AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Desenvolvimento e aplicação de reatímetro digital subcrítico

Cesar Augusto Domingues Loureiro

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear - Reatores

Orientador:
Prof. Dr. Adimir dos Santos

São Paulo
2011

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Desenvolvimento e aplicação de reatímetro digital subcrítico

Cesar Augusto Domingues Loureiro

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

Orientador:

Prof. Dr. Adimir dos Santos

SÃO PAULO

2011

Dedico este trabalho ao meu pai Luiz Carlos (*In memoriam*), à minha mãe Orlanda, e aos meus irmãos William Ricardo e Luiz Renato, que sempre me apoiaram, e me fizeram ter autoconfiança para seguir em frente, mesmo nos caminhos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Adimir dos Santos, pela valiosa orientação, pelo companheirismo, pelos ensinamentos em geral. Por não me deixar desanimar, devido à confiança em mim depositada, e ao grande encorajamento sempre presente em nossas conversas, sem o qual este trabalho não teria sido realizado.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e ao Centro de Engenharia Nuclear, pela disponibilização de infra-estrutura, e do reator IPEN/MB-01, seus laboratórios e materiais.

Ao Dr. Ricardo Diniz, pelos ensinamentos, sugestões, discussões, incentivos, e todo apoio para a realização de experimentos no reator IPEN/MB-01.

Ao Dr. Ulysses D'utra Bitelli, pelos incentivos frequentes, ensinamentos e por se por sempre à disposição e fazer com que suas lições permanecessem além de suas aulas.

Aos operadores do Reator IPEN/MB-01, em especial ao físico Rogério Jerez, por todo o apoio, tanto na operação do reator, quanto nas sugestões relativas aos experimentos.

Aos pesquisadores e funcionários do Centro de Engenharia Nuclear, em especial aos Dr. Hélio Yoriyaz, Dr. Paulo de Tarso D. Siqueira, Dr. Antônio Teixeira, pelas indispensáveis aulas ministradas durante o período inicial deste trabalho.

Aos meus amigos MSc Gregório Soares de Souza, MSc Gabriel Fonseca e MSc Paula Antunes, por serem, cada um à sua maneira, companheiros em momentos difíceis, desde a graduação, ajudando pessoal e tecnicamente e principalmente me incentivando a não desistir jamais deste trabalho.

Aos meus amigos Arthur Santiago, Leonardo Perez, Rodrigo Muller, Juliana Rodrigues, Thiago Barroso, Juliana Dias, Christopher Smith, Carlos Kawai por estarem presentes em diversos momentos, e serem sempre incentivadores.

À Karla Brum, essa pessoa especial, que foi uma companheira fantástica e um ombro amigo indispensável em momentos de intensa agonia, onde uma conversa, um desabafo, era mais do que necessário.

Aos colegas alunos do Centro de Engenharia Nuclear, em especial ao Thiago Carluccio, Pedro Rossi, Felipe Cintra, Felipe Massicano, Douglas Borges, Luís Mura, Talita Salles, Rodrigo Salemi, e a todos os alunos que passaram pelo CEN durante esse tempo, pelo companheirismo, e troca de experiências.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Desenvolvimento e Aplicação de Reatímetro Digital Subcrítico

Cesar Augusto Domingues Loureiro

RESUMO

Em testes físicos de reatores que são realizados na criticalização, após uma troca de combustível, por exemplo, como ocorre nos reatores PWR, é muito importante monitorar continuamente a reatividade durante o processo de criticalização. Medir a reatividade utilizando o método da Cinética Inversa é um processo bastante utilizado durante a operação de um reator nuclear, e é possível determinar a reatividade em tempo real baseado nas equações de cinética pontual. Essa técnica é aplicada com sucesso a altas potências, ou em núcleos que trabalham sem a existência de uma fonte externa, já que nesse caso o Termo Fonte na equação de cinética pontual pode ser desprezado. Para operações a baixas potências, a contribuição da fonte de nêutrons precisa ser levada em consideração, e isso implica em conhecer um valor proporcional à intensidade da fonte e, portanto esse valor precisa ser determinado. O Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa (Least Square Inverse Kinetics Method – LSIKM) foi testado com modelo teórico e aplicado em experimentos no Reator Nuclear IPEN/MB-01 para a determinação do Termo Fonte com a utilização de um reatímetro que ignora o Termo Fonte em primeira instância. Após a determinação da Fonte S de forma consistente, seu valor foi inserido ao algoritmo de Cinética Inversa, e utilizando dados de detectores durante a criticalização, o reatímetro com Termo Fonte foi usado para medir a reatividade no domínio subcrítico, nos passos de criticalização, após experimento.

Development and Application of a Subcritical Digital Reactivity Meter

Cesar Augusto Domingues Loureiro

ABSTRACT

In Physical tests which are made during the approach process, after a fuel change, as an example, like those that occur in PWR reactors, monitoring the level of subcritical condition continuously is very important. Measuring reactivity by inverse kinetics method is a process widely used during a nuclear reactor operation, and it is possible to determine reactivity on line, based on the point kinetics equations. This method is applied successfully when the reactor works without an external neutron source, or while the reactor is in the critical domain, because in these cases, the source term in point kinetics equations might be neglected. However, when the power is too low, the source contribution is not negligible and must be taken into account, and this need imply a knowledge of a value proportional to the source intensity, and so this value must be determined. The LSIKM (Least Square Inverse Kinetics Method) has been tested in a theoretical model and applied experimentally in the IPEN/MB Nuclear Reactor facility for the determination of the source term, by using a reactivity meter neglecting the source term in first instance. After the determination of the value proportional to the source contribution, this value has been inserted into the algorithm of inverse kinetics, and using neutron detector data during the approach to critical process, the reactivity meter with source term was used to determinate the reactivity in the subcritical domain, after the experiment performing.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1. Fissão Nuclear	4
2.2. Ciclo de Nêutrons e Fator de Multiplicação	4
2.3. Reatividade	9
2.4. O Método da Cinética Inversa	9
2.5. Multiplicação Inversa	17
3. OBJETIVOS.....	21
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa (LSIKM)	22
4.2. Validação numérica	27
4.2.1. Equação inhour	28
4.3. Experimentos	32
4.3.1. Experimentos de Queda de Barras	34
4.3.2. Previsão de Criticalidade	35
4.4. Modelagens com código MCNP-5	37
4.4.1. Modelagem de queda de barras.....	37
4.4.2. Modelagem de criticalização em passos	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39

5.1.	Validação Numérica para o LSIKM.....	39
5.2.	Experimentos	42
5.2.1.	Experimentos de queda de barras	43
5.2.2.	Previsão de Criticalidade.....	69
5.3.	Modelagens com o Código MCNP-5	72
5.3.1.	Simulação de queda de barras.....	72
5.3.2.	Simulação de Criticalização	73
5.4.	Comparações	74
6.	CONCLUSÕES	78
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
	ANEXO A – Reator IPEN/MB-01.....	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reação nuclear de fissão de Urânio por nêutrons térmicos auto-sustentada.....	8
Figura 2 - Comportamento da reatividade em função do tempo, medida com o algoritmo de Cinética Inversa, desconsiderando o Termo Fonte, após a queda dos bancos absorvedores.	14
Figura 3 - Comparativo entre a reatividade medida com e sem o Termo Fonte no algoritmo de Cinética Inversa após a queda dos bancos absorvedores.	16
Figura 4 - Posicionamento dos detectores dos canais nucleares de partida 1 e 2 na periferia do núcleo do Reator IPEN/MB-01.	19
Figura 5 - Ajuste por LSIKM com a utilização da Equação 21.	24
Figura 6 - Ajuste pela Equação 27 para a determinação da reatividade e fonte por meio do LSIKM. O ajuste é iniciado quando o comportamento do gráfico é linear.	26
Figura 7 - Esquema da Equação inhour mostrando sete raízes para reatividade positiva e negativa.	29
Figura 8 - Configuração padrão do núcleo do reator IPEN/MB-01.....	33
Figura 9 - Diagrama esquemático das varetas combustível e de controle do Reator IPEN/MB-01 [3]	34
Figura 10 - Previsão de criticalidade pela curva 1/M utilizando as contagens do canal nuclear 2 do Reator IPEN/MB-01.	36

Figura 11 - Ajuste de função com uso da Equação 27, a partir de dados teóricos que simulam fluxo de nêutrons no reator	41
Figura 12 - Posicionamento dos bancos absorvedores e dos detectores de nêutrons no núcleo do reator IPEN/MB-01.	44
Figura 13 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir de dados de detector modo pulso de BF_3 sem a utilização do filtro passa baixa.	46
Figura 14 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir de dados de detector modo pulso de BF_3 com a utilização do filtro passa baixa.	47
Figura 15 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.	48
Figura 16 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.	48
Figura 17 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.	49
Figura 18 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.	49
Figura 19 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de BF_3 sem a utilização do filtro passa baixa.	50

Figura 20 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de BF_3 com a utilização do filtro passa baixa.	51
Figura 21 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.	51
Figura 22 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.	52
Figura 23- Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.	52
Figura 24 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.	53
Figura 25 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector de He_3 sem a utilização do filtro passa baixa. ...	54
Figura 26 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector de He_3 com a utilização do filtro passa baixa. ...	54
Figura 27 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.	55
Figura 28 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.	55

Figura 29 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.	56
Figura 30 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.	56
Figura 31 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de He_3 sem a utilização do filtro passa baixa.	57
Figura 32 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de He_3 com a utilização do filtro passa baixa.	58
Figura 33 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.	58
Figura 34 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.	59
Figura 35 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.	59
Figura 36 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.	60
Figura 37 - Reatividade calculada durante a criticalização. Verifica-se um comportamento estável da reatividade em função do posicionamento dos Bancos de Controle e da potência.	71

Figura 38 - Ajuste médio de reatividade do Banco de Controle.	75
Figura 39 - Ajuste médio de reatividade do Banco de Segurança.	76
Figura 40 - Comparação dos valores determinados para reatividade durante a criticalização pelo MCNP e experimentalmente pelo reatímetro.	77
Figura 41 – Vista aérea do Reator Nuclear IPEN/MB-01.	82
Figura 42 - Vista superior do Núcleo do Reator IPEN/MB-01.	84
Figura 43 - Diagrama esquemático das varetas combustíveis e de controle	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precursores de Nêutrons atrasados.....	11
Tabela 2 - Parâmetros Cinéticos do Reator IPEN/MB-01.	11
Tabela 3 - Raízes da Equação inhour para reatividade de -3000 pcm.	40
Tabela 4 - Valores obtidos pelo LSIKM para dados simulados de variação de fluxo utilizado para validação do método.....	42
Tabela 5 - Dados obtidos para Fonte S e para reatividade com os detectores experimentais.....	61
Tabela 6 - Valores da Fonte S e da Reatividade dos Bancos de Controle e Segurança determinados pelos detectores dos canais 5 e 6.....	62
Tabela 7 – Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os detectores experimentais utilizando os limites superiores dos parâmetros cinéticos ($\beta+\sigma\beta$; $\lambda+\sigma\lambda$).	65
Tabela 8 - Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os canais 5 e 6, utilizando os limites superiores dos parâmetros cinéticos ($\beta+\sigma\beta$; $\lambda+\sigma\lambda$).	65
Tabela 9 – Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os detectores experimentais, utilizando os limites inferiores dos parâmetros cinéticos ($\beta-\sigma\beta$; $\lambda-\sigma\lambda$).	66

Tabela 10 - Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os canais 5 e 6, utilizando os limites inferiores dos parâmetros cinéticos (β - $\sigma\beta$; λ - $\sigma\lambda$).....	66
Tabela 11 - Reatividade dos Bancos e fonte S utilizando a biblioteca JENDL e os detectores experimentais.	68
Tabela 12 - Reatividade dos Bancos e fonte S utilizando a biblioteca JENDL e os canais 5 e 6.....	68
Tabela 13 - Valores obtidos de k-efetivo para Banco de Controle 1 e Banco de Segurança 2.....	72
Tabela 14 - Valores de Reatividade obtidos pela simulação pelo Código MCNP-4C para diversas posições do Banco de Controle 1.	74
Tabela 15 - Dados Geométricos da Vareta de Controle do Reator IPEN/MB-01 ..	86
Tabela 16 - Dados Geométricos da Vareta Combustível do Reator IPEN/MB-01.	86
Tabela 17 - Composição Isotópica da Vareta Combustível do Reator IPEN/MB-01.	87
Tabela 18 - Composição isotópica da Vareta de Controle do reator IPEN/MB-01.	87

1. INTRODUÇÃO

Os Reatores Nucleares a cada dia ganham espaço na sociedade, seja para a produção de energia elétrica, no caso dos reatores de potência, ou para atividades acadêmicas, de pesquisa e de produção de radioisótopos para a indústria e medicina, no caso dos reatores de pesquisa.

O Brasil possui três usinas nucleares geradoras de energia elétrica. São elas as Usinas Nucleares Angra I, Angra II e Angra III (em construção), que operam com reatores de potência refrigerados a água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactors), e produzem energia elétrica para uso geral, sendo que a energia elétrica gerada pelas usinas Angra I e Angra II correspondem a cerca de 50% da energia consumida no estado do Rio de Janeiro.

Além das usinas nucleares, o Brasil possui outros quatro reatores, destinados a pesquisas acadêmicas e produção de radioisótopos.

Um desses reatores é o reator Argonauta, situado no Instituto de Energia Nuclear – IEN, na cidade do Rio de Janeiro, onde são realizadas diversas pesquisas envolvendo nêutrons nas áreas de física de reatores e física nuclear. Além disso, nesse reator há a produção de radioisótopos, entre eles o $^{56}_{25}\text{Mn}$, $^{140}_{57}\text{La}$, $^{75}_{34}\text{Se}$ e o $^{82}_{35}\text{Br}$, para serem utilizados em pesquisas do meio ambiente e industriais [1]. Há também o reator TRIGA IPR-R1, situado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, na cidade de Belo Horizonte, onde são realizadas também pesquisas na área de neutrônica [2]

No Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, operam dois reatores nucleares de pesquisa, sendo:

- Reator IEA-R1, que é um reator do tipo piscina, que opera à potência máxima de 5MW, onde são produzidos radioisótopos para uso em medicina nuclear, e para uso como traçadores para processos industriais. São também

produzidas fontes radioativas para gamagrafia industrial, e irradiadas amostras para análises multielementares. E ainda, o reator IEA-R1 é utilizado para pesquisas diversas na área de Física de Reatores e Física Nuclear [3].

-Reator IPEN/MB-01, que é um reator de potência zero, do tipo tanque, onde são realizadas diversas pesquisas na área de física de reatores. Esse reator permite simular em escala reduzida todas as características nucleares de um reator de grande porte, com o benefício de não necessitar de um sistema complexo de remoção de calor [3].

A necessidade de utilização dos reatores nucleares exige que se tenham boas condições de operação dos mesmos, uma vez que os materiais utilizados, como o combustível, por exemplo, podem causar sérios danos se mal manuseados. Assim, a operação de um reator nuclear é bastante delicada, e por isso pesquisas continuam sendo feitas para a melhoria dessas condições.

Controlar um reator significa manusear com segurança o sistema a fim de se obter um resultado desejado, e por isso é importante que se tenha boa perspectiva dos parâmetros envolvidos no reator. Um desses parâmetros é a reatividade, que pode ser descrita como *“grandeza que descreve o desvio percentual da criticalidade que um reator apresenta.”* [4].

Vários são os fatores que alteram a reatividade de um reator nuclear, por exemplo, a temperatura de operação e o consumo do combustível nuclear. Esses fatores podem variar durante uma operação, o que consequentemente irá influenciar na variação da reatividade. Por isso, para que se tenha um controle preciso e adequado da reatividade, é importante monitorá-la continuamente durante a operação.

Para controlar a reatividade do reator, é necessário controlar a variação do fluxo de nêutrons no núcleo, uma vez que a reatividade descreve esse fenômeno. Se o número de nêutrons aumenta em função do tempo, têm-se reatividade positiva, enquanto a reatividade será negativa se o fluxo de nêutrons no núcleo sofre diminuição em função do tempo.

O controle da reatividade se faz pela inserção de reatividade positiva, para aumento da potência, ou negativa, para diminuição da potência. A maneira

mais utilizada para essas ações consiste em retirar ou introduzir um conjunto composto por um material absorvedor de nêutrons, o que chamamos de barra de controle, embora nem sempre esses conjuntos tenham o formato de barras.

O fluxo de nêutrons no núcleo do reator pode ser monitorado por um ou mais detectores de nêutrons, instalados na região central e/ou na periferia do núcleo. Esses detectores estão conectados a um sistema eletrônico, que por sua vez converte o sinal dos detectores em sinal elétrico. Esse sinal elétrico é então enviado a um computador onde há um programa capaz de determinar a reatividade por meio de cálculos matemáticos que podem descrever o comportamento da reatividade em função dos sinais captados pelos detectores.

No início da era nuclear, a criticalização dos reatores era feita por métodos indiretos. Utilizava-se o tempo de dobramento como principal forma de monitorar a reatividade e com isso se conhecer o estado do reator. Essa técnica, apesar de eficiente, é bastante rudimentar, pois depende diretamente da atuação do operador, tanto para a observação da variação no fluxo de nêutrons, como para a medição de tempo com o uso de um cronômetro. Isso causa grandes incertezas e alta demanda de tempo para a criticalização.

Hoje em dia, os reatímetros têm o objetivo de determinar a reatividade em tempo real, e apresentar a previsão de criticalidade do reator, o que agiliza o processo e facilita a monitoração.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.Fissão Nuclear

Dentre as reações que ocorrem no núcleo de um reator nuclear, a principal, responsável pela auto-sustentabilidade do sistema é a fissão nuclear.

Na fissão nuclear, um nêutron incidente é absorvido pelo núcleo pesado, formando um núcleo composto excitado a uma energia acima da energia crítica necessária para que ocorra a fissão, e por isso o núcleo é dividido em dois grandes fragmentos. Além disso, alguns nêutrons são emitidos nesse processo, bem como uma quantidade de energia em forma de radiação gama [5].

Um exemplo típico de uma reação de fissão é mostrado a seguir:

A energia gama liberada, mais a energia cinética dos nêutrons liberados e dos produtos de fissão podem ser aproveitadas, e no caso dos reatores nucleares de fissão em cadeia, os nêutrons liberados são aproveitados para manter a cadeia auto-sustentada.

2.2.Ciclo de Nêutrons e Fator de Multiplicação

Para que um reator nuclear possa operar em regime auto-sustentável, ou seja, a reação de fissão em cadeia é auto sustentada, é preciso que exatamente um nêutron seja produzido por fissão, que poderá então induzir uma nova fissão. Isso quer dizer que uma fissão precisa levar a outra e neste caso o número de fissões por unidade de tempo será constante [6].

Entretanto, há variáveis que podem interferir na população de nêutrons no núcleo do reator. As interações do nêutron com a matéria podem ocorrer logo

após sua geração na fissão, podendo o nêutron ser absorvido por algum dos materiais presentes no sistema, ou ainda escapar do núcleo sem interagir.

Resumidamente, pode-se dizer que a população de nêutrons no núcleo de um sistema de fissão em cadeia se comporta da seguinte forma:

$$\text{Acumulação} = \text{produção} - \text{absorção} - \text{escape}$$

Quando a acumulação de nêutrons é nula, ou seja, a população de nêutrons é estável, diz-se que o reator está Crítico. Essa condição pode acontecer a qualquer taxa de fissão, ou nível de potência, desde que a produção e perda de nêutrons sejam iguais.

O sistema é considerado Supercrítico quando a produção de nêutrons é maior que a perda, sendo que neste caso há um aumento na potência e Subcrítico na situação oposta, quando há diminuição da potência.

A relação entre a produção e a perda de nêutrons é chamada de *fator de multiplicação*. Esse fator descreve a tendência em que se encontra a população de nêutrons, e é dado por:

$$k = \frac{\text{produção de nêutrons}}{\text{perda de nêutrons}}$$

onde as perdas consideradas são tanto devido às absorções quanto ao escape. Com isso, o valor de k descreverá o estado do reator como:

$k=1$ — Reator Crítico

$k<1$ — Reator Subcrítico

$k>1$ — Reator Supercrítico

Em um reator térmico, que utiliza $^{235}_{92}\text{U}$ como combustível, o balanço neutrônico pode ser descrito da seguinte forma:

A partir da fissão de um núcleo de $^{235}_{92}\text{U}$, ocasionada por um nêutron térmico, uma quantidade ν de nêutrons rápidos é emitida. Uma fração ϵ de nêutrons rápidos pode causar fissão ao interagir com núcleos de $^{238}_{92}\text{U}$, além de uma fração menor no $^{235}_{92}\text{U}$, e por isso essa grandeza é chamada de fração de

fissão rápida. Dessa forma, $\nu \epsilon$ nêutrons difundem-se no reator, entre o combustível, moderador e materiais estruturais. Uma parcela L_{FT} desses nêutrons escapa ainda antes de ser moderada, e outra parcela p pode ser capturada pelo $^{238}_{92}\text{U}$ e formar o $^{239}_{92}\text{U}$, que em seguida decairá para o $^{239}_{93}\text{Np}$, e depois para o $^{239}_{94}\text{Pu}$, e essa grandeza é chamada de probabilidade de escape da ressonância.

Após a moderação, alguns nêutrons podem escapar do sistema, sendo essa parcela l_t . Então, dos nêutrons que são moderados e não escapam, uma fração f , chamada de fração de utilização térmica, é absorvida pelo urânio, sendo que agora temos um balanço de nêutrons equivalente a $\nu \epsilon (1-l_t) p (1-l_t) f$. Entretanto, nem todos os nêutrons absorvidos pelo urânio provocam fissões, uma vez que mesmo os nêutrons térmicos podem ser absorvidos pelo $^{238}_{92}\text{U}$, resultando no $^{239}_{94}\text{Pu}$, conforme acontece com os nêutrons rápidos. Por isso, a fração de nêutrons térmicos absorvidos pelo urânio e que causa fissão será determinada pela razão entre as seções de choque de fissão e absorção de nêutrons térmicos no urânio, ou seja, σ_f / σ_a . Por simplicidade, teremos o produto $\nu (\sigma_f / \sigma_a)$ chamado de η .

Portanto, devido a essas perdas, o fator de multiplicação pode ser escrito como fator de multiplicação efetivo, e expresso como

$$K_{\text{eff}} = \eta \epsilon p f (1 - l_f) (1 - l_t)$$

onde:

η - Representa o número de nêutrons produzido na fissão por nêutron térmico absorvido no Urânio

ϵ – Fator de fissão rápida

p – Probabilidade de escape da ressonância

f – Utilização Térmica - Fração de nêutrons térmicos absorvidos pelo Urânio

l_t – Fração de nêutrons que escapam do reator antes de serem moderados e são perdidos

l_t – Fração de nêutrons que escapam do sistema mesmo após serem moderados e são perdidos

Na Figura 1 é apresentado um esquema que representa um ciclo descrevendo o balanço neutrônico de uma reação em cadeia auto-sustentada de fissão de núcleos de Urânio [4].

2.3.Reatividade

O conceito de reatividade deve ser tratado com relevante cuidado, uma vez que esse é um parâmetro de suma importância no controle do reator.

A reatividade descreve o desvio relativo do fator de multiplicação k de sua unidade [7]. Em outras palavras, a reatividade representa o quanto diferente da unidade está o fator de multiplicação k sendo a criticalidade considerada a situação de estabilidade do fluxo de nêutrons no núcleo do reator, e $k=1$. Essa relação é apresentada na Equação 1.

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad (1)$$

A reatividade (ρ) depende de diversos fatores, como o tamanho do reator, a densidade e quantidade dos materiais contidos no sistema, assim como suas seções de choque para fissão, absorção, espalhamento, entre outros. Alguns desses fatores, como densidade e seção de choque são afetados pela alteração de outros fatores presentes no reator, como pressão e temperatura. Dessa forma, a reatividade depende também do histórico de potência do reator, ou seja, o estado de criticalidade num momento de medida depende do momento anterior [7].

A reatividade é uma grandeza adimensional, por se tratar de um desvio relativo. É comum a utilização de algumas unidades atribuídas à reatividade, como o Dólar (\$), que equivale à reatividade de 0,0065 e o pcm, que representa uma parte por cem mil. A unidade de pcm é comumente utilizada, sendo que 1 pcm equivale à reatividade de 1×10^{-5} .

2.4.O Método da Cinética Inversa

Um dos métodos mais utilizados para a determinação da reatividade é o Método da Cinética Inversa, que parte das equações de cinética pontual.

As equações de cinética pontual são apresentadas a seguir: [7], [8], [9]

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (2)$$

e

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (3)$$

onde:

- $n(t)$ é o número total de nêutrons no núcleo do reator no instante (t) ;

- $C_i(t)$ é a concentração de precursores de nêutrons atrasados para cada grupo de nêutrons atrasados i , no instante (t) ;

- S é o valor da fonte externa, que é considerado constante ao longo do tempo;

- Λ é o tempo de geração de nêutrons prontos;

- ρ é a reatividade a ser determinada;

- β_i e λ_i são a fração de precursores de nêutrons atrasados e a constante de decaimento para cada grupo i ;

- $\beta_{eff} = \sum_{i=1}^6 \beta_i$ é a fração efetiva de nêutrons atrasados, citada na Equação 2

como β ;

É muito comum considerarem-se seis grupos principais bem definidos de precursores de nêutrons atrasados. [9], [10]. Esses grupos, seus precursores e respectivas meia-vidas estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Precursores de Nêutrons atrasados

Precursor	Meia-Vida	Grupo
^{87}Br	54,5	1
^{137}I	24,4	2
^{88}Br	16,3	
^{138}I	6,3	3
$^{(89)}\text{Br}$	4,4	
$^{(93,94)}\text{Rb}$	~6	
^{139}I	2,0	4
(Cs,Sb ou Te)	(1,6-2,4)	
$^{(90,92)}\text{Br}$	1,6	
$^{(93)}\text{Kr}$	~1,5	
$^{(140)}\text{I} + \text{Kr}?$	0,5	5
(Br, Rb, As +?)	0,2	6

Tabela obtida em [6]

Há na literatura dados avaliados para as constantes envolvidas no processo de reação de fissão em cadeia de reatores nucleares. As bibliotecas de dados nucleares principais são as ENDF/B-VI.8, JEF e a JENDL [11].

As constantes aqui utilizadas foram obtidas experimentalmente no reator IPEN/MB-01 [12], buscando assim uma fidelidade maior às condições reais do reator. Essas constantes são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros Cinéticos do Reator IPEN/MB-01.

Grupo i	λ_i (1/s)	β_i
1	0.012456 (fixo)	$(2.679 \pm 0.023)\text{E-4}$
2	0.0319 ± 0.0032	$(1.463 \pm 0.069)\text{E-3}$
3	0.1085 ± 0.0054	$(1.34 \pm 0.13)\text{E-3}$
4	0.3054 ± 0.0055	$(3.10 \pm 0.10)\text{E-3}$
5	1.085 ± 0.044	$(8.31 \pm 0.62)\text{E-4}$
6	3.14 ± 0.11	$(4.99 \pm 0.27)\text{E-4}$
$\beta_{\text{eff}} = (7.50 \pm 0.19)\text{E-3}$		

O tempo médio de geração de nêutrons prontos Λ utilizado foi de $32\mu s$, obtido experimentalmente para o reator IPEN/MB-01. [12]

Resolvendo as equações de cinética pontual para a Reatividade, chegamos às equações de Cinética Inversa, conforme mostram as Equações 4 e 5. Essas equações são chamadas de Cinética Inversa justamente por inverterem o problema da cinética pontual.

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} + \beta - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) - \frac{\Lambda}{n(t)} S \quad (4)$$

onde

$$C_i(t) = C_i(0)e^{(-\lambda_i t)} + \frac{\beta_i}{\Lambda} e^{-\lambda_i t} \int_0^t n(t') e^{(\lambda_i t')} dt' \quad (5)$$

O último termo da Equação 4 é chamado Termo Fonte, uma vez que esse termo representa a contribuição da Fonte S, ou seja, a fonte externa ao meio multiplicativo.

A fonte externa normalmente é considerada como sendo a fonte de partida do reator. Essa fonte é utilizada em alguns reatores para a sensibilização dos detectores dos canais nucleares de partida, que reconhecem o início de operação do reator. Entretanto, vale lembrar que todos os nêutrons que podem aparecer no núcleo do reator por outra origem se não o meio multiplicativo são também fonte externa. Por exemplo, os nêutrons originados por fissões espontâneas, ou mesmo por raios cósmicos são também uma fonte de nêutrons [7].

Devido ao fato de os nêutrons provenientes da fonte externa serem poucos, quando comparados ao fluxo de nêutrons no núcleo de um reator em operação, é comum desprezar-se o Termo Fonte no algoritmo da Cinética Inversa. Com isso, normalmente é construído um reatímetro que desconsidera o Termo Fonte, e esse algoritmo é capaz de monitorar a reatividade na condição crítica, onde a contribuição da Fonte S é desprezível.

Na situação onde o reator está crítico, ou seja, com a reatividade igual a zero, em média, o que é chamado de equilíbrio, as variações $\frac{dn(t)}{dt}$ e $\frac{dC_i(t)}{dt}$ são nulas. Ao desconsiderarmos o Termo Fonte, utilizando o algoritmo de Cinética Inversa, e pelas relações a seguir:

Partindo da Equação 3, para $\frac{dC_i(t)}{dt} = 0$, temos:

$$\lambda_i C_i(t) = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) \quad (6)$$

Nesse caso, da Equação 4, desconsiderando o Termo Fonte, qual seja,

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} + \beta - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (7)$$

tem-se que

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} + \beta - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) \quad (8)$$

obtendo:

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} \quad (9)$$

E assim, com $\frac{dn(t)}{dt}$ nula a reatividade medida pelo algoritmo da Cinética Inversa é nula e, portanto coerente com a situação do sistema no reator.

Porém, no domínio subcrítico, ou até com o reator crítico e operando a uma potência muito baixa, o número total de nêutrons no núcleo é muito menor e se torna comparável ao número de nêutrons gerados pela fonte externa. Nesse caso a contagem de nêutrons e o cálculo da reatividade podem ser influenciados por esse fator [10].

Um exemplo desse efeito está apresentado na Figura 2, que mostra o comportamento da reatividade medida com o algoritmo da Cinética Inversa desconsiderando o Termo Fonte em função do tempo durante um experimento de queda de barras de controle e segurança no reator IPEN/MB-01. Na condição crítica, o algoritmo é capaz de determinar a reatividade, verificando possíveis variações no sinal de entrada, e tem-se uma boa medida de reatividade para qualquer transiente que possa existir no sistema. Em um determinado momento, é feita a queda das barras de controle e segurança, processo denominado SCRAM, o que significa inserir reatividade negativa no reator.

Figura 2 - Comportamento da reatividade em função do tempo, medida com o algoritmo de Cinética Inversa, desconsiderando o Termo Fonte, após a queda dos bancos absorvedores.

Nesse processo, a inserção das barras de controle e segurança faz com que o sinal capturado pelo detector de nêutrons em uso diminua bruscamente, uma vez que o material absorvedor faz com que o número de nêutrons no núcleo do reator diminua. Essa variação é detectada corretamente pelo detector.

Após algum tempo transcorrido da inserção dos absorvedores, o número de nêutrons tende a se estabilizar, devido à presença da fonte física do

reator, que é composta pela fonte de partida, pela construção do reator, e por qualquer nêutron não originado no processo de fissão em cadeia.

Nessa situação, ou seja, com o fluxo de nêutrons constante, a variação do número de nêutrons em função do tempo $\frac{dn(t)}{dt}$ é nula, bem como a variação da concentração de precursores de nêutrons atrasados $\frac{dC_i(t)}{dt}$. Essa condição na cinética pontual é equivalente à condição de equilíbrio, devido a essa estabilidade no sinal do detector. Com isso, ao determinar-se a reatividade com a utilização do algoritmo da Cinética Inversa, desconsiderando o Termo Fonte, há uma tendência a se obter valor nulo, conforme demonstrado anteriormente para o caso crítico

Isso não acontece quando o Termo Fonte é considerado no algoritmo, sendo que o valor da grandeza S é determinante para a correta monitoração da reatividade.

Observa-se que antes da queda das barras, com o reator crítico, quando o número de nêutrons é em média constante, a medida é satisfatória, e o valor de reatividade determinado pela Cinética Inversa condiz com o estado de criticalidade do reator. Entretanto, após a queda das barras, o fluxo de nêutrons se mantém constante em média, apesar do aumento da flutuação, mas o valor de reatividade determinado pela Cinética Inversa nunca se estabiliza e tende a voltar ao zero.

É evidente que para o caso da queda das barras, quando se deseja desligar o reator, esse efeito não é muito relevante, pois se consegue medir a primeira variação da reatividade e sabe-se que o reator foi desligado. Entretanto, no momento em que se deseja criticalizar o sistema, cada vez que o fluxo de nêutrons se mantiver constante em função do tempo, o reatímetro que desconsidera o termo fonte tenderá a fornecer um valor de reatividade nula, e por isso é necessário utilizar recursos extras para se obter uma boa referência da condição de atuação do reator, como a multiplicação inversa, que será mostrada na seção 2.5.

Em uma situação dessas, onde o processo de criticalização está em andamento, como no START-UP de uma Usina Nuclear, ou em sua re-ativação

após uma parada para troca de combustível ou manutenção, é importante conhecer a condição do reator, para que se consiga um melhor controle da operação.

Assim, um preciso monitoramento da reatividade se torna fundamental para uma operação mais rápida, segura, e eficiente dos reatores nucleares.

Quando o Termo Fonte é inserido no algoritmo da Cinética Inversa, mesmo após a estabilização do número de nêutrons, a reatividade medida perde a tendência a zero, conforme pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Comparativo entre a reatividade medida com e sem o Termo Fonte no algoritmo de Cinética Inversa após a queda dos bancos absorvedores.

Na Figura 3 é possível visualizar o efeito da introdução do Termo Fonte no algoritmo da Cinética Inversa. Verifica-se também que logo após a queda dos bancos, o valor determinado de reatividade é ligeiramente maior (mais negativo) quando é considerado o termo fonte.

2.5. Multiplicação Inversa

A maioria dos reatores nucleares, inclusive o Reator IPEN/MB-01 tem como processo de criticalização padrão, a previsão de criticalidade por meio da curva $1/M$ extrapolada, conhecido como Método da Multiplicação Inversa.

Novamente trabalhando as equações de cinética pontual, e partindo de um estado de equilíbrio, onde $\frac{dn(t)}{dt}$ e $\frac{dC_i(t)}{dt}$ são nulas, considerando um estado subcrítico e inicial, ou seja, em $t=0$, temos, a partir da Equação 2:

$$0 = \frac{\rho(0)}{\Lambda} n(0) - \frac{\beta}{\Lambda} n(0) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) + S(0) \quad (10)$$

e usando a Equação 6,

$$0 = \frac{\rho(0)}{\Lambda} n(0) - \frac{\beta}{\Lambda} n(0) + \frac{\beta}{\Lambda} n(0) + S(0) \quad (11)$$

o que nos dá:

$$\frac{n(0)}{\Lambda} = -\frac{S(0)}{\rho(0)} \quad (12)$$

Então, considerando $\Lambda(0) = k\Lambda$, temos: [7]

$$\frac{n(0)}{\Lambda(0)/k} = -\frac{S(0)}{\rho(0)} \quad (13)$$

$$\frac{n(0)}{\Lambda(0)/k} = -\frac{S(0)}{(k-1)/k} \quad (14)$$

$$\frac{n(0)}{\Lambda(0)} = -\frac{S(0)}{k-1} \quad (15)$$

E por fim

$$\frac{n(0)}{\Lambda(0)} = \frac{S(0)}{1-k} \quad (16)$$

Como $k < 1$, temos:

$$M = \frac{1}{1-k} = 1 + k + k^2 + k^3 + \dots \quad (17)$$

Com isso, podemos entender que M é a razão entre a taxa de perda de nêutrons $\frac{n(0)}{\Lambda(0)}$ e a Fonte $S(0)$ [7]. A grandeza M é conhecida pelo nome de Multiplicação Subcrítica.

Entende-se, pela Equação 17, que o valor de M tenderá ao infinito à medida que o valor de k tender a 1. Com isso, para maior praticidade da aplicação desse método, utiliza-se:

$$\frac{1}{M} = 1 - k \quad (18)$$

que é a expressão conhecida como INVERSO DA MULTIPLICAÇÃO SUBCRÍTICA, ou MULTIPLICAÇÃO INVERSA.

No Reator IPEN/MB-01, os detectores de partida dos canais 1 e 2 podem ser utilizados para se fazer o processo de criticalização pelo método da Multiplicação Inversa. Nos canais nucleares 1 e 2 estão presentes detectores de modo pulso, que têm alta sensibilidade a nêutrons, e por isso são adequados para a partida do reator, quando há um número muito pequeno de nêutrons no sistema.

Esses detectores estão posicionados na periferia do núcleo, o que está representado na Figura 4.

Figura 4 - Posicionamento dos detectores dos canais nucleares de partida 1 e 2 na periferia do núcleo do Reator IPEN/MB-01.

O processo de criticalização por uso da Multiplicação Inversa é feito medindo-se a variação na taxa de contagens dos detectores em função da retirada dos bancos de controle.

Inicialmente, em uma determinada posição dos bancos, ainda bastante inseridos, mede-se a taxa média de contagens de um determinado canal e considera-se essa taxa como inicial C_i . Em seguida, retiram-se os bancos de controle parcialmente e novamente medem-se as taxas de contagem, obtendo um valor maior do que o inicial, uma vez que ao retirar os bancos absorvedores, o fluxo de nêutrons tende a crescer. Essa medida será a medida C_f .

A relação entre a contagem inicial e a contagem final, é o inverso da multiplicação subcrítica, e então plota-se a relação C_i/C_f em função da posição dos bancos de controle. A partir desses dois pontos, traça-se uma reta extrapolada até cruzar o eixo das abscissas, mostrando ali a previsão para a posição dos bancos de controle onde ocorrerá a criticalidade. Repete-se o

processo, e traça-se uma nova reta a cada dois pontos, obtendo-se uma nova previsão para a posição dos bancos.

À medida que as previsões convergem, ou seja, os bancos absorvedores se aproximam da posição para a qual o reator estará crítico, diminuem-se os passos de retirada dos bancos, sempre repetindo o procedimento. Um exemplo dessa aplicação será mostrado na seção 4.3.2.

3. OBJETIVOS

Este trabalho teve como principal objetivo determinar o valor do Termo Fonte na equação da cinética pontual, com o intuito de desenvolver um reatímetro capaz de monitorar a reatividade do reator nuclear durante o processo de criticalização utilizando o método da Cinética Inversa.

A determinação do Termo Fonte consiste em quantificar a Fonte S , externa ao meio multiplicativo, na Equação 4. Em seguida pode-se inserir o termo no algoritmo de medição de reatividade com a Cinética Inversa. Isso impedirá que o reatímetro aponte uma reatividade zero quando o sinal fornecido pelo detector de nêutrons estiver em taxa aproximadamente constante, embora ainda no estado subcrítico.

Além disso, observando a Equação 4, verifica-se que uma parcela de reatividade não é considerada no algoritmo se desconsiderarmos o Termo Fonte. Com isso, ao medir-se a reatividade com o reatímetro normalmente utilizado, ainda que haja uma boa taxa de variação no fluxo de nêutrons, no domínio subcrítico, é provável que o reatímetro determine um valor de reatividade maior (menos negativo) do que o valor real de reatividade. Por exemplo, quando há a inserção de um absorvedor, ou seja, um transiente qualquer que diminua a população de nêutrons em função do tempo, como a inserção de um banco de controle, a variação de reatividade medida para esse transiente será menor do que a real se o Termo Fonte for desconsiderado, como foi mostrado na Figura 3. Portanto, a acurácia do reatímetro aumenta quando se considera o Termo Fonte.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Entre os métodos teóricos utilizados para a realização deste trabalho está o LSIKM – Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa - que consiste em determinar o valor da Fonte S para o algoritmo de Cinética Inversa, bem como a reatividade após a consideração do Termo Fonte.

Foram realizados experimentos de queda de barras e de criticalização em passos no Reator IPEN/MB-01, onde foram adquiridos dados de detectores, em experimentos dedicados e pelo Sistema de Aquisição de Dados (SAD) do próprio reator com o objetivo de determinar a reatividade inserida pelos bancos absorvedores, bem como quantificar a Fonte S pelo LSIKM.

Além disso, foram feitas simulações utilizando o sistema MCNP5, que utiliza o Método de Monte Carlo para calcular o transporte de nêutrons, fótons e elétrons. O objetivo dessas simulações é comparar os valores de reatividade medidos experimentalmente e calculado, para a validação de métodos e biblioteca de dados para o MCNP. Foram feitas simulações do Reator IPEN/MB-01 das condições práticas experimentais, e comparados os valores obtidos experimentalmente e calculados.

4.1.Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa (LSIKM)

O LSIKM consiste em determinar a Fonte S com ajustes por Mínimos Quadrados utilizando valores calculados com a cinética pontual resolvida para a reatividade. É necessário inserir uma reatividade negativa para se fazer essa análise, e utilizar os dados após a inserção dessa reatividade.

O processo deve ser iniciado medindo-se o fluxo de nêutrons com detectores, a partir de um estado conhecido e estável. Esse será o fluxo de

nêutrons no instante $t=0$. Em seguida, insere-se um transiente de reatividade negativa e monitora-se esse fluxo, determinando a reatividade a cada instante t .

Da equação de Cinética Inversa, apresentada na Equação 4, e repetida a seguir, temos:

$$\rho(t) = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} + \beta - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) - \frac{\Lambda}{n(t)} S$$

Por simplicidade, os três primeiros termos do lado direito da equação acima serão chamados de $\rho'(t)$. Essa grandeza pode ser medida, partindo-se de dados adquiridos de detectores de nêutrons, que vão representar o número de nêutrons no reator. Portanto, $n(t)$ será representado pelo sinal captado por um detector de nêutron no instante t . Isso pode ser feito desconsiderando o Termo Fonte, onde teremos:

$$\rho'(t) = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn(t)}{dt} + \beta - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (19)$$

Podemos agora inserir o Termo Fonte na equação, retornando à equação padrão da Cinética Inversa. Para uma maior simplicidade na aplicação do LSIKM, a partir deste ponto, vamos chamar a reatividade considerando o Termo Fonte de $\rho_d(t)$, e teremos então:

$$\rho_d(t) = \rho'(t) - \frac{\Lambda}{n(t)} S \quad (20)$$

portanto:

$$\rho'(t) = \rho_d(t) + \frac{\Lambda}{n(t)} S \quad (21)$$

Tendo os valores de $\rho'(t)$, Λ e $n(t)$, para cada instante t , pode-se fazer um gráfico de $\rho'(t)$ em função de $1/n(t)$ e em seguida calcular os valores de S e $\rho_d(t)$ pelo método de mínimos quadrados.

Um exemplo desse ajuste é apresentado na Figura 5. Observa-se que foram ajustados os dados onde existe a linha vermelha, que corresponde a esse ajuste linear. Como esse exemplo tem objetivo apenas de mostrar a aplicação do

método, as barras de erro foram removidas, para uma melhor visualização das medidas.

Figura 5 - Ajuste por LSIKM com a utilização da Equação 21.

O modelo sugerido na Equação 21 representa uma boa maneira para se determinar o valor da Fonte S. Porém, devido às flutuações presentes nos dados obtidos pelos detectores, como pode ser visto na Figura 5, e mesmo pela natureza estatística das variáveis em estudo, um modelo um pouco diferente de ajuste pode ser feito com melhor acurácia quando comparado ao modelo apresentado na Equação 21, conforme apresentado a seguir: [10]

Primeiramente, faremos a aproximação:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} \quad (22)$$

E então podemos escrever a equação de cinética pontual, considerando o Termo Fonte, e fazendo a aproximação da Equação 22, sendo:

$$\rho_d(t) - \beta = \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) - \frac{\Lambda}{n(t)} S \quad (23)$$

onde $\rho_d(t)$ é a reatividade considerando-se o Termo Fonte no instante t , $n(t)$ é o sinal adquirido pelo detector de nêutrons no instante t , e $C_i(t)$ é a concentração de nêutrons do grupo i no instante t .

Em seguida, ajustando a Equação 23, temos:

$$n(t) = \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} - \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) - \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} S \quad (24)$$

$$n(t) = \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} \left[\frac{\Delta n(t)}{\Delta t} - \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \right] - \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} S \quad (25)$$

A partir da Equação 25, introduzimos uma nova variável $Q(t)$, sendo:

$$Q(t) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t} - \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (26)$$

onde $Q(t)$ é a variável Q no instante t , $n(t)$ é o sinal adquirido pelo detector de nêutrons no instante t , e $C_i(t)$ é a concentração de nêutrons do grupo i no instante t .

E por fim, temos:

$$n(t) = \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} Q(t) - \frac{\Lambda}{\rho_d(t) - \beta} S \quad (27)$$

com $C_i(t)$ dado pela Equação 5 e assumindo que:

$$n(t) = n(0) + \frac{n(t) - n(t-1)}{\Delta t} t \quad (28)$$

Na Equação 28, entende-se que o fluxo de nêutrons no reator varia linearmente ao decorrer do tempo. Essa aproximação foi feita para uma simplificação nos cálculos da reatividade. Na Equação 28, $n(0)$ corresponde ao valor de $n(t)$ no instante $t=0$, ou seja, o início da medição, como foi dito anteriormente. O termo Δt representa o intervalo de tempo entre as medidas do

fluxo. E ainda, o numerador do segundo termo, $(n(t) - n(t-1))$ representa o sinal do detector de nêutrons utilizado, no instante t , $n(t)$ e no instante imediatamente anterior, $n(t-1)$, respectivamente.

Utilizando esse modelo de ajuste, e obtendo-se dados após a inserção de um transiente de reatividade negativa, pode ser determinado o valor da Fonte S e ao mesmo tempo da reatividade $\rho_d(t)$, considerando essa contribuição S no Termo Fonte.

O ajuste deve ser feito a partir do momento em que o comportamento de $n(t)$ for linear em relação a $Q(t)$, uma vez que esse comportamento é representado na Equação 27. Isso pode ser visto na Figura 6. Para fazer esse ajuste, foram utilizadas as contribuições das barras de erro na componente ordenada $n(t)$, com peso instrumental pelo Origin 8.0.

Figura 6 - Ajuste pela Equação 27 para a determinação da reatividade e fonte por meio do LSIKM. O ajuste é iniciado quando o comportamento do gráfico é linear.

Na Figura 6 verifica-se que há um decaimento exponencial até que o comportamento seja linear. Há alguns casos em que essa exponencial aparece mais discreta, e o comportamento de $n(t)$ em função de $Q(t)$ aparenta ser linear logo após a queda das barras.

Por meio do ajuste apresentado no gráfico da Figura 6 pela linha vermelha, pode ser determinado o valor da Fonte S e da reatividade considerando essa fonte.

Como o principal objetivo deste trabalho é determinar o valor do Termo Fonte para o Reator Nuclear IPEN/MB-01, foi necessário garantir que o Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa (LSIKM) fosse eficiente o bastante para o cálculo do valor de S . Para isso, alguns fatores foram levados em conta para se testar o método e depois aplicá-lo, tais como:

- Utilização dos parâmetros cinéticos adequados para o cálculo com a Cinética Inversa.
- Elaboração de um programa capaz de simular uma variação do fluxo de nêutrons a partir de uma variação de reatividade desejada, utilizando a solução da Equação inhour, e gerar um arquivo com esses dados.
- Inserir um valor de fonte nos dados gerados para poder validar o LSIKM.
- Validação numérica do LSIKM com os dados gerados a partir da Equação inhour.
- Realização de experimentos de queda de barras no Reator Nuclear IPEN/MB-01.
- Utilização do LSIKM para determinar a Fonte S com os dados dos experimentos.
- Validação do valor de S para utilização no reatímetro.

4.2. Validação numérica

Com o objetivo de testar e validar o método a ser usado, e após verificação da necessidade de se fazer isso, foi desenvolvido um programa capaz

de fornecer dados simulando variações no fluxo de nêutrons quando se insere uma reatividade no sistema.

O método consiste em calcular as raízes da Equação inhour para um determinado valor de reatividade, e em seguida determinar a variação do fluxo utilizando essas raízes e os parâmetros cinéticos do reator, com o acréscimo da Fonte S.

4.2.1. Equação inhour

A Equação inhour descreve a reatividade do sistema através de suas raízes. A maior raiz da Equação inhour representa o inverso do período estável do reator [11]. Para qualquer uma das raízes, o sistema apresentará a reatividade conforme a Equação 29.

$$\rho = \omega_a \Lambda + \sum_i \frac{\omega_a \beta_i}{\omega_a + \lambda_i} \quad (29)$$

onde

β_i = fração efetiva de nêutrons atrasados do grupo (ou família) de precursor i ($i = 1, \dots, m$),

λ_i = constante de decaimento do grupo de precursor i ,

ω_a = o inverso do período estável do reator, representado pela raiz da Equação inhour de maior magnitude

Λ = tempo de geração de nêutrons prontos.

A Equação 29 é conhecida como *Equação da Reatividade*, ou *Equação inhour*.

Na Figura 7 há uma representação do comportamento da Equação inhour, considerando sete raízes, para o caso de seis grupos de nêutrons atrasados. Observa-se que para reatividade negativa, todas as raízes são

negativas, e para reatividade positiva, teremos uma das raízes positiva e as outras negativas.

Figura 7 - Esquema da Equação inhour mostrando sete raízes para reatividade positiva e negativa.

A grandeza " ℓ " mostrada na Figura 7 representa o tempo médio de difusão de nêutrons no sistema. [6]

Com a Equação 29, podemos calcular sete raízes (ω_0 , ω_1 , ω_2 , ω_3 , ω_4 , ω_5 , ω_6) para um dado valor de reatividade. Com essas raízes poderemos determinar os valores simulados do fluxo de nêutrons, a partir da relação:

$$\frac{n(t)}{n_0} = \sum_{i=1}^7 A_i e^{(\omega_i t)} \quad (30)$$

onde,

n = nível de potência,

n_0 = potência inicial,

$$A_j = \frac{\rho}{\omega_j \left[\Lambda + \left(\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{(\omega_j + \lambda_i)^2} \right) \right]} \quad (31)$$

Equação obtida em [11]

ω_j = j-ésima raiz da Equação inhour ($j = 1, \dots, m+1$),

S = contribuição da Fonte S no nível de potência

A condição acima descreve a variação no fluxo de nêutrons em relação ao tempo, para um sistema multiplicativo inicialmente crítico, sem a presença de uma fonte de nêutrons externa. Para esse caso, na Equação 30, o valor de $n(t)$ para $t=0$ seria igual ao valor de n_0 ,

O LSIKM foi utilizado, neste trabalho, na situação onde o reator se encontrava subcrítico, e com a presença de uma fonte externa de nêutrons, e para satisfazer essa condição, a Equação 30 foi adaptada da maneira demonstrada a seguir.

Partindo das equações de cinética pontual, para a situação de equilíbrio, quando $\frac{dn(t)}{dt} = 0$ e $\frac{dC_i(t)}{dt} = 0$, no estado subcrítico, pode-se verificar que:

$$\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) = \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (32)$$

e

$$\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S = 0 \quad (33)$$

Substituindo a Equação 32 em 33, temos:

$$\frac{\rho(t)}{\Lambda} n(t) - \frac{\beta}{\Lambda} n(t) + \frac{\beta}{\Lambda} n(t) + S = 0 \quad (34)$$

que implica em:

$$\frac{\rho(t)}{\Lambda} n(t) = -S \quad (35)$$

Com isso, obtemos a variação no fluxo de nêutrons para a condição subcrítica, com a presença de fonte externa, em função do valor da fonte e da reatividade, sendo:

$$n(t) = -\frac{\Lambda}{\rho(t)} S \quad (35)$$

Assumindo a reatividade e a fonte S constantes ao longo do tempo, esse termo deve ser adicionado à solução geral dada pela Equação inhour, para um sistema subcrítico. [13]

Com isso, se adicionarmos o termo $-\frac{\Lambda}{\rho} S$ à Equação 30, teremos uma simulação do fluxo de nêutrons considerando a contribuição da Fonte S .

Temos então, o fluxo de nêutrons simulado como sendo:

$$\frac{n(t)}{n_0} = \sum_{i=1}^7 A_i e^{(\omega_i t)} - \frac{\Lambda}{\rho} S \quad (36)$$

É importante lembrar que a Equação 36 é válida a penas para o sistema no estado subcrítico, com a presença da fonte externa, para $t > 0$, uma vez que em $t=0$ a situação $n(0)=n_0$ não seria satisfeita. Entretanto, para a validação do LSIKM, é necessário analisar o sinal gerado com o sistema subcrítico, após algum tempo da inserção da reatividade negativa, o que nos permite trabalhar apenas em $t > 0$.

Para simularmos o fluxo de nêutrons, faremos forçadamente com que, para $t=0$, $n=n_0$ e, portanto a Equação 36 deve ser igual à unidade. Isso representa uma normalização no sinal gerado, fazendo com que o primeiro instante seja o

ponto de referência, e a partir desse ponto possam ser obtidos valores correspondentes a sinais referentes à reatividade para a qual foram calculadas as raízes da Equação inhour. Esse processo serve apenas para obter valores normalizados, uma vez que essa curva é gerada com dados proporcionais, não comprometendo assim sua validade.

4.3.Experimentos

Alguns experimentos foram realizados para a obtenção de valores adequados para a fonte “S”, bem como para a determinação da reatividade. A determinação do valor da fonte se dá pela análise de dados obtidos por detectores de nêutrons utilizados nos experimentos, com a utilização do método de cálculo LSIKM.

Com o auxílio do programa DEV- C++ foi desenvolvido um programa, em linguagem C, capaz de calcular discriminadamente as grandezas relacionadas ao método e necessárias para esta aplicação, como Reatividade, e o fator “ $Q(t)$ ”.

Além disso, utilizando os valores calculados com o DEV C++ para os fatores envolvidos, foi possível, utilizando o programa ORIGIN 8.0, fazer os ajustes de mínimos quadrados utilizando o LSIKM. Para a aquisição dos dados dos detectores, foram utilizados os programas LabView e MCS.

Os modelos de cálculo apresentados na seção anterior foram aplicados utilizando dados obtidos por detectores de nêutrons, instalados no reator IPEN/MB-01, utilizando a configuração padrão do reator, com 28X26 varetas combustíveis, acrescidos da fonte de partida inserida no núcleo, realizando experimentos de queda de barras de controle ou segurança. Essa configuração padrão é representada na Figura 8.

Figura 8 - Configuração padrão do núcleo do reator IPEN/MB-01.

Inicialmente foram realizados alguns experimentos de Queda de Barras, para a determinação da Fonte S pelo LSIKM. O sinal foi analisado com os métodos citados e os resultados estão apresentados no capítulo 5.

A partir de uma condição de equilíbrio, um experimento de queda de barras é feito para haver um transiente suficientemente grande para se obter uma grande reatividade negativa, fazendo assim com que a Fonte S seja de grande influência no sinal captado pelos detectores em uso. Esse experimento permite que os modelos citados possam ser usados para a determinação do Termo Fonte.

O posicionamento dos bancos absorvedores no reator IPEN/MB-01 é feito tendo como referência a inserção total dos bancos. Um banco absorvedor totalmente inserido corresponde a abranger toda a região da coluna ativa de UO_2 . Em outras palavras, a parte inferior da coluna ativa de UO_2 é o ponto de referência para o qual se considera o banco absorvedor retirado, ou seja, para um banco 100 % retirado, o limite inferior do material absorvedor da vareta absorvedora está na mesma altura que o limite superior do material combustível. Maiores detalhes sobre a descrição do Reator IPEN/MB-01 podem ser vistos no Anexo A.

As construções das varetas do reator IPEN/MB-01 estão representadas na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama esquemático das varetas combustíveis e de controle do Reator IPEN/MB-01 [3]

4.3.1. Experimentos de Queda de Barras

O Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa é um ajuste que necessita da inserção de uma quantidade significativa de reatividade negativa no sistema crítico, introduzindo uma quantidade grande de material absorvedor de nêutrons no núcleo do reator. Em seguida, faz-se ajuste por meio do LSIKM a partir do qual poderá ser determinado o valor da Fonte S.

Para se fazer um experimento de queda de barras, deve-se inicialmente operar o reator em uma condição conhecida, como por exemplo, a condição crítica. Após atingir essa condição conhecida, aguardam-se alguns minutos a fim de estabilizar a concentração de precursores de nêutrons atrasados

no núcleo. O próximo passo consiste em inserir um banco absorvedor de maneira rápida, o que pode ser feito utilizando as funções de SCRAM experimental do próprio Reator IPEN/MB-01.

No processo de SCRAM experimental, o banco absorvedor escolhido, podendo ser, no caso do Reator IPEN/MB-01, Banco de Controle 1 ou 2 e Banco de segurança 1 ou 2, tem seu magneto desligado, ficando então desprendido mecanicamente, sendo acelerado pela ação da Gravidade para o interior do núcleo do reator. Por isso esse processo recebe o nome de Queda de Barras. O tempo para que um banco percorra todo o percurso, da posição mais alta, até estar totalmente inserido no núcleo, no Reator IPEN/MB-01 é de aproximadamente 450ms. A partir da corrente ou pulso de um detector de nêutrons, determinam-se a reatividade, bem como a concentração de nêutrons atrasados, e com isso a variável $Q(t)$ da Equação 27, e pode-se então aplicar o Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa. Os ajustes realizados são feitos posteriormente, uma vez que os sinais dos detectores podem ser armazenados em arquivos e analisados.

O experimento de queda de barras realizado no reator foi feito na condição onde a potência do reator é aproximadamente 1mW, com o Banco de Controle 1 totalmente retirado. Isso corresponde ao Banco de Controle 2 na posição 25,12% retirado. Essa potência baixa foi escolhida para evitar que os detectores experimentais atingissem a saturação, uma vez que esses são bastante sensíveis, e se o fluxo de nêutrons for muito grande eles podem saturar.

4.3.2.Previsão de Criticalidade

A Criticalização do Reator IPEN/MB-01 pode ser feita aplicando-se o método da Multiplicação Inversa, conforme citado na seção 2.5.

Na Figura 10 é apresentado um exemplo de curva $1/M$ para um experimento no Reator IPEN/MB-01.

Figura 10 - Previsão de criticalidade pela curva $1/M$ utilizando as contagens do canal nuclear 2 do Reator IPEN/MB-01.

Na Figura 10 verifica-se que a previsão para a posição crítica ganha precisão à medida que se diminuem os passos de retirada dos bancos, bem como o sistema se aproxima do domínio crítico.

Com os dados de uma criticalização pela curva $1/M$ e utilizando o reatímetro com a Fonte S determinada pelo LSIKM, é possível determinar a reatividade durante a criticalização, ao passo em que se retiram os bancos de controle.

Ressalta-se que para o equilíbrio, ou para uma condição muito próxima de equilíbrio, as equações de cinética pontual basicamente se referem ao caso da multiplicação inversa, como apresentado na seção 2.5.

4.4.Modelagens com código MCNP-5

O Código MCNP foi utilizado neste estudo visando calcular o valor de reatividade correspondente a cada um dos bancos de varetas absorvedoras do Reator IPEN/MB-01. Para isso, foi utilizado um arquivo de modelagem do reator com o recurso de estrutura repetida, fazendo as devidas alterações para as situações desejadas [14], [15].

O recurso de estrutura repetida consiste em modelar a geometria e composição química de um componente do sistema uma única vez, e utilizá-la essa modelagem quantas vezes forem necessárias para aproximar a modelagem completa do sistema real, que neste caso é o núcleo do reator IPEN/MB-01. A estrutura repetida foi aplicada para as varetas de combustível, controle, segurança e tubos guia, bem como para a água do moderador.

4.4.1.Modelagem de queda de barras

Em vista de se compararem os valores de reatividade determinados com o reatímetro para o experimento de queda de barras, no qual foram utilizados os dados do SAD e também dos detectores de BF_3 e He_3 , e os calculados pelo código MCNP-5, foram feitas modelagens que representam o reator nas condições do experimento. Nas simulações, o Banco de Segurança 1 está sempre retirado, conforme foi feito o procedimento experimental. Haverá então três casos, representando queda de BC1, queda de BS2 e reator à potência de 1mW.

Foram realizadas três simulações, sendo:

-Simulação do reator com o Banco de Controle 1 totalmente retirado e Banco de Controle 2 na posição 25,12% retirado. Esse caso visa simular o reator na condição de potência de 1mW, antes de ser realizado o SCRAM experimental. A condição obtida para este caso é a referência para o cálculo de reatividade.

-Simulação com o Banco de Controle 1 totalmente inserido, e o Banco de Controle 2 na posição 25,12% retirado. Esse caso simula a situação após ter sido realizado o SCRAM experimental para o Banco de Controle 1.

-Simulação com o Banco de Segurança 2 totalmente inserido e o Banco de Controle 2 na posição 25,12% retirado. Esse caso simula a situação após ter sido realizado o SCRAM experimental para o Banco de Segurança 2.

4.4.2.Modelagem de criticalização em passos

Também foi feita uma simulação para a criticalização do reator em alguns passos de retirada dos Bancos de Controle 1 e 2. Essa simulação representou a criticalização pela curva $1/M$, e os valores obtidos para a reatividade em função da posição dos bancos de controle foram comparados aos obtidos experimentalmente com o reatímetro considerando o Termo Fonte, com o valor determinado experimentalmente para a Fonte S.

Assim, foram realizadas simulações do reator com os bancos de controle nas posições 30%, 40%, 50%, 55%, 57%, 58% e 58,3% retirados.

Os resultados das simulações realizadas estão apresentados no próximo capítulo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Validação Numérica para o LSIKM

O programa de simulação de fluxo foi executado, sempre utilizando os parâmetros cinéticos da literatura, referentes ao Reator IPEN/MB-01 [12] para gerar dados a serem analisados pelo reatímetro. Diversos valores de reatividade e fonte foram testados e os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

É apresentado a seguir um exemplo, onde foram calculadas as raízes da Equação inhour e simulada a variação no fluxo de nêutrons, para reatividade de -3000 pcm, com uma Fonte $S = 0,245$. Lembrando que os valores obtidos nessa simulação de fluxo são resultados de uma somatória de exponenciais, acrescidos de um termo independente do tempo, conforme a Equação 36, esse valor de fonte tem como unidade de medida (1/s), para satisfazer a condição do termo $\frac{\Lambda}{\rho} S$ ser adimensional.

Depois de gerados os dados da potência relativa em função do tempo para esse valor de reatividade, foram utilizados os dados gerados como entrada para o reatímetro que irá determinar o valor da Fonte S e da reatividade. Então foi feito o ajuste a partir da Equação 27 para se determinar essas grandezas, pelo LSIKM. Como esses valores são teóricos, é esperado que o valor de fonte encontrado pelo ajuste da Equação 27 seja equivalente ao da fonte inserida nos sinais gerados como dados de entrada. O mesmo acontece para o valor da reatividade determinado pelo reatímetro, que considera o valor da Fonte S .

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de reatividade e cada raiz da Equação inhour para o exemplo citado, utilizado como teste do Método dos Mínimos Quadrados em Cinética Inversa. Foram calculadas as raízes da Equação inhour para a inserção de reatividade de -3000 pcm. Para cada raiz, determina-se a reatividade correspondente segundo a Equação 29. Nesse caso, o inverso do

período estável foi substituído por cada uma das raízes da Equação inhour, como mostrado na Equação a seguir.

$$\rho = \omega_j \Lambda + \sum_{i=1}^6 \frac{\omega_j \beta_i}{\omega_j + \lambda_i} \quad (37)$$

Tabela 3 - Raízes da Equação inhour para reatividade de -3000 pcm.

	Raiz	Reatividade
ω_6	-1171.999541	-0.030000000
ω_5	-3.099040	-0.029999997
ω_4	-1.061376	-0.029999999
ω_3	-0.279725	-0.030000000
ω_2	-0.103963	-0.030000000
ω_1	-0.030396	-0.030000000
ω_0	-0.012341	-0.030000000

Na Tabela 3, verificam-se as sete raízes da Equação inhour para a reatividade de -3000pcm, calculadas pela Equação 29. A raiz ω_0 é o inverso do período estável do reator, neste caso muito próxima do valor de λ_1 ,

Com as raízes da Equação inhour determinadas, foi construída uma curva de potência relativa em função do tempo, como mostrado na Seção 4.2.1, usando as Equações 31 e 36 e, com essa curva, utilizando o reatímetro que desconsidera o Termo Fonte, foram obtidas $Q(t)$ e $n(t)$, necessários para se fazer o ajuste proposto pela Equação 27.

Para a realização desse ajuste, foi utilizado o programa Origin 8.0, e o ajuste para a função específica da Equação 27, que é:

$$n_j = \frac{\Lambda}{\rho_d - \beta_{eff}} Q_j - \frac{\Lambda}{\rho_d - \beta_{eff}} S$$

Para fazer esse ajuste utilizando o programa Oirgin 8.0 é necessário discriminar a função e inserir as constantes e parâmetros.

As constantes Λ e β_{eff} são conhecidas, determinadas experimentalmente no reator IPEN/MB-01.

A grandeza $Q(t)$ é determinada pelo reatímetro com o uso da Equação 26, partindo do sinal medido, neste caso de validação, simulado, $n(t)$. Essas duas grandezas são abscissa e ordenada no gráfico e os parâmetros ρ_d e S são os ajustados por mínimos quadrados pelo Origin 8.0, ficando:

$$n(t) = \frac{0,000032}{\text{Reatividade} - 0,0075009} Q(t) - \frac{0,000032}{\text{Reatividade} - 0,0075009} S \quad (38)$$

Figura 11 - Ajuste de função com uso da Equação 27, a partir de dados teóricos que simulam fluxo de nêutrons no reator

Na Figura 11, é possível observar que, na validação numérica, o comportamento da variável $Q(t)$ em função de $n(t)$ é linear assim que a reatividade negativa é inserida. O ajuste, representado pela reta em azul, é então feito pelo

programa Origin 8.0 a partir dos primeiros pontos, utilizando como dados de entrada os valores representativos de simulação de fluxo.

Os resultados do ajuste da Figura 11 estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores obtidos pelo LSIKM para dados simulados de variação de fluxo utilizado para validação do método.

Reatividade (pcm)	σ (pcm)	Fonte	σ
-3001,045	4×10^{-3}	$2,4668 \times 10^{-1}$	2×10^{-5}

Com os resultados obtidos por esse ajuste, podemos observar que o método de determinação da fonte com a utilização do modelo da Equação 27 é satisfatório, uma vez que o ajuste determinou reatividade de -3001 pcm, e Fonte $S = 0,24668$, para os valores desejados de reatividade de -3000 pcm e Fonte $S = 0,245$. Esses valores representam erro de 0,3% para a reatividade, e 0,7% na Fonte S .

Com isso tem-se uma validação teórica e portanto pode-se partir para a etapa de experimentos, onde o modelo será utilizado para a determinação da Fonte S e também para a reatividade do Banco de Controle 1 e Banco de Segurança 2 a partir de dados obtidos de detectores de nêutrons instalados no núcleo do Reator IPEN/MB-01.

5.2.Experimentos

Os experimentos de Queda de Barras citados no capítulo 4 foram feitos no reator IPEN/MB-01. Os resultados estão apresentados na Seção 5.2.1.

Além desses experimentos, há a determinação da reatividade durante o processo de criticalização, o que foi feito utilizando dados do detector do canal 5 após o experimento, e pode ser visto na seção 5.2.2.

5.2.1.Experimentos de queda de barras

A operação do Reator IPEN/MB-01 é normalmente feita utilizando os bancos de controle 1 e 2 em posições intermediárias, a fim de manter uma simetria e homogeneidade no fluxo de nêutrons no núcleo do reator. Porém, como é objetivo obter a reatividade dos bancos de controle e segurança, torna-se interessante realizar a inserção individual dos bancos a partir de posições iguais. Isso significa que os bancos de controle e segurança a serem inseridos, precisam estar na mesma posição no momento em que o SCRAM experimental é acionado.

Para satisfazer a condição das posições iniciais dos bancos absorvedores, foi feita uma operação no Reator IPEN/MB-01 de maneira que o Banco de Controle 1 ficasse totalmente retirado do núcleo, assim como os Bancos de Segurança, e o controle fosse feito apenas pelo Banco de Controle 2. Essa condição foi possível mantendo-se o Banco de Controle 2 na posição 25,12% retirado, garantindo um sinal constante nos detectores, correspondendo à potência de 1mW.

Dois detectores, de BF_3 e He_3 ambos de modo pulso foram utilizados, na face OESTE do núcleo do Reator IPEN/MB-01, a fim de monitorar o fluxo de nêutrons a uma distância relativamente grande do transiente em questão, que neste caso foi a inserção dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2. Esse afastamento é muito importante, uma vez que a inserção do transiente no núcleo causa distorção na forma do fluxo de nêutrons no núcleo, sendo que em regiões próximas ao absorvedor, o fluxo apresenta valores abaixo do fluxo médio, o que é denominado “sombreamento”.

O posicionamento dos bancos absorvedores e os detectores no núcleo do Reator IPEN/MB-01 pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Posicionamento dos bancos absorvedores e dos detectores de nêutrons no núcleo do reator IPEN/MB-01.

Os detectores dos canais nucleares 1 a 10 pertencem ao SAD (Sistema de Aquisição de Dados) do Reator IPEN/MB-01. Os sinais captados por esses detectores são armazenados em arquivos de texto, pelo programa LabView, e podem ser utilizados para análises posteriores.

Para o experimento de queda de barras realizado, além dos detectores experimentais de He_3 e BF_3 , foram utilizados os detectores dos canais 5 e 6. Esses detectores são câmaras de ionização não compensadas (CINC), e seus sinais de corrente têm comportamento linear em função da potência do reator, atuando da faixa de 10^{-3} W a 10^2 W [16].

Inicialmente, foi utilizado o detector de BF_3 , obtendo-se os dados de contagem pelo programa MCS. Em seguida foram analisados esses dados e feitos os ajustes para a fonte e reatividade. A taxa de amostragem para esses ajustes foi de uma medida a cada segundo, e foram utilizados os parâmetros cinéticos do reator IPEN/MB-01 [12].

Os sinais dos detectores apresentam flutuação, principalmente nos detectores de modo corrente pertencentes aos canais 5 e 6 do SAD do Reator IPEN/MB-01.

Para reduzir a flutuação dos sinais dos detectores, foi utilizado um filtro passa baixa, conforme apresentado na Equação 39 [17].

$$n_t^f = n_{t-1}^f + \frac{dt}{\tau + dt} (n_t - n_{t-1}^f) \quad (39)$$

Onde:

n_t^f e n_{t-1}^f são os sinais filtrados nos instantes t e $t-1$

n_t é o sinal medido no instante t

τ é a constante de tempo utilizada para o filtro

dt é o intervalo entre as medidas

No caso da utilização do filtro passa baixa, a variável $n(t)$ na Equação 27, utilizada para os ajustes em LSIKM para a determinação da fonte S, corresponderá o valor de n_t^f , que é o resultado da aplicação do filtro passa baixa sobre o sinal do detector.

Vários valores para a constante de tempo τ foram testados, e o valor que se ajustou de melhor forma foi $\tau = 5$ segundos. É possível verificar em [17], que quanto maior a constante de tempo utilizada para o filtro passa baixa, menor o desvio padrão. Entretanto, utilizar filtro com constante muita alta distorce o comportamento das variáveis em ajuste $Q(t)$ e $n(t)$ a ponto de fazer o ajuste perder a validade. Já com a constante muito pequena, o efeito do filtro se torna desprezível. A constante de 5 segundos se mostrou satisfatória por tornar as curvas aproximadas para todos os canais. Como o ajuste LSIKM é feito na região linear, o efeito do filtro foi uma grande redução de incerteza, embora tenha apresentado certa variação nos resultados obtidos.

Os cálculos foram realizados diretamente com os dados dos detectores e também com a utilização do filtro passa baixa para efeito de comparação, e os

resultados estão apresentados nas figuras a seguir. Após as ilustrações das figuras, há tabelas explicitando os resultados obtidos.

Todos os ajustes foram feitos de maneira análoga à apresentada na seção 5.1, utilizando a mesma função da Equação 38, com a particularidade de se representar a reatividade por $p1$ e a Fonte S por $p2$.

Nas Figuras 13 e 14 estão apresentados respectivamente o ajuste feito com os dados obtidos pelo detector de BF_3 diretamente e filtrado pela Equação 39 para a queda do Banco de Controle 1.

A reatividade está representada de forma adimensional, e a Fonte S tem a mesma unidade do detector em uso por unidade de tempo. No caso das Figuras 13 e 14, a medida do detector de BF_3 é feita em contagens.

Figura 13 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir de dados de detector modo pulso de BF_3 sem a utilização do filtro passa baixa.

Utilizando os dados diretamente do detector de BF_3 , de modo pulso, podemos perceber um comportamento bastante parecido com o comportamento dos dados teóricos, como apresentado na Figura 13. Ao aplicar o filtro passa

baixa, pode-se verificar o decaimento mais explicitamente, conforme pode ser visualizado na Figura 14 a seguir:

Figura 14 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir de dados de detector modo pulso de BF_3 com a utilização do filtro passa baixa.

Verifica-se que utilizando o filtro passa baixa, as variações no sinal do detector são amenizadas, apresentando inicialmente um decaimento exponencial, seguido de um comportamento linear, suscetível ao ajuste proposto pela Equação 27. Em todos os casos onde foi utilizado o filtro passa baixa, os ajustes foram realizados a partir do ponto em que o comportamento das variáveis descreve uma relação linear. No caso dos canais 5 e 6, existe ainda uma flutuação nos dados, sobretudo no canal 6, que se mostrou mais perturbado nesses experimentos, devido ao seu posicionamento no núcleo.

As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram os ajustes feitos com os sinais dos canais 5 e 6 com e sem a utilização do filtro passa baixa. Lembrando que a unidade de medida da Fonte S neste caso é em Ampère por segundo (A/s), mesma unidade fornecida pelos detectores modo corrente, por unidade de tempo, para satisfazer a Equação 4. A reatividade continua sendo apresentada na forma adimensional.

Figura 15 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 16 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 17 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 18 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.

Em outra etapa do experimento, foi feito o retorno do Banco de Controle 1 à posição anterior, ou seja, totalmente retirado e em seguida foi feita a queda do Banco de Segurança 2. Novamente foram adquiridos os dados dos canais 5 e 6, e foram feitos os ajustes com e sem o filtro passa baixa. Esses ajustes podem ser visualizados nas Figuras 19 a 24. Novamente a reatividade está adimensional, e a Fonte S tem como unidade de medida a unidade dos sinais dos detectores, por unidade de tempo.

Figura 19 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de BF₃ sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 20 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de BF_3 com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 21 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 22 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 23- Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 24 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.

Os experimentos foram repetidos, desta vez utilizando o detector de He_3 . Nas Figuras 25 a 30 são apresentados os ajustes para a queda dos Bancos de Controle 1, utilizando os dados do detector de He_3 e dos canais 5 e 6, com e sem o filtro passa baixa.

Chamaremos o primeiro experimento, com o detector de BF_3 , de Experimento 1 e o demonstrado a seguir, com o detector de He_3 , de Experimento 2.

Figura 25 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector de He₃ sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 26 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector de He₃ com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 27 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 28 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 29 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 30 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Controle 1 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.

Assim como no primeiro experimento, foi feito também o SCRAM para o Banco de Segurança 2, e os resultados obtidos pelo LSIKM estão apresentados nas Figuras 31 a 36, tendo sido feitos ajustes com dados do detector experimental de He₃, e dos canais 5 e 6, com e sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 31 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de He₃ sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 32 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector de He₃ com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 33 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 34 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 5 com a utilização do filtro passa baixa.

Figura 35 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 sem a utilização do filtro passa baixa.

Figura 36 - Determinação do Termo Fonte e da reatividade do Banco de Segurança 2 a partir dos dados do detector do canal 6 com a utilização do filtro passa baixa.

É importante ressaltar que devido ao fato de que a unidade da fonte obtida é proporcional à unidade dos dados fornecidos pelo detector, haverá diferenças numéricas entre os valores para medidas com diferentes tipos de detectores.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores de reatividade e da Fonte S determinados pelo LSIKM quando se utilizam os dados dos detectores experimentais de BF_3 e He_3 .

Tabela 5 - Dados obtidos para Fonte S e para reatividade com os detectores experimentais.

	BC1	σ	BS2	σ	Detector
Reatividade do banco (pcm)	-3431	75	-3145	67	BF ₃
	-3115	49	-2914	29	He ₃
	-3340	48	-2930	27	BF ₃ com filtro passa baixa
	-2971	25	-2662	18	He ₃ com filtro passa baixa
Fonte (x10⁶cps)	0,844	0,019	0,803	0,018	BF ₃
	2,43	0,04	2,35	0,03	He ₃
	0,824	0,009	0,75	0,007	BF ₃ com filtro passa baixa
	2,32	0,02	2,14	0,02	He ₃ com filtro passa baixa
	BC1	σ	BS2	σ	

Observa-se que há diferença no valor determinado para a Reatividade referente aos bancos de controle e segurança à medida que se trocam os detectores. Os valores da Fonte S apresentam diferenças numéricas entre as medidas feitas com o detector de BF₃ ou de He₃. Isso se deve ao fato de que cada detector possui uma eficiência particular, e por isso, como a Fonte S necessariamente tem unidade de medida proporcional ao sinal do detector, essa diferença numérica é normal.

Apesar disso, o valor determinado para a fonte é coerente quando se fazem as medidas com os dados filtrados ou não e, sobretudo como se esperava, quando o transiente é alterado. Isso pode ser visto observando que os valores determinados para a fonte são parecidos utilizando o mesmo detector, tanto para o experimento de Queda do Banco de Controle, quanto para a Queda do Banco de Segurança.

Os dados determinados pelos canais 5 e 6 estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores da Fonte S e da Reatividade dos Bancos de Controle e Segurança determinados pelos detectores dos canais 5 e 6.

	Reatividade (pcm)	σ	Fonte ($\times 10^{-9}$ A)	σ	Detector
BC1 Experimento 1	-3083	240	4,96	0,39	Canal 5
	-3261	98	5,31	0,17	Canal 5 - filtro
	-3667	450	3,93	0,53	Canal 6
	-2850	320	2,91	0,34	Canal 6 - filtro
BC1 Experimento 2	-3370	280	4,88	0,41	Canal 5
	-3713	130	5,46	0,20	Canal 5 - filtro
	-3273	390	2,92	0,40	Canal 6
	-2416	220	2,00	0,20	Canal 6 - filtro
BS2 Experimento 1	-2670	150	5,50	0,31	Canal 5
	-2730	71	5,64	0,15	Canal 5 - filtro
	-2648	240	3,84	0,39	Canal 6
	-1839	180	2,50	0,26	Canal 6 - filtro
BS2 Experimento 2	-2950	150	5,81	0,31	Canal 5
	-2678	89	5,27	0,18	Canal 5 - filtro
	-2537	240	3,44	0,36	Canal 6
	-2127	190	2,81	0,26	Canal 6 - filtro

Verifica-se que os ajustes determinados pelos dados do canal 6 apresentam valores muito oscilantes, principalmente quando utilizamos o filtro passa baixa, não permitindo uma conclusão a respeito da reatividade dos bancos absorvedores. Entretanto, existe uma redução significativa nas incertezas quando utilizamos o filtro, o que era esperado, uma vez que a suavização dos dados diminui o desvio padrão. Observa-se ainda que não há consistência nos valores determinados para a Fonte S para o canal 6, apresentando grandes variações, tanto dependentes da utilização do filtro passa baixa, quanto entre os experimentos.

Por outro lado, ao analisarmos os dados sem utilizar o filtro passa baixa, os valores de reatividade medidos pelos canais 5 e 6 e os medidos pelos detectores experimentais se apresentam mais próximos entre si, embora tenham apresentado um maior valor de incerteza (desvio padrão). Dessa forma, o processo proposto na Equação 39 apresentou uma variação significativa nos resultados com o ajuste em LSIKM, sobretudo quando utilizados os detectores de modo corrente, o que torna questionável sua utilização para a aplicação do método. Observam-se, entretanto, reduções de 25 a 50% no desvio padrão determinado pelo Origin 8.0, quando o filtro passa baixa é utilizado. Ainda assim, para a determinação da Fonte S foram usados apenas os valores determinados sem a utilização do filtro passa baixa.

Comparando os valores de Fonte S determinados pelo canal 5 e 6 nos experimentos, podemos definir valores para a Fonte S para os canais 5 e 6, calculando-se as médias dos valores individuais, sem utilização de filtro, apresentados na Tabela 6. Os valores estabelecidos para a Fonte S foram:

$$S (\text{canal 5}) = (5,29 \pm 0,41) \times 10^{-9} \text{ A}$$

$$S (\text{canal 6}) = (3,53 \pm 0,46) \times 10^{-9} \text{ A}$$

O canal 6 apresentou valores bastante divergentes de fonte, colocando em dúvida sua validade. A localização dos detectores no núcleo pode explicar essa situação, considerando-se que o Banco de Controle 2 esteve sempre na mesma posição. Como esse banco fica próximo ao detector do canal 5, o fluxo de nêutrons na região se torna menos perturbado do que na região do canal 6.

Durante a queda do Banco de Controle 1, o transiente fica muito próximo ao canal 6, causando a perturbação verificada. Já o Banco de Segurança 2 fica aproximadamente equidistante dos detectores dos canais 5 e 6. Para o caso do Banco de Segurança, há melhor simetria em relação aos canais 5 e 6, mas ainda há a manutenção da forma do fluxo de Nêutrons na região do Banco de Controle 2, novamente proporcionando um melhor dado no detector do canal 5.

Por ter apresentado um valor para a Fonte S mais consistente escolheu-se o canal 5 como mais confiável para se medir a reatividade durante a criticalização.

A reatividade foi determinada também, utilizando os limites das incertezas dos parâmetros cinéticos citados na Tabela 2. Para isso, foram utilizados todos os valores de β e λ considerando o valor de incerteza positiva, e em outra etapa considerando os valores de incerteza negativa.

Para determinar a reatividade e a fonte, desta vez considerando os limites dos parâmetros cinéticos, todos os cálculos e ajustes foram feitos da mesma maneira apresentada anteriormente, ou seja, com uso das Equações 26 e 27.

Quando consideradas as incertezas positivas para β e λ , foram obtidos os valores de reatividade apresentados nas Tabelas 7 e 8, para os detectores experimentais e do SAD.

Tabela 7 – Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os detectores experimentais utilizando os limites superiores dos parâmetros cinéticos ($\beta + \sigma\beta$; $\lambda + \sigma\lambda$).

	BC1	σ	BS2	σ	Detector
Reatividade do banco (pcm)	-3457	75	-2993	30	BF ₃
	-3164	50	-3176	68	He ₃
Fonte (x10 ⁶ cps)	0,844	0,02	0,805	0,02	BF ₃
	2,45	0,04	2,38	0,03	He ₃
	BC1	σ	BS2	σ	

Tabela 8 - Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os canais 5 e 6, utilizando os limites superiores dos parâmetros cinéticos ($\beta + \sigma\beta$; $\lambda + \sigma\lambda$).

	Reatividade (pcm)	σ	Fonte (X10 ⁻⁹ A)	σ	Detector
BC1 Experimento 1	-2872	220	4,56	0,36	Canal 5
	-3684	443	3,92	0,53	Canal 6
BC1 Experimento 2	-3160	258	4,53	0,39	Canal 5
	-3313	391	2,94	0,40	Canal 6
BS2 Experimento 1	-2548	138	5,19	0,29	Canal 5
	-2688	241	3,87	0,39	Canal 6
BS2 Experimento 2	-2849	147	5,56	0,30	Canal 5
	-2564	243	3,44	0,36	Canal 6

Quando consideradas as incertezas negativas para β e λ , foram obtidos os valores de reatividade apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os detectores experimentais, utilizando os limites inferiores dos parâmetros cinéticos (β - $\sigma\beta$; λ - $\sigma\lambda$).

	BC1	σ	BS2	σ	Detector
Reatividade do banco (pcm)	-3411	75	-3119	67	BF ₃
	-3093	49	-2846	29	He ₃
Fonte (x10 ⁶ cps)	0,845	0,02	0,803	0,02	BF ₃
	2,44	0,04	2,31	0,02	He ₃
	BC1	σ	BS2	σ	

Tabela 10 - Reatividade dos Bancos de Controle 1 e Segurança 2 e fonte S para os canais 5 e 6, utilizando os limites inferiores dos parâmetros cinéticos (β - $\sigma\beta$; λ - $\sigma\lambda$).

	Reatividade (pcm)	σ	Fonte (X10 ⁻⁹ A)	σ	Detector
BC1 Experimento 1	-3327	258	5,40	0,43	Canal 5
	-3651	452	3,94	0,54	Canal 6
BC1 Experimento 2	-3647	304	5,32	0,45	Canal 5
	-3257	395	2,92	0,40	Canal 6
BS2 Experimento 1	-2805	152	5,84	0,24	Canal 5
	-2609	240	3,82	0,39	Canal 6
BS2 Experimento 2	-2992	216	5,93	0,44	Canal 5
	-2511	245	3,44	0,37	Canal 6

Verifica-se, comparando os valores apresentados nas Tabelas 7 a 10 com aqueles apresentados na Tabela 6, que a reatividade é bastante afetada pela

variação dos parâmetros cinéticos. A maior variação foi para o Banco de Segurança 2, medido pelo canal 5 no Experimento 1, apresentando diferença de 277 pcm quando utilizadas as incertezas negativas, em relação aos valores médios dos parâmetros propriamente ditos. Entretanto, esse valor está dentro do desvio apresentado na Tabela 6.

Pode-se ainda dizer que as diferenças encontradas nas reatividades determinadas para os bancos absorvedores estão previstas no desvio padrão, com exceção do único caso, a medida para o Banco de Controle 1 pelo canal 5 no Experimento 1, onde a diferença encontrada foi de 244 pcm e o desvio previsto era de 240 pcm.

Fica claro que os valores de reatividade aqui medidos são diretamente dependentes dos parâmetros cinéticos utilizados para os cálculos pelo LSIKM. Os parâmetros utilizados neste trabalho são bastante específicos, pois tratam-se de dados determinados experimentalmente que têm validade exclusivamente no Reator IPEN/MB-01.

Os parâmetros cinéticos referentes ao Reator IPEN/MB01 têm características parecidas com os parâmetros da biblioteca JENDL [11], [12]. Por esse fator, foram também determinadas as reatividades, da mesma maneira que para os casos anteriores, utilizando o LSIKM, quando utilizamos os parâmetros β e Λ da biblioteca JENDL, para o Reator IPEN/MB-01, que podem ser verificados nas Tabelas 11 e 12.

Os valores apresentados nas Tabelas 11 e 12 foram utilizados apenas para comparação dos dados experimentais e calculados pelo MCNP, sendo que a biblioteca do Reator IPEN/MB-01 representa valores específicos ao Reator IPEN/MB-01.

Tabela 11 - Reatividade dos Bancos e fonte S utilizando a biblioteca JENDL e os detectores experimentais.

	BC1	σ	BS2	σ	Detector
Reatividade do banco (pcm)	-3685	80	-3379	71	BF ₃
	-3358	53	-3126	31	He ₃
Fonte (x10⁶cps)	0,897	0,02	0,854	0,019	BF ₃
	2,59	0,04	2,49	0,03	He ₃
	BC1	σ	BS2	σ	

Tabela 12 - Reatividade dos Bancos e fonte S utilizando a biblioteca JENDL e os canais 5 e 6.

	Reatividade (pcm)	σ	Fonte (X10⁻⁹ A)	σ	Detector
BC1 Experimento 1	-3366	256	5,35	0,42	Canal 5
	-3946	457	4,19	0,57	Canal 6
BC1 Experimento 2	-3695	302	5,29	0,45	Canal 5
	-3538	419	3,12	0,43	Canal 6
BS2 Experimento 1	-2908	156	5,91	0,33	Canal 5
	-2852	256	4,08	0,41	Canal 6
BS2 Experimento 2	-3201	164	6,23	0,33	Canal 5
	-2741	260	3,67	0,39	Canal 6

Verifica-se nitidamente que quando são usados os dados da biblioteca JENDL, os valores absolutos de reatividade, determinados para os bancos

absorvedores, aumentam. Esse aumento ocorre também nos valores de fonte, e para o caso de se utilizarem os parâmetros da biblioteca JENDL, deve-se considerar esse valor para a Fonte S.

5.2.2.Previsão de Criticalidade

A previsão de criticalidade, para a maioria dos reatores, inclusive no Reator IPEN/MB-01 normalmente é feita com a utilização da curva $1/M$. Utilizando os dados armazenados pelo SAD após o experimento, referentes a uma criticalização comum, especificamente os dados do canal 5, foi determinada a reatividade, para cada passo de criticalização, com o uso do algoritmo de Cinética Inversa, considerando o Termo Fonte, com o valor da Fonte S determinado pelo LSIKM. Essa situação deve apresentar um incremento no valor da reatividade à medida que o Banco de Controle é retirado, estabelecendo patamares a cada passo.

Na Figura 37 estão apresentadas quatro curvas, sendo o sinal de corrente do detector do canal 5, a potência do reator determinada pelo canal 5, a posição dos Bancos de Controle 1 e 2 e a reatividade determinada pelo algoritmo da Cinética Inversa considerando o Termo Fonte com o valor de S adotado para o canal 5, com o número de nêutrons $n(t)$ representado pelo sinal de corrente do canal 5. Cada uma dessas grandezas possui unidade de medida específica, e por isso foram necessários quatro eixos discriminando as escalas, as grandezas e as unidades, identificadas pelas mesmas cores das curvas.

É importante lembrar que esse tipo de medida é uma ferramenta bastante útil para o caso de criticalização de um reator nuclear durante a realização dos testes físicos. No caso de Angra 1 e Angra 2, esse tipo de medida seria de grande serventia, auxiliando a monitoração da reatividade, e mostrando uma boa previsão de criticalidade.

Podemos ver que a reatividade pode ser monitorada durante a criticalização, o que não é possível sem a inserção do Termo Fonte no algoritmo da Cinética Inversa. Neste exemplo, verifica-se claramente que o reatímetro

acompanha o aumento da potência, decorrente da retirada dos bancos absorvedores.

Fica evidente neste caso que o reatímetro consegue monitorar a reatividade antes de a criticalidade ser atingida, e verifica-se que enquanto os Bancos de Controle não atingem a posição crítica, o reatímetro continua reconhecendo o sistema como subcrítico. Porém, à medida que o sistema se afasta da criticalidade o valor de reatividade determinado perde sua acurácia. Isso pode ser notado na região onde os bancos estão bastante inseridos, por exemplo, na posição 30% retirados.

É possível verificar que até a posição de barras de 58% retiradas, a reatividade determinada pelo reatímetro com Termo Fonte é negativa, o que é bastante coerente, já que a posição média de barras para a criticalidade nesse experimento foi de 58,30% retiradas. Essa posição foi prevista pelo método $1/M$, e a posição de barra em modo automático ficou em aproximadamente 58,13% retirada.

Figura 37 - Reatividade calculada durante a criticalização. Verifica-se um comportamento estável da reatividade em função do posição e da potência.

5.3.Modelagens com o Código MCNP-5

Conforme foi dito anteriormente, as simulações executadas pelo código MCNP-5 tiveram como base representar os experimentos realizados para o cálculo de reatividade em diversas situações. Com isso, algumas situações distintas tiveram que ser modeladas. A biblioteca de dados utilizada para as simulações no MCNP foi a ENDF-B-VII.

5.3.1.Simulação de queda de barras

As modelagens feitas com o código MCNP-5 para simular a queda de barras, referente ao experimento de queda de barras da seção 4.3.1, apresentaram alguns valores de reatividade para os bancos de controle e segurança. O MCNP fornece o valor de K_{eff} para a situação do problema.

Para calcular a reatividade foi utilizado o valor do K_{eff} fornecido pelo MCNP-5 e aplicada a relação apresentada na Equação 1. Para tanto, foi necessário utilizar, na Equação 1, a relação $k_{\text{eff}} = k$:

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 13 - Valores obtidos de k-efetivo para Banco de Controle 1 e Banco de Segurança 2.

		Valor	σ
BC1	K_{eff}	0.961451	0,00004
	Reatividade (pcm)	-4009	4
BS2	K_{eff}	0.96554	0,00004
	Reatividade (pcm)	-3569	4

Verifica-se que os valores calculados pelo Código MCNP para a reatividade dos bancos apresentam comportamento igual aos resultados obtidos experimentalmente, quando se comparam as reatividades dos Bancos de Controle e Segurança, tendo o Banco de Controle uma contribuição de reatividade negativa maior do que o Banco de Segurança. Os valores de reatividade por sua vez se apresentam diferentes, entre o calculado e o experimental.

Fica também claro que os valores calculados pelo MCNP-5 são mais próximos dos determinados experimentalmente utilizando a biblioteca JENDL.

5.3.2.Simulação de Criticalização

Com o objetivo de se compararem os dados obtidos experimentalmente, foi feita a modelagem para a criticalização, simulando a retirada dos bancos de controle, conforme foi explicado na seção 4.4.2.

Os resultados para cada posição dos bancos de controle estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de Reatividade obtidos pela simulação pelo Código MCNP-4C para diversas posições do Banco de Controle 1.

Posição dos Bancos de Controle (% retirada)	k_{eff}	σk_{eff}	Reatividade (pcm)	σ Reatividade (pcm)
30	0.967883	0.00016	-3318	23
40	0.979384	0.00016	-2105	23
50	0.991165	0.00016	-891	22
55	0.996646	0.00016	-337	23
57	0.998433	0.00016	-157	16
58	0.999601	0.00016	-40	16
58.3	1	0.00016	0	16

Com isso, comparamos os valores de reatividade calculados pela simulação em MCNP e os valores determinados experimentalmente, conforme será apresentado na seção 5.4.

5.4.Comparações

As medidas de reatividade dos bancos absorvedores, bem como os valores calculados pelo MCNP-5 estão apresentadas nas Figuras 38 e 39, que podem ser observadas a seguir.

Figura 38 - Ajuste médio de reatividade do Banco de Controle.

Da Figura 38, foi feito o ajuste para determinar o valor médio obtido para a reatividade do Banco de Controle 1, obtendo-se $(-3421 \pm 123)\text{pcm}$.

Figura 39 - Ajuste médio de reatividade do Banco de Segurança.

Da mesma forma, da Figura 39, foi feito o ajuste para determinar o valor médio obtido para a reatividade do Banco de Segurança 2, obtendo-se $(-2919 \pm 134)\text{pcm}$.

Na Figura 40 está apresentada a comparação entre os valores de reatividade calculados pelo MCNP e experimentalmente pelo reatímetro, para as posições de banco usadas na criticalização, e descritas na Tabela 14. Os valores determinados pelo reatímetro correspondem aos valores médios de reatividade dos patamares observados na Figura 37.

Figura 40 - Comparação dos valores determinados para reatividade durante a criticalização pelo MCNP e experimentalmente pelo reatímetro.

Na Figura 40 é possível verificar que para reatividades mais próximas da criticalidade, os valores do reatímetro e aqueles calculados pelo MNCP se mostram mais próximos, o que não ocorre para reatividades negativas muito grandes.

6. CONCLUSÕES

O Método dos Mínimos Quadrados em Cinética [10] apresenta algumas divergências nos ajustes e devem ser usados com cautela para a determinação da Fonte S. Cada detector pode apresentar um resultado diferente, devido às diferenças de posicionamento e isso pode ser um fator agravante para o caso de utilização do método em uma usina nuclear.

Não é possível definir um valor de reatividade dos bancos absorvedores com os resultados obtidos, embora algumas medidas apresentem resultados coerentes, quando são considerados os desvios padrão.

A determinação da Fonte S mostrou uma tendência a ser mais acurada quando foram utilizados os dados do canal 5 do Sistema de Aquisição de Dados da mesa de operação do Reator IPEN/MB-01, em relação ao canal 6. O valor determinado para o Termo Fonte para o canal 5 foi coerente quando comparados os experimentos, mostrando que a Fonte S se apresentou constante em todos os experimentos, uma vez consideradas as respectivas incertezas. Isso também foi observado comparando-se os valores de Fonte S determinados pelos detectores experimentais.

O canal 6 apresenta uma flutuação maior nos dados, o que provoca uma incerteza bastante grande nos cálculos. Isso fez com que o canal 5 fosse escolhido para a determinação da reatividade durante a criticalização.

O valor de Fonte S de $(5,29 \pm 0,41) \times 10^{-9}$ A é válido para o canal nuclear 5, para a configuração padrão do núcleo, utilizando a fonte de nêutrons de partida de AmBe de 1Ci. Quando esse valor foi inserido no algoritmo da Cinética Inversa, foi possível determinar a reatividade durante o processo de criticalização, conforme era esperado. O reatímetro com Termo Fonte apresenta a previsão de criticalidade coerente com a curva 1/M, e os valores determinados para reatividade negativa até aproximadamente -2000pcm são próximos aos calculados pelo MCNP.

As simulações de queda de barras no MCNP-5, utilizando a modelagem do Reator IPEN/MB-01, com a biblioteca ENDF-B-VII, cujo objetivo foi calcular a reatividade referente a cada banco absorvedor, apresentaram valores de maior magnitude quando comparadas com os dados experimentais e os parâmetros cinéticos obtidos experimentalmente no reator IPEN/MB-01. Os resultados das simulações se mostraram mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente quando foi utilizada a biblioteca JENDL.

Por outro lado, as simulações de retirada dos bancos absorvedores apresentam valores de reatividade próximos aos determinados pelo reatímetro com Termo Fonte para o processo de criticalização. Entretanto, verifica-se uma divergência mais acentuada quando se afasta da criticalidade, como no caso da determinação das reatividades dos bancos absorvedores.

Novos trabalhos podem ser realizados baseados nos experimentos aqui descritos, com especial atenção às condições de operação do reator, como a potência e a configuração do núcleo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão feitas observações sobre o trabalho, que poderiam explicar ou resolver algumas das divergências encontradas nos resultados obtidos.

Primeiramente, fica como sugestão a inserção do termo fonte no reatímetro da mesa de operação, utilizando os parâmetros cinéticos referentes ao Reator IPEN/MB-01, o canal 5 como dado de entrada para o reatímetro, e o valor de Fonte S determinado neste trabalho para o canal 5, que foi de $(5,29 \pm 0,29 \times 10^{-9} \text{ A})$. Com isso, a reatividade pode ser monitorada durante a criticalização, onde será esperado um comportamento parecido com o apresentado na Figura 37.

Outra sugestão visa entender a variação no valor da fonte determinada pelo canal 6. Sugere-se fazer os experimentos de queda de barras, dessa vez com o Banco de Controle 1 inserido parcialmente, e o Banco de Controle 2 totalmente retirado.

Essa situação será análoga aos experimentos realizados, mas desta vez o detector que será influenciado pelo banco absorvedor estável é o do canal 6. Possivelmente, a resposta dos detectores será também análoga às apresentadas neste trabalho. Se essa situação for verdadeira, é esperado que seja também estável o valor determinado para a Fonte S usando o detector do canal 6.

Sugere-se também que se façam os mesmos experimentos a diferentes potências. Como a Fonte S é um parâmetro físico do reator, espera-se que se possa determinar o mesmo valor numérico para diferentes potências. Recomenda-se, porém, que o tempo de aquisição de dados seja maior, pois para maiores potências, a concentração de precursores de nêutrons atrasados é maior, o que acarretará em maior tempo de decaimento desses precursores, e, portanto

a estabilização dos sinais dos detectores pela Fonte S levará um tempo maior para aparecer nas análises.

E ainda, se a fonte se apresentar coerente no canal 6, pode-se determinar seu valor em unidade de potência para o reator. Isso seria um avanço bastante significativo, pois tendo-se o valor da Fonte confiável em unidade de potência, pode-se utilizar a Cinética Inversa com qualquer detector que se saiba a relação entre o sinal e a potência, independente do modo de trabalho do detector.

ANEXO A – Reator IPEN/MB-01

Figura 41 – Vista aérea do Reator Nuclear IPEN/MB-01.

Introdução

O IPEN/MB-01 é um reator nuclear genuinamente brasileiro, concebido por pesquisadores e Engenheiros do IPEN-CNEN/SP, financiado e construído pela Marinha do Brasil, atingiu sua primeira criticalidade às 15 horas e 35 minutos do dia 9 de Novembro de 1988, sendo oficialmente entregue para operação ao IPEN-CNEN/SP em 28 de Novembro deste mesmo ano.

O projeto do Reator IPEN/MB-01 foi iniciado em 1983 e suas obras foram concluídas em Julho de 1988. No mesmo mês iniciaram-se os testes dos seus vários sistemas. Cumpridas as exigências legais exigidas para o seu licenciamento, foi concedida em 19 de Outubro de 1988, pelas resoluções CNEN 23 e 25 a autorização para a sua operação inicial.

O Reator IPEN/MB-01 é uma instalação nuclear que permite a simulação de todas as características nucleares de um reator de grande porte em escala reduzida, sem que haja a necessidade de construir-se um complexo sistema de remoção de calor. Esse tipo de reator é conhecido mundialmente como reator de potência zero ou Unidade Crítica, sendo no nosso caso, projetado para operar a uma potência máxima de 100 watts. Esses reatores representam uma ferramenta básica, que permitem aos pesquisadores estudar não apenas por cálculos teóricos, mas também com medidas experimentais, o desempenho e as características do núcleo de um reator de potência ou de propulsão naval, antes da sua efetiva instalação, simulando as condições de projeto na própria instalação.

A filosofia que norteou o projeto do reator IPEN/MB-01, foi no sentido de se projetar e testar um núcleo típico para uso em propulsão naval, ou seja, que o controle de reatividade se desse a partir da inserção ou retirada de barras de controle, contrariando o modelo de muitas unidades críticas em que o controle se dá pelo nível d'água no tanque moderador. Esse controle de reatividade por barras de controle é típico de reatores navais, em que se necessitam de rápidas variações de potência, a fim de se empreenderem manobras de fuga ou de perseguição.

Descrição do Reator

O primeiro núcleo do Reator IPEN/MB-01 possui a forma de paralelepípedo com dimensões ativas de 39x42x54,6 cm, sendo constituído de um arranjo de 28x26 varetas combustíveis e 48 tubos guias, destinados a inserção das varetas de controle/segurança, responsáveis pelo controle da reação em cadeia e desligamento do reator. Nesta configuração, dita retangular, temos um total de 680 varetas e um excesso de reatividade de aproximadamente 2415 pcm.

No entanto o núcleo do Reator Nuclear IPEN/MB-01 possibilita a montagem de diferentes arranjos críticos, ou seja configurações de núcleos, uma vez que foi projetado para que apresentasse a versatilidade e a flexibilidade

necessárias para tais finalidades. Para tal, a placa matriz que sustenta o núcleo do reator possui 900 furos espaçados entre si por 15 mm, em um arranjo de 30x30. Nesta placa matriz foram montados os arranjos críticos retangulares, quadrado e cilindrizado.

Figura 42 - Vista superior do Núcleo do Reator IPEN/MB-01.

As varetas combustíveis do reator são constituídas de tubos de aço inox AISI-304, contendo em seu interior um total de 52 pastilhas combustíveis de UO₂ enriquecidas a 4,3 %. A altura ativa da coluna de pastilhas é de 54,6 cm, sendo que cada pastilha possui uma altura de 1,05 cm e diâmetro de 0,849 cm . As extremidades não ativas das varetas são preenchidas com pastilhas de Al₂O₃. Os 48 tubos guias para as varetas absorvedoras de nêutrons (Barras de controle e segurança) estão dispostos em 4 grupos, contendo cada um deles 12 varetas absorvedoras, sendo dois grupos de barras de segurança e 2 grupos de controle, dispostos cada um deles em um quadrante do núcleo do reator. Cada conjunto de 12 varetas absorvedoras são unidas através de um corpo central, denominado aranha, o qual é ligado a uma haste de acionamento, que por sua vez é conectada a mecanismos acionados por magnetos energizados.

Para efeito de possível modelagem em cálculos neutrônicos, apresentam-se as Tabelas 15 a 18 dadas a seguir, em que são apresentadas detalhadamente as composições, bem como as geometrias das varetas

combustíveis e de controle do Reator IPEN/MB-01. O diagrama esquemático da vareta combustível e de controle, podem ser vistos no esquema a seguir.

Figura 43 - Diagrama esquemático das varetas combustíveis e de controle

A reatividade integral de cada barra de controle/segurança é suficiente para desligar o reator, ou seja, é de aproximadamente 3200 pcm. As barras de segurança apresentam as mesmas características geométricas das barras de controle, diferenciando das mesmas pelo material absorvedor de nêutrons utilizado, no caso B₄C e pelo fato de que durante a operação normal do reator, serem mantidas totalmente retiradas do núcleo ativo do mesmo, com o objetivo de desligá-lo com grande margem de segurança. As barras de controle são as responsáveis por manterem constantes a população de nêutrons, quando o mesmo atinge um certo nível fixo de potência.

Quando inseridas no núcleo, as barras de controle mantêm o nível de população neutrônica, através da absorção dos mesmos em seu material estrutural composto de uma liga de Ag-In-Cd, encapsulada num revestimento de aço inox austenítico.

Tabela 15 - Dados Geométricos da Vareta de Controle do Reator IPEN/MB-01

Material Absorvedor	Ag-In-Cd
Diâmetro do Absorvedor	0,832 cm
Diâmetro Externo do Revestimento	0,980 cm
Espessura do Revestimento	0,060 cm
Diâmetro Externo do Tubo Guia	1,200 cm
Espessura do Tubo Guia	0,035 cm

Tabela 16 - Dados Geométricos da Vareta Combustível do Reator IPEN/MB-01

	Combustível	UO ₂
	Diâmetro da pastilha	0,849 cm
Região Ativa	Diâmetro Externo do Revestimento	0,980 cm
	Espessura do Revestimento	0,060 cm
	Passo da Rede	1,500 cm
	Diâmetro da pastilha	0,949 cm
Região de Alumina	Diâmetro Externo do Revestimento	0,980 cm
	Espessura do Revestimento	0,060 cm
	Diâmetro Interno	0,730 cm
Região do Tubo Espaçador	Diâmetro Externo	0,849 cm
	Espessura do Revestimento	0,060 cm

Tabela 17 - Composição Isotópica da Vareta Combustível do Reator IPEN/MB-01.

	Elemento	Concentração (átomos/barn.cm)
Pastilha Combustível	U^{235}	1,0034E-03
	U^{238}	2,17938E-02
	O^{16}	4,55138E-02
Revestimento	Fe	5,67582E-02
	Ni	8,64435E-03
	Cr	1,72649E-02
	Mn^{55}	1,59898E-03
	Si	3,34513E-04
Pastilha de Alumina	Al	4,30049E-02
	O^{16}	6,45074E-02

Tabela 18 - Composição isotópica da Vareta de Controle do reator IPEN/MB-01.

	Elemento	Concentração (átomos/barn.cm)
Absorvedor	Ag^{107}	2,35462E-02
	Ag^{109}	2,18835E-02
	In^{113}	3,42506E-04
	In^{115}	7,65990E-03
	Cd	2,72492E-02
Revestimento, Tubo Guia e Tampão	Fe	5,67582E-02
	Ni	8,64435E-03
	Cr	1,72649E-02
	Mn^{55}	1,59898E-03
	Si	3,34513E-04

Todo o núcleo do reator, bem como os mecanismos de acionamento de barras, as guias para as aranhas e o amortecedor de queda de barras, é apoiado por uma estrutura suporte, fixada na parte superior por uma plataforma metálica, e na parte inferior mantida suspensa no interior do tanque moderador, o qual contém água tratada e desmineralizada, utilizada como elemento moderador da energia dos nêutrons.

Além das barras de controle e segurança, o sistema de controle de reatividade inclui um sistema de esvaziamento rápido do tanque moderador que provoca o desligamento do reator por perda do fluído moderador. No desligamento por barras, dito de primeiro nível, as 4 barras caem por gravidade no núcleo, a partir do sinal de corte de energia dos magnetos enquanto no desligamento de segundo nível, além de todas as 4 barras caírem, são abertas duas válvulas tipo borboletas de abertura rápida de 50,8 cm de diâmetro, situadas na parte inferior do tanque moderador, causando a retirada de toda água em aproximadamente 4 segundos.

A água como sabemos, é um elemento fundamental para a moderação da energia dos nêutrons rápidos de fissão, termalizando-os e com isso tornando a probabilidade de fissão dos núcleos de Urânio-235, muito maiores para os nêutrons de baixa energia, os chamados nêutrons térmicos. A água drenada caindo por gravidade é estocada no primeiro subsolo do reator, mais propriamente no Tanque de estocagem, onde ficará armazenada até ser novamente bombeada para o tanque moderador numa futura operação do reator, ou mesmo para tratamento da mesma, através de filtragem e controle de seu nível de condutividade em um vaso trocador de leito de resina mista ou mesmo para o controle de sua temperatura em trocadores de calor aquecedores ou resfriadores.

A instrumentação nuclear utilizada no controle e segurança do reator é constituída de 10 canais nucleares, divididos por função em 2 canais de partida (detectores BF_3), 2 de potência (Câmaras de Ionização Compensadas-CIC), 2 canais lineares (Câmaras de Ionização Não Compensadas-CINC), 3 canais de segurança na faixa de potência (2 CINC e 1 detector B-10) e 1 canal de segurança na faixa de partida (detector BF_3). Estes canais nucleares estão

situados ao redor do núcleo, dentro do tanque moderador em diversas cotas axiais, posicionados dentro de tubos de alumínio estanques à água.

A instrumentação nuclear é responsável pelo processamento dos sinais gerados nos detectores nucleares. Após o processamento, estes sinais são enviados para os indicadores de potência e de período na mesa de controle do reator e para os comparadores de sinais que fazem a lógica de proteção do reator. Existem vários valores de limiar operacionais ("set points") que constituem a rede de intertravamento dos canais nucleares. Assim, só para citar alguns exemplos, temos:

Contagem mínima de 2 cps nos canais de partida e seu respectivo canal de segurança, para habilitar a malha de partida;

Desligamento de sobrepotência (110 mwatts) de primeiro nível dos canais de partida;

Desligamento por sobrepotência (120 mwatts) de segundo dos canais de partida;

Desligamento por sobrepotência de primeiro nível (110 watts) para os canais de potência.

Desligamento por sobrepotência de segundo nível (120 watts) para os canais de potência.

Para se atingir a contagem mínima nos canais lineares e liberar a partida do reator é necessária a utilização de uma fonte de nêutrons de Am-Be de atividade de 1 Ci e intensidade de $2,5 \cdot 10^6$ nêutrons/s. Esta fonte fica armazenada no segundo subsolo do prédio do reator e durante a partida do mesmo é levada através de um pequeno carrinho preso a um cabo de aço a se posicionar na base inferior do tanque moderador, onde pode então sensibilizar os canais nucleares citados, evitando-se assim que a partida do reator se dê às cegas, ou seja numa faixa operacional em que os detectores dos canais de partida e de segurança não estejam aptos a monitorar a taxa de crescimento da população de nêutrons, quando do início de sua operação (partida do reator).

Outros intertravamentos se fazem presentes nos canais nucleares. Talvez o mais importante seja aquele referente ao período de crescimento da população neutrônica quando da supercriticalidade do reator, quando a população de nêutrons cresce exponencialmente. Assim, para períodos menores ou iguais a 17 segundos ocorrem o desligamento involuntário (“Scram”) de primeiro nível, com a correspondente queda das 4 barras . Para períodos menores ou iguais a 14 segundos ocorre o “Scram” de segundo nível, ou seja a abertura das válvulas para escoamento da água do tanque moderador.

Existem vários outros intertravamentos que impedem que o reator seja ligado numa condição insegura (Intertravamentos de Segurança), a até intertravamentos que provocam o desligamento do reator (Operacionais). Podemos citar vários que vão desde a abertura da porta de acesso da Célula Crítica (Saguão onde está o núcleo do reator), até condições inadequadas da água moderadora, que vai desde a baixa temperatura da mesma (menor de 17 graus) até um nível inadequado de condutividade.

Todos os sistemas citados (núcleo, tanque moderador, detetores dos canais nucleares, controle das barras, etc) estão situados dentro de um prédio estanque, mantido à pressão negativa, situada na faixa de -50 a -200 Pa (caso haja uma perda de estanqueidade o ar de fora é que entra), denominado de célula crítica, construído com paredes de concreto, com funções de confinamento e blindagem. Um dos intertravamentos de segurança é impedir a partida do reator caso a pressão negativa no interior da célula crítica não atinja a valores operacionais pré-estabelecidos em projeto, ou mesmo provocar o seu desligamento automático, caso a pressão negativa diminua em sua magnitude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. [HTTP://WWW.IEM.GOV.BR](http://www.iem.gov.br). **Reator Argonauta**, 2011. Acesso em: Agosto 2011.
2. [WWW.CDTM.BR](http://www.cdtm.br). Acesso em: Agosto 2011.
3. [WWW.IPEM.BR](http://www.ipem.br). <https://www.ipem.br/sitio/?idm=251>. Acesso em: 10 Agosto 2011.
4. TERREMOTO, L.A.A. **Apostila da Disciplina TNR5764 – Fundamentos de Tecnologia Nuclear – Reatores**, *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, Brasil, 2004*.
5. DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK. **Nuclear Physics and Reactor Theory**. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 1993.
6. LAMARSH, J. R. **Introduction to Nuclear Reactor Theory**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1966.
7. HETRICK, D. L. **Dynamics of Nuclear Reactors**. Chicago and London: The University of Chicago Press, 1971.
8. HOOGENBOOM, J.E.; VAN DER SLUIJS, A.R. **Neutron Source Strength Determination for On-line Reactivity Measurements**, *Ann. nucl. Energy*, **15**[12], 553-559(1988), pp. 212-213 (1997).
9. TANINAKA, H.; HASHIMOTO K. **Determination of Subcriticality and Effective Source Strength by Source Drop and Jerk Experiments**, *International Conference in Physics of Reactors “Nuclear Power: A Sustainable Resource”* Casino-Kursaal Conference Center, Interlaken, Switzerland, September 14-19, 2008.
10. TAMURA, S **Signal Fluctuation and Neutron Source in Inverse Kinetics Method for Reactivity Measurement in the Sub-critical Domain**, *J.Nucl.Sci.Technol*, 40[3], 153-157(2003).

11. SANTOS, A. et al., **Determinação Experimental das Abundâncias Relativas e Constantes de Decaimento de Nêutrons Atrasados pelo Método dos Múltiplos Transientes**, *International Nuclear Atlantic Conference*, Santos –Brasil, 2005.
12. SANTOS, A. et al, **Isothermal Experiments of The IPEN/MB-01 Reactor**, *International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments*, Light Water Moderated Reactor – LWR, pp. 58, NEA/NSC/DOC(2006) March 2009 Edition.
13. REUSS, P. **Neutron Physics**. Les Ulis Cedex A: EDP Sciences, 2008.
14. FANARO, L.C.C.B. **Determinação Experimental de Índices Espectrais por Varredura Gama de Vareta Combustível no Reator IPEN/MB-01**, *Tese de Doutorado, Anexo E* - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil, 2009.
15. ORNL, **Monte Carlo N-Particle Transport Code System**, MCNP4C, *RSICC Computer Code Collection*, Oak Ridge National Laboratory. Report CCC-700, 2001.
16. GONÇALVES, L. B. **Calibração dos Canais Nucleares do Reator IPEN/MB-01, Obtida a partir da Medida de Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons Térmicos no Núcleo do Reator através da Irradiação de Folhas de Ouro Infinitamente Diluídas**. 2006.Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.
17. SHIMAZU, Y. **Some Technical Issues on Continuous Subcriticality Monitoring by a Digital Meter during Criticality Approach**, *J.Nucl.Sci.Technol*, 42[6],515-524 (2005).