – A Spectrum Dependent non-Spatial Depletion Code for the IBM – 7094.** Westinghouse Electric Corporation , Sep. 1963.
14. **PP-R14 - Parâmetros Referenciais de Reatividade.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
15. **PP-R03 - Cálculo da Margem de Desligamento.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
16. **PP-R04 - Determinação de Posição de Barras e Concentração de Boro para a Criticalidade.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
17. **PI-R07 – Anomalia de Reatividade.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
18. **Standard Technical Specifications.** Westinghouse Plants, NUREG – 1431, Vol.2
19. **STRAWBRIDGE, L. E.; ALLARD, E. C.; BHALLA, C. P. Xenon Induced Core Instabilities.** Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania, WCAP-3269-48, Feb. 1965.

20. DECCÓ, C. C. G. **Análise Temporal das Oscilações espaciais de Xenônio em Reatores de Pequeno Porte.** dissertação de mestrado, IPEN, 1997.
21. **PWR Axial Xenon Oscillation,** Nuclear Fuel Service Special Report, Dec. 1988.
22. SHIMAZU, Y.; KANAGAWA, T. **Optimal Control of Xenon Oscillation in PWRs Based On Simple On-Line Data Processing.** Proc. Int. Conf. On Physics of Reactor; Operation, Design and Computation, Marseille, France, April, 1990.
23. SHIMAZU, Y. **Direct Method of Search for Optimal Xenon Oscillation Control Based on New Concept of Axial Offsets.** Journal of Nuclear Science and Technology, 29[10], pg. 966 à 971, Oct. 1992.
24. YASUI, H. **Mitsubishi Heavy Industries – LTD.** Contato pessoal.
25. SHIMAZU, Y. **Continuous Guidance Procedure for Xenon Oscillation Control.** Journal of Nuclear Science and Technology, 23[2], pg.95 à 100, Feb. 1995.
26. GLASTONE, S.; SESONSKE, A. , **Nuclear Reactor Engineering.** Van Nostrand Reinhold Company Regional Offices, pg. 153 à 156, 1967.
27. **ANSI/ANS - Reload Startup Physics Test for Pressurized Water Reactor.** 19.6.1, 1997
28. **Plant Information Manual - Westinghouse Nuclear Training Operations.** WNTO pg. I-5.36 à I-5.43.
29. SACCO, W. **Curso Avançado de Físico de Reatores - Modulo 1.** FUJB, pg. 54 à 61, set. 1998.
30. **Plant Information Manual - Westinghouse Nuclear Training Operations.** WNTO, pg. I-5.2 à I-5.25

31. **Precautions, Limitations and Setpoints for Nuclear Steam Supply Systems (PLS).** Eletrobrás Termonuclear S.A., Revision 8, May 1995.
32. LAMARSCH, J. R. **Nuclear Reactor Theory.** Addison-Wesley publishing Company, pg. 246 à 353 Sep. 1972 .
33. DUDERSTADT, J. J. ; HAMILTON L. J. **Nuclear Reactor Analysis.** John Wiley & Sons Inc., pg. 398 à 413 , 1976.
34. **Final Safety Analysis Report (FISAR).** Chapter 4, pg. 4.3-8 à 4.3-28, Mar 1991.
35. **PP-R13 – Gráfico 1/M Durante a Criticalização do Reator.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
36. **Final Safety Analysis Report (FISAR).** Chapter 15, pg. 15.1-8 à 15.1-10, Mar 1991.
37. **PP-R22– Determinação Especial da Potência Térmica do Reator.** Manual de Operação da Usina, Eletrobrás Termonuclear S.A.
38. PONZONI, P. F. **Curso Avançado de Física de Reatores - Modulo 2.** FUJB, pg. 39 à 48, set. 1998.
39. ONEGA, R.J. **An Axial Xenon Oscillation Model - Annals of Nuclear Energy.** UK, 25(1), pg. 13 à 19, 1978.
40. DUDERSTADT, J. J. ; HAMILTON L. J. **Nuclear Reactor Analysis.** John Wiley & Sons Inc., pg. 567 à 580 , 1976.
41. POTROUTSOS, E. **Dominando o Visual Basic 5.** Makron Books, 1998
42. GUTIERRES, M. A. **Visual Basic 5 for Windows 95/NT Database Know-How.** Axel Books do Brasil Editora, 1998.