

## AVALIAÇÃO DO SISTEMA SCALE 4.4a NO REATOR IPEN/MB-01

Alfredo Abe\*, Mitsuo Yamaguchi\*\*, Adimir dos Santos\*\* e Arlindo Gilson Mendonça\*

\*Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, CTMSP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária  
21945-970, São Paulo, Brasil

\*\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP  
Av. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária  
05508-000, São Paulo, Brasil

### RESUMO

O CTMSP (Centro Tecnológico da Marinha) é o responsável pelo programa de desenvolvimento da propulsão nuclear da Marinha do Brasil. Este programa abrange atividades desde o ciclo do combustível nuclear até a construção de um protótipo de um reator nuclear para propulsão naval. Para a condução segura das atividades do ciclo do combustível nuclear é mandatório uma análise de criticalidade, a fim de garantir a segurança contra criticalidade nuclear dos equipamentos, processos, arranjos e áreas de estocagem de uma instalação que processa material fissil. O objetivo deste trabalho é avaliar um sistema computacional, o sistema SCALE 4.4a, destinado a cálculo de criticalidade, adquirido recentemente junto ao RSICC (Laboratório Nacional de Oak Ridge - EUA). A avaliação desse sistema consiste em verificar as várias bibliotecas de seções de choque existentes e, as seqüências de cálculos através de um experimento crítico executado no Reator IPEN/MB-01. Adicionalmente é efetuada uma comparação com o sistema utilizado anteriormente, o sistema acoplado GAMTEC-II-KENO-IV, bem como com outros códigos como o MCNP, TORT e CITATION.

**Keywords:** criticality, SCALE, zero power reactor, MCNP, TORT, validation.

### I. INTRODUÇÃO

A análise de segurança quanto à criticalidade nuclear é pertinente a todas as atividades do ciclo do combustível nuclear, nas quais são manipuladas suficientes quantidades de materiais fisséis (urânio, plutônio, etc.). Estas atividades envolvem, por exemplo, as plantas de processamento químico e de enriquecimento de urânio, o transporte e estocagem de materiais contendo núclídeos fisséis, as etapas de fabricação de elementos combustíveis para reatores nucleares e o reprocessamento do combustível nuclear irradiado. As análises em questão sempre foram efetuadas pelas Divisões de Física de Reatores do CTMSP e IPEN/CNEN utilizando-se os códigos GAMTEC-II [1] e KENO-IV [2]. O código GAMTEC-II é utilizado para o cálculo celular, pesquisa da razão de moderação ótima e, preparação das seções de choque no formato Hansen-Roach para posterior utilização pelo código KENO-IV. Este, baseado no método de Monte Carlo, é utilizado para a determinação do fator de multiplicação de nêutrons do sistema.

Recentemente o CTMSP e o IPEN adquiriram oficialmente o sistema SCALE4.4a [3] junto ao RSICC (Radiation Safety Information Computational Center).

Esse sistema foi desenvolvido exclusivamente para a utilização em análise de criticalidade, que basicamente é um conjunto de códigos do sistema modular AMPX-II [4] acoplado ao código de Monte Carlo KENO-Va [5].

O objetivo do trabalho é avaliar o sistema SCALE4.4a utilizando o experimento de carregamento do núcleo do reator IPEN/MB-01.

### II. ANÁLISE DE CRITICALIDADE

A análise de segurança quanto à criticalidade nuclear de uma determinada instalação, equipamento ou recipiente, no qual são manipulados materiais fisséis (U-233, U-235 e Pu-239) consiste num conjunto de avaliações embasadas em critérios e normas de segurança [6, 7], visando garantir que a instalação e os equipamentos em questão não apresentem a possibilidade de sofrer um acidente de criticalidade nuclear, isto é, que a instalação e equipamentos mantenham-se subcríticos em qualquer circunstância de operação normal ou em casos de acidentes postulados. A análise basicamente consiste em quantificar o fator de multiplicação de nêutrons de um dado sistema, observando parâmetros tais como a geometria, composição,

arranjo e disposição, bem como a sua interação e o processo.

Normalmente a análise de um sistema, seja equipamentos ou arranjos, é efetuada utilizando um código de geração de um conjunto de seções de choque do sistema em questão com o GAMTEC-II e, um código de Monte Carlo como KENO-IV para quantificar o fator de multiplicação efetivo de nêutrons do sistema.

Com a recente aquisição do sistema SCALE 4.4a, destinado à análise de criticidade, pretende-se utilizar este sistema para todos os cálculos futuros de análises de criticidade. O CTMSP vem ao longo do desenvolvimento do programa de propulsão nuclear priorizando sempre a validação e, qualificação das ferramentas computacionais utilizados no seu projeto. Neste sentido, faz-se necessário avaliar e validar o sistema SCALE 4.4a, quanto a sua aplicabilidade para determinados tipos de problema. Assim, como parte inicial deste processo de validação selecionou-se um experimento crítico efetuado no reator IPEN/MB-01.

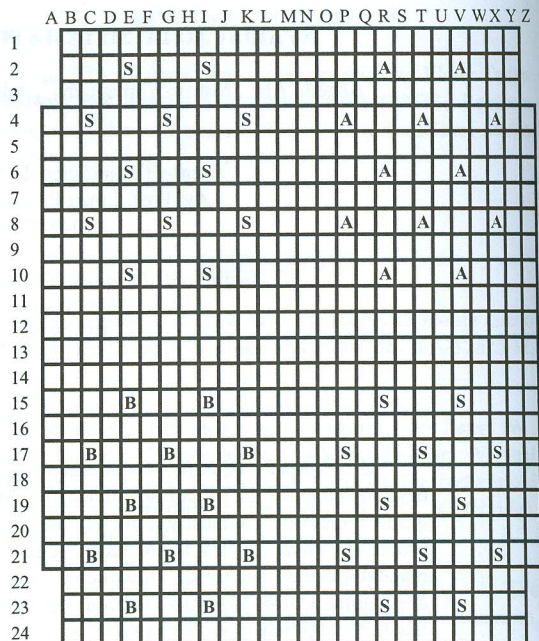
### III. EXPERIMENTO CRÍTICO

O reator IPEN/MB-01 é uma unidade crítica de baixa potência (máxima de 100 W) moderado a água leve, com o núcleo composto de varetas combustíveis num arranjo de 28 x 26 varetas, inseridas dentro de um tanque aberto de aço inox. O controle do reator é efetuado com um conjunto de varetas de controle constituídas de uma liga de Ag-In-Cd [8].

O núcleo foi carregado pela primeira vez durante a fase de comissionamento da instalação em novembro de 1988 [9]. O experimento de carregamento do núcleo, com a finalidade de obter a massa crítica do sistema, determinou o arranjo crítico do núcleo sem a presença das barras de controle. O arranjo final é uma matriz 24x24 sem as três varetas combustíveis em cada um dos cantos do quadrado (Figura 1).

### IV. SISTEMA SCALE 4.4a

A origem do sistema SCALE (Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation) remonta o início da década de 70, quando o Laboratório Nacional de Oak Ridge prestava serviço de suporte para o antigo AEC (Atomic Energy Commission), na utilização correta do então recente código KENO. Após a extinção do AEC, e a criação do NRC (Nuclear Regulatory Commission) iniciou-se o trabalho de desenvolvimento do SCALE, com objetivo de ser uma ferramenta modular de cálculo com as seguintes características: fácil utilização do ponto de vista do usuário para aplicações em instalações nucleares, uso de códigos computacionais e bibliotecas conhecidas e bem documentadas, uso automático das seqüências dos módulos funcionais e, disponibilidade de uma ampla e completa documentação de domínio público.



- A - Barra de Controle BC1 (Ag-In-Cd) - ausente
- B - Barra de Controle BC2 (Ag-In-Cd) - ausente
- S - Barra de Segurança - ausente
- - Combustível

Figura 1. Configuração Crítica Obtida no Carregamento.

A versão inicial do SCALE foi liberada pelo RSICC em 1980. Desde então o sistema tem sido constantemente aperfeiçoado e, atualmente encontra-se na versão 4.4a. A principal inovação desta versão consiste na interface gráfica GUI (Graphical User Interface), para o pré-processamento dos dados de entrada denominada CSPAN (Criticality Safety Input Processor for Analysis).

O módulo específico para a análise de criticidade no sistema SCALE é denominado CSAS (Criticality Safety Analysis Sequence), que provê uma série de seqüências automáticas de cálculos a serem executados utilizando diversos códigos como BONAMI, ICE, NITAWL-II, XSDRNPM, KENO-V.a e MODIFY.

As seqüências automáticas de cálculos visam principalmente reduzir ao máximo a possibilidade de introduzir erros de manipulação e, transferência de dados entre os códigos. A Tabela 1 ilustra as seqüências automáticas de cálculos existentes no módulo CSAS do sistema SCALE 4.4a.

Muitos dos códigos funcionais listados na Tabela 3 fazem parte do Sistema Modular AMPX-II ou AMPX-77. Dessa forma utiliza-se o mesmo formato e padrão dos arquivos como a AMPX Master e AMPX Working.

TABELA 1. Seqüências de Cálculo Existentes no CSAS

Seqüência	Códigos Funcionais
CSASI	BONAMI→NITAWL-II→ICE
CSASIX	BONAMI→NITAWL-II→ →XSDRNPM→ICE
CSASN	BONAMI→NITAWL-II
CSASIX	BONAMI→NITAWL-II→XSDRNPM
CSAS25	BONAMI→NITAWL-II→KENO-Va
CSAS2X	BONAMI→NITAWL-II→ →XSDRNPM→KENO-Va
CSAS4	BONAMI→NITAWL-II→KENO-Va→ →MODIFY
CSAS4x	BONAMI→NITAWL-II→XSDRNPM → →KENO-Va→MODIFY

Abaixo estão descritos sucintamente códigos ou módulos funcionais:

**BONAMI:** executa o tratamento da autoblindagem das ressonâncias pelo método de Bondarenko; produz como saída as seções de choque autoblindadas dependentes do problema no formato AMPX Master;

**NITAWL-II:** processa as seções de choque de nêutrons para o intervalo de ressonância utilizando a técnica de Integral de Nordhein; converte o arquivo no formato Master para o arquivo AMPX Working e, agrupa a matriz de transferência da seção de choque elástica e inelástica;

**XSDRNPM:** executa o cálculo celular com a resolução numérica da equação de transporte de nêutrons em geometria unidimensional pelo método da ordenada discreta, para geração das seções de choque ponderadas na energia e no espaço;

**ICE:** formata as seções de choque de nêutrons apropriadamente na forma de mistura para o cálculo de Monte Carlo;

**MODIFY:** executa alterações dimensionais para cálculos envolvendo a determinação de dimensões críticas;

**KENO-Va:** executa o cálculo do fator de multiplicação efetivo de nêutrons de um sistema multidimensional utilizando o método de Monte Carlo, em uma estrutura multigrupo de energia.

Necessariamente, todas as seqüências de cálculos iniciam-se com os códigos BONAMI e NITAWL-II, responsáveis pelo tratamento da autoblindagem e formatação de arquivos. Os demais códigos subseqüentes a serem acoplados dependem basicamente do objetivo do cálculo do usuário. Assim, exemplificando, na seqüência CSAS2X (observar que todas as seqüências com a terminação X envolvem cálculos com o código XSDRNPM), o cálculo inicia-se com os códigos BONAMI e NITAWL-II para o processamento das autoblindagem das ressonâncias, seguido do cálculo celular com o código XSDRNPM, para a ponderação das seções de choque e finalmente o cálculo do fator de multiplicação efetivo com o código KENO-Va.

O sistema SCALE possui um conjunto de 9 bibliotecas de seções de choque "independentes". No

entanto, apenas quatro bibliotecas são normalmente utilizadas para os cálculos envolvendo análise de criticalidade. A Tabela 2 apresenta estas bibliotecas.

TABELA 2. Bibliotecas de Seções de Choque Utilizadas pelo Módulo CSAS

Biblioteca	Origem dos Dados (estrutura de grupos de energia)
HANSEN-ROACH	Hansean Roach (16 grupos de energia)
27GROUPNDF4	ENDF/B-IV (27 grupos de energia)
44GROUPNDF5	ENDF/B-V (44 grupos de energia)
238GROUPNDF5	ENDF/B-V (238 grupos de energia)

Com relação às bibliotecas listadas na Tabela 2, é importante mencionar algumas características particulares de cada uma: 1) a biblioteca denominada 27GROUPNDF4 é subdividida em 14 grupos na faixa de energia rápida e, 13 na faixa de energia térmica; 2) a biblioteca denominada 238GROUPNDF5 é subdividida em 148 grupos na faixa de energia rápida e, 90 na faixa de energia térmica; além disso, possui dados de ressonância resolvida e não resolvida para a maioria dos núcleos; 3) a biblioteca denominada 44GROUPNDF5, consiste numa versão colapsada da biblioteca 238GROUPNDF5; e 4) a biblioteca denominada HANSEN-ROACH, possui a maioria dos dados da biblioteca original Hansen Roach, com a inserção de dados dos núcleos mais importantes provenientes da biblioteca 27GROUPNDF4.

A utilização e a escolha de uma determinada biblioteca de seções de choque é bastante dependente do tipo de problema a ser analisado. No entanto, recomenda-se em caso de dúvidas utilizar a biblioteca com a maior estrutura de grupos de energia (238GROUPNDF5). Uma aplicação típica para a análise de criticalidade utilizando o sistema SCALE, normalmente, utiliza as seqüências CSAS25 e CSAS2X.

## V. SISTEMA NJOY/AMPX-II/TORT

Também com o objetivo de avaliar o sistema SCALE comparando-o com outros códigos, bibliotecas de seções de choque e diferentes metodologias, o mesmo experimento (carregamento do núcleo do reator IPEN/MB-01) foi analisado com outros os sistemas normalmente utilizados nas Divisões de Física de Reatores do CTMSP e IPEN/CNEN-SP.

Descreve-se a seguir outros sistemas utilizados neste trabalho para efeito de comparação com os resultados obtidos com o sistema SCALE.

Inicialmente, o sistema acoplado NJOY/AMPX-II/TORT consiste na combinação de três sistemas independentes. O sistema modular NJOY [10] é responsável pelo pré-processamento das seções de choque, acessando os

dados da biblioteca de dados nucleares básica como ENDF, JENDL, CENDL, BROND, etc. No sistema NJOY é efetuada uma série de tratamentos como: o alargamento Doppler, reconstrução das ressonâncias resolvidas e não resolvidas, efeitos de temperatura, efeitos na matriz de espalhamento com modelos apropriados como  $S(\alpha, \beta)$ , ponderação energética em multigrupo com várias formas de espectro de nêutrons.

O código TORT [11], que faz parte do sistema DOORS-3.2, faz o cálculo de transporte em geometria tridimensional utilizando o método das ordenadas discretas. A biblioteca de seções de choque é gerada com o sistema AMPX-II, que consiste num conjunto de códigos como ROLAIDS, RADE, DIAL, NITAWL, XSDRNPM. O arquivo resultante do sistema AMPX-II é formatado com o programa GIP, para posterior utilização pelo código TORT.

## VI. SISTEMA NJOY/MCNP

Atualmente, o código MCNP [12] representa o estado da arte em código de Monte Carlo. Muitos utilizam freqüentemente como um padrão numérico para proposta de verificação e validação. Assim, neste trabalho o código MCNP será utilizado de duas formas: na sua forma padrão com as bibliotecas de seções de choque que acompanham a distribuição do código e, alternativamente, será elaborada de forma independente uma biblioteca de seções de choque, utilizando para tanto os dados nucleares básicos provenientes das bibliotecas ENDF/B-IV, ENDF/B-VI, JENDL-2, JENDL 3.2 e JEF-2.2. As bibliotecas de seções de choque na forma pontual e, no formato adequado do código MCNP serão geradas pelo sistema modular NJOY.

O pré-processamento inicia-se como :

**RECONR:** reconstrói explicitamente a dependência energética das seções de choque numa forma pontual e num "grid" único de energia, a partir dos parâmetros de ressonância e das leis de interpolação da ENDF/B. As seções de choque resultantes são escritas em um arquivo denominado PENDF ("Point Wise Evaluated Nuclear Data File") que, possui a mesma padronização do formato ENDF. Neste ponto é pré-fixada a tolerância para a interpolação linear e, a quantidade de dígitos significativos para a representação dos dados;

**BROADR:** realiza o alargamento Doppler de todas as reações utilizando o arquivo PENDF. O alargamento é efetuado para uma dada temperatura de aplicação e o resultado final também é escrito em um novo arquivo PENDF;

**UNRESR:** produz seções de choque efetivas na região de ressonância não-resolvida utilizando o código ETOXS. Os dados são escritos na forma tabular contendo seções de choque em função da temperatura e "background cross sections" na região de ressonância não resolvida. O resultado é adicionado no arquivo PENDF;

**ACER:** formata as seções de choque no formato da biblioteca de seções de choque pontual do código MCNP.

Os módulos são acionados de forma seqüencial de maneira que, o arquivo de saída de um módulo constitui-se no arquivo de entrada do módulo subsequente.

## VII. SISTEMA NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION/CITATION

Os cálculos neutrônicos atualmente conduzidos para a análise dos experimentos no reator IPEN/MB-01 são constituídos dos seguintes códigos: NJOY, AMPX-II, HAMMER-TECHNION (ou HTEC) [13] e CITATION [14]. Além disso, são as ferramentas de base do cálculo do projeto do reator da INAP. Assim, uma das primeiras análises do experimento do carregamento do núcleo do reator IPEN/MB-01 foi executada utilizando este conjunto de códigos. Analogamente à descrição anterior do sistema constituído por NJOY e AMPX, este sistema foi utilizado para a geração de uma biblioteca de seções de choque no formato multigrupo do código HAMMER-TECHNION.

O código HAMMER-TECHNION executa o cálculo espectral de uma célula unitária e, produz um conjunto de seções de choque homogeneizadas e colapsadas numa estrutura de poucos grupos de energia (2 ou 4 grupos). Posteriormente, este conjunto de seções de choque em poucos grupos é utilizado pelo código CITATION que efetua o cálculo do reator utilizando a teoria de difusão de nêutrons.

## VIII. SISTEMA GAMTEC-II/KENO-IV

O sistema acoplado GAMTEC-II/KENO-IV tem sido até a presente data a ferramenta computacional básica da metodologia de análise de criticalidade do CTMSP. Especificamente o código KENO-IV, utilizado para a determinação do fator de multiplicação efetivo de nêutrons pode ser utilizado na forma acoplada com o código GAMTEC-II ou, de forma isolada utilizando a sua biblioteca de seções de choque (HANSEN-ROACH).

Portanto, estes códigos também foram utilizados para a simulação do experimento permitindo desta forma uma avaliação dos resultados dos cálculos de análise de criticalidade já efetuados até o momento.

A seguir é feita uma breve descrição dos códigos que compõem o sistema:

**GAMTEC-II:** executa o cálculo espectral de uma célula unitária unidimensional e, fornece um conjunto de seções de choque homogeneizadas numa estrutura de multigrupo. Pode ser gerado um conjunto com até 16 grupos de energia, compatível com estrutura de grupos da biblioteca HANSEN-ROACH;

**KENO-IV:** executa o cálculo do fator de multiplicação efetivo de nêutrons de um sistema multidimensional utilizando o método de Monte Carlo, em uma estrutura multigrupo de energia. Quando utilizado na forma isolada, acessa a biblioteca de seções de choque HANSEN-ROACH e o usuário deve necessariamente calcular o fator de diluição do sistema a fim de escolher corretamente o

conjunto de seções de choque do nuclídeo previamente autoblindada para o fator de diluição em questão.

### IX. AVALIAÇÃO DO SISTEMA SCALE 4.4a

O experimento de carregamento do núcleo do reator IPEN/MB-01 estabeleceu a condição de criticalidade com uma determinada quantidade de varetas combustível sem a presença das barras de controle. Este experimento permite avaliar de forma extensiva as metodologias de cálculo envolvidas numa seqüência típica de um cálculo de criticalidade, onde são consideradas as questões típicas como o processamento das seções de choque dos materiais envolvidos no sistema, cálculos celulares, efeitos de autoblindagem, modelagem geométrica do arranjo crítico.

O experimento serviu para a análise do sistema SCALE 4.4a pois, o resultado experimental é facilmente comparável com o valor calculado. Normalmente, os resultados experimentais são difíceis de serem comparados diretamente com o valores calculados. Em geral, devem ser tratados adequadamente através de fatores de correções, normalizações e, muitas vezes necessitam de parâmetros calculados como seções de choque, fazendo com que tais manipulações dificultem a comparação direta com o cálculo. Assim, a vantagem deste experimento é a ausência de tais elementos no resultado experimental.

Basicamente a avaliação será efetuada considerando as seguintes etapas:

- i) cálculos celulares para determinação do fator de multiplicação infinito de nêutrons, com diferentes bibliotecas de seções de choque disponíveis no sistema SCALE4.4a: HANSEN ROACH, 27GROUPNDF4, 44GROUPNDF5 e 238GROUPNDF5;
- ii) cálculos celulares para determinação do fator de multiplicação infinito de nêutrons, com diferentes seqüências de cálculo disponíveis no sistema: CSAS25, CSAS2X e CSAS1X;
- iii) cálculos celulares para determinação do fator de multiplicação infinito de nêutrons, com diferentes códigos: HAMMER-TECHNION, GAMTEC-II, XSDRPM e MCNP;
- iv) simulação da configuração crítica para determinação do fator de multiplicação efetivo de nêutrons com bibliotecas de seções de choque disponíveis no sistema SCALE4.4a: HANSEN ROACH, 27GROUPNDF4, 44GROUPNDF5 e 238GROUPNDF5;
- v) simulação da configuração crítica para determinação do fator de multiplicação efetivo de nêutrons com diferentes seqüências de cálculo: CSAS25 e CSAS2X;
- vi) simulação da configuração crítica para determinação do fator de multiplicação efetivo de nêutrons com diferentes códigos: TORT, CITATION, KENO-IV e MCNP.

A Tabela 3 apresenta os resultados relativos às três primeiras etapas da avaliação. São valores de fator de multiplicação infinito obtidos com diferentes códigos e os obtidos com o sistema SCALE 4.4a, utilizando diferentes

bibliotecas de seções de choque e diferentes seqüências de cálculo.

Os cálculos com o sistema SCALE 4.4a utilizando a seqüência CSAS1X corresponde basicamente a uma seqüência típica de cálculo celular. O tratamento das autoblindagens é efetuado no módulo BONAMI/NITAWL-II e, o cálculo espectral executado pelo código XSDRNPM. Desta forma, os resultados destes cálculos são determinísticos.

As outras duas seqüências executadas, CSAS25 e CSAS2X, diferem entre elas pela presença do módulo XSDRNPM na seqüência CSAS2X. Nesta seqüência, o módulo XSDRNPM efetua a homogeneização das seções de choque das quatro regiões (UO<sub>2</sub>, vazio, encamisamento e moderador) da célula unitária. Desta forma, a modelagem geométrica da célula no módulo KENO-Va possui apenas uma região. A seqüência CSAS25 requer a modelagem explícita da célula unitária no módulo KENO-Va, uma vez que, as regiões da célula unitária não são homogeneizadas devido à ausência do módulo XSDRNPM nesta seqüência.

Com relação aos resultados obtidos com outros códigos e, com o sistema SCALE observa-se:

- a) os fatores de multiplicação infinitos obtidos utilizando as bibliotecas HANSEN ROACH e 27GROUPNDF4 apresentam-se subestimados em relação aos valores das outras bibliotecas, independente da seqüência de cálculo utilizada;
- b) a biblioteca HANSEN ROACH produz sempre resultados superiores quando comparados com a biblioteca 27GROUPNDF4, independente da seqüência de cálculo utilizada;
- c) os valores do fator de multiplicação infinito obtidos com a biblioteca 44GROUPNDF5 são levemente superiores aos valores obtidos com a biblioteca 238GROUPNDF5;
- d) comparado com outros códigos de cálculos celulares, o código GAMTEC-II produz o maior valor do fator de multiplicação infinito;
- e) os resultados obtidos com HAMMER-TECHNION original e NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION são muito próximos;
- f) quanto aos resultados com o código MCNP, observa-se que a biblioteca elaborada utilizando os dados nucleares básicos proveniente da ENDF/B-VI apresenta resultados muito próximos da biblioteca ENDF/B-V (MCNPDAT);
- g) O resultado obtido com a biblioteca MCNPDAT6 que acompanha o código MCNP não concorda com o resultado obtido com a biblioteca ENDF/B-VI. Possivelmente a discordância encontra-se na versão da biblioteca, sendo a MCNPDAT6 uma versão desatualizada da biblioteca ENDF/B-VI.

Como o objetivo principal do trabalho não é efetuar comparações de bibliotecas dos outros códigos, considerações sobre as discrepâncias encontradas não serão abordados em profundidade.

É importante observar que o comportamento do resultado obtido com o sistema SCALE 4.4a são mais dependentes da biblioteca de seções de choque utilizada do

que a seqüência de cálculo. Adicionalmente, os resultados obtidos com a biblioteca HANSEN ROACH, encontram-se muito próximo do valor médio (1,34985) de todos os valores obtidos somente com o sistema SCALE 4.4a.

A Tabela 4 apresenta os resultados relativos às demais etapas da avaliação. São apresentados os resultados dos fatores de multiplicação efetivos obtidos com diferentes códigos e, os obtidos com o sistema SCALE 4.4a utilizando diferentes bibliotecas de seções de choque e, diferentes seqüências de cálculo.

Nas seqüências CSAS25 e CSAS2X adotou-se a modelagem explícita do núcleo do reator (configuração crítica), diferindo apenas a representação da célula unitária no módulo KENO-Va da seqüência CSAS2X, a célula foi representada através de uma região homogênea. As demais regiões como refletor, placa matriz inferior, intermediária e superior foram representadas explicitamente.

Para os outros códigos adotou-se as seguintes modelagens:

- a) no código MCNP foi adotada uma modelagem explícita de todo o núcleo, análoga à modelagem adotada no KENO-Va da seqüência CSAS25;
- b) no código CITATION, a modelagem geométrica adotada foi análoga à modelagem do KENO-Va da seqüência CSAS2X, uma vez que, as seções de choque da célula unitária foram homogeneizadas em uma região e colapsadas para quatro grupos de energia;
- c) no código KENO-IV isolado, isto é, utilizando a biblioteca HANSEN-ROACH, adotou-se duas modelagens distintas: uma explícita considerando quatro regiões na célula unitária e a outra modelagem considerando a célula unitária uma região homogênea;
- d) no código KENO-IV, quando acoplado com o código GAMTEC-II, a modelagem da célula unitária foi considerada uma região homogênea, pois o código GAMTEC-II é utilizado para homogeneizar a célula unitária;
- e) no código TORT foi adotada uma modelagem análoga a utilizada no código CITATION, pois as seções de choque da célula unitária foram previamente homogeneizadas e, colapsadas com o código XSDRNPM.

É importante observar que as diferenças existentes na modelagem do sistema reside somente na representação da célula unitária nos cálculos com os códigos KENO-IV e KENO-Va. Nos casos onde previamente se faz a homogeneização da célula unitária, esta região é representada por apenas uma célula quadrada, enquanto que para os casos sem a homogeneização, a célula é representada explicitamente com todas as suas regiões (UO<sub>2</sub>, vazio, encamisamento e moderador).

Com relação aos resultados obtidos com o sistema SCALE 4.4a e outros códigos observa-se:

- i) a biblioteca HANSEN-ROACH apresenta valores subestimados do fator de multiplicação efetivo, independente da seqüência de cálculo;
- ii) a biblioteca 44GROUPNDF5 apresenta os maiores valores do fator de multiplicação quando comparados

com as demais bibliotecas, independente da seqüência de cálculo;

- iii) os valores obtidos com a seqüência CSAS2X são sempre superiores aos valores obtidos com a seqüência CSAS25, independente da biblioteca utilizada;
- iv) o fator de multiplicação efetivo médio considerando-se os oito resultados obtidos com o sistema SCALE é de 1,00086, evidenciando um desvio muito pequeno. No entanto, excluindo-se apenas os resultados obtidos com a biblioteca HANSEN-ROACH, obtém-se um valor médio de 1,00303;
- v) com relação aos resultados obtidos com outros códigos, destacam-se os resultados obtidos com o sistema acoplado GAMTEC-II/KENO-IV e, o KENO-IV na forma isolada utilizando a biblioteca HANSEN-ROACH;
- vi) o código KENO-IV na sua forma isolada, utilizando a biblioteca HANSEN-ROACH apresenta as situações extremas: no caso homogêneo apresenta o menor valor do fator de multiplicação, enquanto que, no caso heterogêneo apresenta o maior valor. Nos casos em que o código KENO-IV é utilizado com a biblioteca HANSEN-ROACH, faz-se necessário a determinação do fator de diluição do sistema. Esse fator determina a escolha do nuclídeo autoblindado da biblioteca. Assim, nos casos onde existem autoblindagem, este procedimento não apresenta resultados adequados. Nos casos onde prevalece a diluição infinita, isto é, sistema com grandes dimensões geométricas onde o efeito da autoblindagem não predomina, a biblioteca HANSEN-ROACH apresenta resultados compatíveis;
- vii) quanto aos resultados obtidos com o código MCNP, destaca-se o valor obtido com a biblioteca JENDL-3.2. Como foi mencionado anteriormente, este trabalho não se propõe a discutir a qualidade dos dados nucleares; no entanto é razoável apontar que existe algum problema com a biblioteca JENDL-3.2, uma vez que, esta apresenta um resultado bastante superestimado em relação aos demais.

TABELA 3. Fatores de Multiplicação Infinitos da Célula Combustível do Reator IPEN/MB-01

Código	Biblioteca	$k_{inf}$
HTEC Original	ENDF/B-IV	1,341591
GAMTEC	-----	1,36070
NJOY/AMPXII/HTEC	ENDF/B-IV+JENDL2 (U238)	1,34017
NJOY/AMPXII/XSDRNPM	ENDF/B-IV+JENDL2 (U238)	1,34700
MCNP	ENDF/B-V (DLC105C/MCNPDAT)	1,35713 ± 0,00036
MCNP	ENDF/B-VI (DLC181/MCNPDAT6)	1,34309 ± 0,00038
MCNP	ENDF/B-IV+JENDL2 (U238)	1,34899 ± 0,00034
MCNP	ENDF/B-VI	1,35800 ± 0,00035
SCALE 4.4a (CSAS25)	ENDF/B-V (238 grupos)	1,35242 ± 0,00014
SCALE 4.4a (CSAS25)	ENDF/B-V (44 grupos)	1,35422 ± 0,00015
SCALE 4.4a (CSAS25)	ENDF/B-IV (27 grupos)	1,34398 ± 0,00013
SCALE 4.4a (CSAS25)	HANSEN-ROACH	1,34814 ± 0,00013
SCALE 4.4a (CSAS2X)	ENDF/B-V (238 grupos)	1,35180 ± 0,00013
SCALE 4.4a (CSAS2X)	ENDF/B-V (44 grupos)	1,35418 ± 0,00011
SCALE 4.4a (CSAS2X)	ENDF/B-IV (27 grupos)	1,34509 ± 0,00011
SCALE 4.4a (CSAS2X)	HANSEN-RAOCH	1,34881 ± 0,00011
SCALE 4.4a (CSAS1X)	ENDF/B-V (238 grupos)	1,35172
SCALE 4.4a (CSAS1X)	ENDF/B-V (44 grupos)	1,35412
SCALE 4.4a (CSAS1X)	ENDF/B-IV (27 grupos)	1,34488
SCALE 4.4a (CSAS1X)	HANSEN-ROACH	1,34886

CSAS25 – Seqüência BONAMI-NITAWL-KENO-Va (“mirror boundary condition”)

CSAS2X – Seqüência BONAMI-NITAWL- XSDRNPM (“cell weighted”)-KENO-Va (“mirror boundary condition”)

CSAS1X – Seqüência BONAMI-NITAWL-XSDRNPM

TABELA 4. Fatores de Multiplicação Efetivos (Configuração Crítica do Reator IPEN/MB-01)

Código	Biblioteca	$k_{ef}$
GAMTEC-II/KENO-IV	Via GAMTEC-II	1,02225 ± 0,00027
KENO-IV**	HANSEN-ROACH	0,95435 ± 0,00276
KENO-IV***	HANSEN-ROACH	1,02722 ± 0,00073
CITATION	ENDF/B-IV+JENDL2 (U238)	0,996353
TORT	ENDF/B-IV+JENDL2 (U238)	1,00795
TORT	ENDF/B-VI (release 5)	1,00458
MCNP	ENDF/B-IV+JENDL2 (U238)	1,004134 ± 0,00030
MCNP	ENDF/B-VI (release 5)	1,002300 ± 0,00023
MCNP	JEF-2.2	1,005410 ± 0,00023
MCNP	JENDL-3.2	1,010150 ± 0,00023
SCALE 4.4a (CSAS25)*	ENDF/B-V (238 grupos)	1,00152 ± 0,00025
SCALE 4.4a (CSAS25)*	ENDF/B-V (44 grupos)	1,00361 ± 0,00028
SCALE 4.4a (CSAS25)*	ENDF/B-IV (27 grupos)	1,00040 ± 0,00021
SCALE 4.4a (CSAS25)*	HANSEN-ROACH	0,99316 ± 0,00024
SCALE 4.4a (CSAS2X)*	ENDF/B-V (238 grupos)	1,00296 ± 0,00025
SCALE 4.4a (CSAS2X)*	ENDF/B-V (44 grupos)	1,00612 ± 0,00023
SCALE 4.4a (CSAS2X)*	ENDF/B-IV (27 grupos)	1,00354 ± 0,00023
SCALE 4.4a (CSAS2X)*	HANSEN-ROACH	0,99554 ± 0,00022

\* 16 milhões de histórias

CSAS25 – Seqüência BONAMI-NITAWL-KENOVa

CSAS2X – Seqüência BONAMI-NITAWL- XSDRNPM (“cell weighted”)-KENO-Va

\*\* Célula homogênea, \*\*\* Célula heterogênea

## X. CONCLUSÕES

O sistema SCALE4.4a, foi avaliado primeiramente através de um experimento executado no reator IPEN/MB-01. A avaliação consistiu em verificar as várias sequências automáticas de cálculo existentes no sistema, as bibliotecas de seções de choque. As atividades executadas na avaliação foram : determinação do fator de multiplicação infinita de nêutrons de uma célula unitária, determinação do fator de multiplicação efetivo de nêutrons da configuração crítica, obtida no experimento de carregamento do núcleo. Adicionalmente, os resultados obtidos com o sistema foram comparados com os resultados obtidos de outros códigos como : MCNP, TORT, HAMMER-TECHNION/CITATION e GAMTEC-2/KENO-IV.

De forma geral, a avaliação reproduziu resultados satisfatórios, com exceção dos resultados obtidos com a biblioteca HANSEN-ROACH. É importante salientar que o resultado com GAMTEC-2/KENO-IV estão superestimados quando comparado com sistema SCALE4.4a, tendendo sempre a favor da segurança.

Até a presente data a ferramenta computacional básica utilizada no CTMSP e IPEN/CNEN tem sido sistema GAMTEC-II/KENO-IV para a análise de criticidade, e os resultados obtidos comprovam que as análises já efetuadas tendem estar superestimados, portanto mais seguros do ponto de vista de criticidade.

Trabalhos futuros de avaliação do sistema SCALE4.4a, ainda devem ser efetuados para problemas envolvendo soluções homogêneas e misturas com grau de enriquecimento compatível com as necessidades do CTMSP.

## REFERÊNCIAS

- [1] Carter, L. L., at alli; **GAMTEC-II: A Code for Generating Consistent Multigroup Constants Utilized in Diffusion and Transport Theory Calculations**, Pacific Northwest Laboratory report BNWL-35, March 1965 .
- [2] Petrie, L. M.; **KENO-IV: An Improved Monte Carlo Program**, Oak Ridge National Laboratory report ORNL-4938, 1975.
- [3] Horwedel, J. E.; Bowman, S. M., **SCALE4.4a: Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation**, Oak Ridge National Laboratory, March 2000.
- [4] Ferreira, C. R., Santos, A., **Análise de Criticidade Utilizando os Sistemas NJOY, AMPX-II e KENO-IV**, Anais do VII ENFIR, Recife, PE, Abril 1989.
- [5] Petrie, L. M.; Landers, N. F., **KENO-V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program with Supergrouping**, Oak Ridge National Laboratory, March 2000.
- [6] **Handbook on Criticality (Vols. I, II e III)**; Gesellschaft fur Reaktorsicherheit (GRS) MBH, Forschungsgelände ,8046 Garching 1980.

- [7] **Norma Técnica CNEN-5.1**, Transporte de Materiais Radiativos.
- [8] **TEMA ESPECIAL DO IX-ENFIR**, Descrição do Reator IPEN/MB-01
- [9] Jerez, R. **Carregamento e Pré-Criticidade**. Relatório Técnico R410380035065-01-00 (Documento Interno), Novembro de 1988.
- [10] MacFarlane, R. E., Muir, D. W. and Boicurt, R. M., **NJOY 91.38 - A Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Cross Section from ENDF/B Evaluated Nuclear Data**, Oak Ridge National Laboratory, PSR-171, 1992.
- [11] Rhoades, W. A.; Simpson, D. B.; **The TORT Three-Dimensional Discrete Ordinates Nêutron/Photon Transport Code**, ORNL/TM-13221, 1991.
- [12] Briesmeister, J.F., **MCNP4C: Monte Carlo N-Particle Transport Code System**, Oak Ridge National Laboratory, CCC-700, April 2000.
- [13] Barhen, J.; Rhotenstein, W. and Taviv, E., **The HAMMER Code System Technion**, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.
- [14] Fowler, T. B.; Vondy, D. R. and Cunningham, G. W., **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Rev. 2, July 1971.

## ABSTRACT

CTMSP, a brazilian navy technological institute, is carrying out a program for developing nuclear propulsion. This program englobes activities from the nuclear fuel cycle up to the construction of nuclear prototype for the navy applications. In order to carry out the fuel activities in a safe way is mandatory a criticality analysis to ensure the nuclear criticality safety of the equipments, processes, lay-outs and storage area of facility that processes fissile materials. The objective of this work is to evaluate a computational system, the SCALE4.4a, specially designed for criticality analysis. This system was acquired recently from RSICC. The evaluation of this system consists of the analysis of an experiment performed at IPEN/MB-01 reactor. In addition to that, it will be performed a comparison another systems such as GAMTEC-II/KENO-IV as well as MCNP, TORT and CITATION.