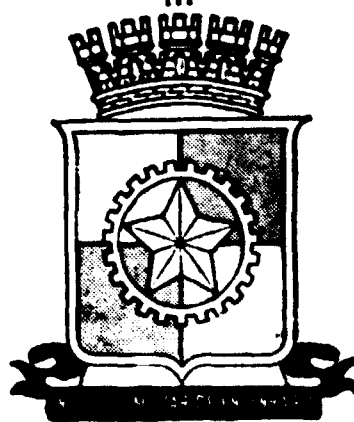


MINISTÉRIO DO EXÉRCITO
EME CTEx



TESE DE MESTRADO

QUALIFICAÇÃO DA NOVA VERSÃO
DO CÓDIGO HAMMER

Chao Tau Chia

IME

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

QUALIFICAÇÃO DA NOVA VERSÃO
DO CÓDIGO HAMMER

POR
CHAO TSU CHIA

TESE SUBMETIDA
COMO REQUISITO PARCIAL
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA NUCLEAR

Assinatura do Orientador da Tese


ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA BARROSO-Ph.D

Rio de Janeiro, RJ

Junho, 1984

a meus país

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Militar de Engenharia, em especial a Seção de Energia Nuclear, pelo Curso realizado.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear e ao PRONUCLEAR, pelo incentivo profissional concedendo-me bolsa de estudos.

Ao Ph.D. Antonio Carlos de Oliveira Barroso, orientador e amigo, pela dedicação, simpatia e confiança demonstrada em todo o tempo de convívio profissional, sobretudo durante a tese.

Ao M.Sc. Dalton Ellery Girão Barroso, professor, co-orientador e amigo, exemplo marcante de que a amizade e o respeito são grandes aliados do conhecimento, para a obtenção do sucesso no trabalho.

Ao D.Sc. Aquilino Senra Martinez e à M.Sc. Clotilde M. de Pina dos Santos, presenças de realce na Banca Examinadora, também pelas sugestões e estímulos posteriores.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear, pela participação através de seus profissionais e, em especial ao M.Sc. Marco Antonio Bayout Alvarenga e ao M.Sc. Auro Correia Pontedeiro.

À Universidade Federal do Paraná, pela forma
ção profissional, com minha eterna gratidão.

A todos os meus mestres, pelo conhecimentos
científicos e de Vida fornecidos.

Aos amigos de mestrado, Claudio, Manoel, Marco
Antonio, Maria João, Oswaldo, Pereira, e, em especial aos
companheiros de estudo, Alcino, Conti, Lamartine e Roque.

A todos os companheiros e funcionários da Se
ção de Energia Nuclear, e ao datilógrafo, Jorge.

Aos meus familiares, de sangue e coração, pe
lo apoio, compreensão e amor com que me acolhem.

A todos os meus Amigos, que me orientaram e
auxiliaram, e cujos nomes, apesar de não citados, sempre
se encontrarão em minhas lembranças.

SUMÁRIO

O código HAMMER versão TECHNION (HTEC) é um código elaborado para executar cálculos com precisão compatível com "benchmark analysis" podendo ser usado para fornecer parâmetros de poucos grupos para cálculo de reatores.

O código HTEC foi testado com os mais diversos tipos de experimento. Esses experimentos abrangem os parâmetros mais importante no cálculo neutrônico, como por exemplo a geometria e a composição da célula.

Os resultados do código foram analisados e comparados com valores experimentais e provenientes de outros códigos, tanto obtidos da literatura como simulados pelos códigos HAMMER e LEOPARD.

Os parâmetros usados para análise foram, além do K_{eff} :

R28 - razão entre as taxas de captura epícadmia e subcadmia do ^{238}U ;

D25 - razão entre as taxas de fissão epícadmia e subcadmia do ^{235}U ,

- D28 - razão entre as taxas de fissão no ^{238}U e ^{235}U ;
- C - razão entre a taxa de captura no ^{238}U e a taxa de fissão ^{235}U ;
- RC02 - razão entre as taxas de captura epícadmia e subcadmia do ^{232}Th .

A análise mostra que o código fornece resultados compatíveis com os dados experimentais e os fornecidos por outros códigos, com exceção dos cálculos efetuados com os perfis detalhados de ressonância dos isótopos de plutônio, que apresentaram resultados piores do que os obtidos a partir de parâmetros de ressonância.

Na maioria dos casos simulados, os resultados do HTEC se aproximam mais dos valores experimentais do que o HAMMER, desde que se evite o uso dos perfis detalhados nas seções de choque dos isótopos de plutônio.

O LEOPARD foi o melhor código no cálculo de células de urânio, contudo, quando se afasta de tais tipos de célula este código não é mais adequado. A vantagem do HTEC sobre o LEOPARD está na sua flexibilidade, pois fornece bons resultados também para outros tipos de células.

ABSTRACT

The TECHNION version of the HAMMER code (HTEC) can be used for the purposes of thermal reactor lattice benchmark analysis, and the preparation of few group lattice parameters to be used subsequently in reactor core calculations.

The HTEC code were tested with a great number of diferent type of experiments. This experiments covers the most important parameters in neutronic calculations, such as the cell geometry and composition.

The HTEC code results have been analysed and compared with experimental data and results given by the literature and simulated by HAMMER and LEOPARD codes.

The quantities used for analysis were K_{eff} and the following integral parameters :

R28 - ratio of epicadmium-to-subcadmium ^{238}U captures;

D25 - ratio of epicadmium-to-subcadmium ^{235}U fission;

D28 - ratio of ^{238}U fissions to ^{235}U fissions ;

C - ratio of ^{238}U captures to ^{235}U fissions;

RC02 - ratio of epicadmium-to-subcadmium
 ^{232}Th capture.

The analysis shows that the results given by the code are in good agreement with the experimental data and the results given by the other codes. The calculation that have been done with the detailed ressonance profile tabulations of plutonium isotopes shows worst results than that obtained with the ressonance parameters.

Almost all the simulated cases, shows that the HTEC results are closest to the experimental data than the HAMMER results, when one do not use the detailed ressonance profile tabulations of the plutonium isotopes.

The LEOPARD code have been the best code to calculate uranium cells, however, when one uses it to calculate others cells type the code is not adequate. The great advantage of HTEC over LEOPARD is it flexibility, because HTEC gives good results to others cells type rather than uranium.

ÍNDICE

SUMÁRIO	iv
ABSTRACT	vi
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xiv
FOLHA DE CONVENÇÕES	xv
I - INTRODUÇÃO.....	1
II - O CÓDIGO HTEC.....	3
2.1 - Principais Modificações Efetuadas no HAMMER.....	5
2.1.1 - Região Epitérmica.....	5
2.1.2 - Região Térmica.....	6
2.2 - Tratamentos Disponíveis para as Ressonâncias no HTEC.....	7
2.2.1 - Tratamento Integral de Nordheim Usando <u>Parâme</u> <u>tros</u> de Ressonância.....	7
2.2.2 - Tratamento Integral de Nordheim Usando <u>Perfís</u> <u>de</u> Ressonância.....	7
2.2.3 - Tratamento Integral RABBLE Usando <u>Perfís</u> de Ressonân <u>cia</u>	8

2.2.4 - Introdução no HTEC das Taxas de Reação calcula dos Externamente.....	10
III - RESULTADOS.....	12
3.1 - Experimentos com UO ₂	13
3.2 - Experimentos com U-metalico.....	19
3.3 - Experimentos com ²³³ UO ₂ - ²³² ThO ₂ ...	24
3.4 - Experimentos com UO ₂ -PuO ₂	26
3.5 - Experimentos com Pu-Al.....	28
3.6 - Variação do Kef.....	31
IV - COMPARAÇÕES COM O HAMMER E O LEOPARD...	35
V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	43
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GE RAIS DOS EXPERIMENTOS CRÍTICOS; NUMÉRICOS E EXPONENCIAIS.....	46
APÊNDICE B - DESCRIÇÃO DOS RETICULADOS UTILIZA DOS	47
APÊNDICE C - COMPARAÇÃO ENTRE A RAZÃO DAS TA XAS DE REAÇÃO DO HTEC E LEOPARD..	56
BIBLIOGRAFIA	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	: Constantes de multiplicação para experimentos com combustível de UO_2 , calculados pelo HTEC.....	15
TABELA 2	: Comparação entre os resultados calculados pelo HTEC com os experimentos numéricos NB.....	16
TABELA 3	: Comparação entre os resultados calculados pelo HTEC e os dados experimentais dos reticulados BNL	18
TABELA 4	: $\Delta\%$ dos valores das Tabelas 2 e 3.	18
TABELA 5	: Comparação dos resultados calculados pelo HTEC com os obtidos em outras referências para o experimento TRX.....	20
TABELA 6	: Comparação dos resultados calculados pelo HTEC com os obtidos em outras referências para o experimento MIT.....	21

TABELA 7	: Δ% dos parâmetros integrais dos experimentos TRX e MIT.....	23
TABELA 8	: Constantes de multiplicação calculados para o experimento $^{233}\text{UO}_2$ - - ThO_2 - H_2O	23
TABELA 9	: Comparação da razão entre as taxas de reações calculados pelo HTEC com os obtidos em outras referências para o experimento $^{233}\text{UO}_2$ - - ThO_2 - H_2O	25
TABELA 10	: Δ% dos valores calculados pelo HTEC em relação aos resultados experimentais para o experimento $^{233}\text{UO}_2$ - - ThO_2 - H_2O	25
TABELA 11	: K _{ef} das células de UO_2 - PuO_2	27
TABELA 12	: K _{ef} das células de Al-1.8%Pu.....	30
TABELA 13	: K _{ef} do experimento UO_2 - PuO_2 , usando perfís dos ^{240}Pu e ^{239}Pu	30
TABELA 14	: K _{ef} do experimento crítico de UO_2 .	37
TABELA 15	: K _{ef} dos experimentos NB e BNL....	37

TABELA 16	: Kef dos experimentos TRX e MIT...	39
TABELA 17	: Kef do experimento ThO ₂ -UO ₂	39
TABELA 18	: Kef do experimento UO ₂ -PuO ₂	41
TABELA 19	: Kef do experimento Al-1.8%Pu.....	41
TABELA 20	: Características dos experimentos críticos de UO ₂ com 4.75% de enriquecimento.....	48
TABELA 21	: Características dos experimentos numéricos NB.....	49
TABELA 22	: Especificações dos reticulados hexagonais TRX	50
TABELA 23	: Especificações dos reticulados hexagonais MIT.....	51
TABELA 24	: Especificações dos reticulados hexagonais ²³³ UO ₂ -ThO ₂	52
TABELA 25	: Características dos reticulados hexagonais UO ₂ -PuO ₂	53
TABELA 26	: Características dos reticulados hexagonais Al-Pu.....	55

TABELA 27	: Razão entre as taxas de reação do experimento NB1.....	57
TABELA 28	: Razão entre as taxas de reação do experimento NB4.....	57
TABELA 29	: Razão entre as taxas de reação do experimento NB5.....	57

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 : Variação do K_{ef} com o "buckling" para as células de UO_2 32
- Figura 2 : Variação do K_{ef} com o "buckling" para as células de UO_2 - PuO_2 32
- Figura 3 : Variação do K_{ef} com a razão V_m/V_c para as células de UO_2 34
- Figura 4 : Variação do K_{ef} com a razão V_m/V_c para as células de UO_2 - PuO_2 34

FOLHA DE CONVENÇÕES

- ID. - identificação do reticulado
- ENR. - enriquecimento
- O.D. - diâmetro externo
- V_m/V_c - razão entre volume de moderador e volume de combustível
- $\Delta\%$ - diferença percentual entre o valor de referência e o valor calculado
- H/Pu - razão entre número de átomos de hidrogenio e de plutônio

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O uso de códigos computacionais para simular experimentos, cujos resultados são bem conhecidos, é um dos principais meios que se pode empregar para teste dos conjuntos de dados nucleares básicos usados no cálculo de reatores. A precisão necessária para tais cálculos pode ser obtida com códigos usando o método de Monte Carlo, mas estes são muito dispendiosos computacionalmente.

O código HAMMER foi modificado por Barhen e Rothenstein¹ com a finalidade de capacitar o código de realizar cálculos com precisão compatível com a requerida para análise de dados nucleares básicos, sem o inconveniente do excesso de tempo computacional dos códigos que usam método de Monte Carlo. O código pode ser usado também para preparar parâmetros de poucos grupos para uso subsequente no cálculo de núcleos de reatores. O resultado deste trabalho foi denominado de HAMMER versão TECHNION (HTEC).

A presente tese teve como principal objetivo avaliar o desempenho do código HTEC, tentando determinar a precisão que pode se esperar dos seus resultados, para as configurações de interesse que o código pode calcular. Para tal, foi feita a análise dos resultados obtidos, contrapondo-os com dados experimentais e os de outros métodos numé

ricos, coletados da bibliografia ou obtidos usando-se outros códigos de uso comum que dispunhamos (LEOPARD e o HAMMER original).

Inicialmente, procedeu-se a uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de coletar experimentos que pudessem ser simulados pelo código. Nessa pesquisa procurou-se obter um espectro amplo de tipos de células e de combustível. Teve-se o cuidado, também, de englobar os diversos tipos de experimentos tais como: críticos, exponenciais e numéricos, cujas características estão descritas no Apêndice A. Obteve-se com isso uma visão global de comportamento do código.

No Capítulo II é apresentado um resumo do código e das modificações efetuadas no HAMMER na versão utilizada. É enfatizada a descrição dos tratamentos de ressonância disponíveis.

O Capítulo III engloba a descrição sucinta dos diversos tipos de células e a análise dos resultados obtidos pelo HTEC em comparação com dados experimentais e valores obtidos, da bibliografia, por outros códigos.

No Capítulo IV se encontra os testes das opções de ressonância internamente disponíveis e a análise dos resultados obtidos pelos códigos HTEC, HAMMER e LEOPARD, para as mesmas células descritas no Capítulo 3. Finalmente no Capítulo V são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO II

O CÓDIGO HTEC

O nome HAMMER ("Heterogeneous Analysis by Multigroup Methods of Exponentials and Reactors") refere-se à análise de arranjos experimentais, para o qual o código foi inicialmente empregado. Na presente versão, contudo, as seções que tratam da teoria de difusão de poucos grupos de reatores refletidos e não refletidos foram omitidas, de tal forma que o código, atualmente, pode ser utilizado para dois propósitos principais: análise de "benchmark" de reatores térmicos, como um dos programas para teste das bibliotecas ENDF/B, e a preparação de parâmetros de poucos grupos para uso posterior no cálculo de reatores.

Na análise de "benchmarks" o procedimento computacional deve ser o mais preciso possível, de forma que se possa assegurar que as incertezas devido às aproximações no método analítico sejam desprezíveis quando comparados com as incertezas nos dados nucleares. Isto foi tentado no HAMMER principalmente com a introdução dos tratamentos de ressonância que utilizam perfis detalhados de ressonância, uma vez que esses cálculos eram os mais problemáticos do código pois eram baseados exclusivamente no Tratamento Integral de Nordheim².

O HAMMER assim como o HTEC são códigos que utilizam a teoria de transporte combinando o procedimento THERMOS na faixa de energia térmica com as equações de transporte integral para o cálculo da célula unitária heterogênea. O espectro epitérmico de energia é obtido pelo método MUFT de multigrupo, o qual faz a correção da fuga por transformada de Fourier aplicado a todos os grupos de energia.

A versão modificada do código HAMMER usa perfis de ressonância na região das ressonâncias resolvidas. Um grande número de procedimentos diferentes podem ser utilizados no cálculo das taxas de reações nesta região. Estes incluem o Tratamento Integral de Nordheim padrão (NIT), um tratamento similar usando perfis de ressonância (NITPRO), assim como um código RABBLE³ (RABPRO) modificado de forma a poder usar perfis de ressonância; essas opções estão internamente disponíveis no código. Não foram simulados casos usando-se a opção RABPRO pois um trabalho anterior⁴, indicou a existência de erro nesta parte do código.

A presente versão do código HAMMER possui também opções de se inserir as taxas de reações das ressonâncias, calculados por outros códigos, no conjunto de cartões de entrada do HTEC. Essas taxas de reações devem se apresentar na estrutura de grupos do MUFT de forma a poder ser utilizado na análise epitérmica.

2.1 - Principais modificações efetuadas no HAMMER

2.1.1 - Região Epitérmica

O código HTEC permite usar, na região das ressonâncias resolvidas, arquivos de dados detalhados representados pelos perfís das seções de choque das ressonâncias. Esses perfís permitem descrever o alargamento Doppler com grande precisão. A nova técnica é opcional e evita o uso dos parâmetros de ressonância.

Perfís detalhados de ressonância são utilizados num código RABBLE adequadamente reformulado para cálculo das taxas de reação, dependentes no espaço e na energia, da célula unitária.

Um procedimento mais simples na utilização dos perfís de ressonância é também disponível. Consiste numa extensão do Tratamento Integral de Nordheim possibilitando o uso dos perfís. Neste caso pode-se ter situações em que alguns dos núclídeos sejam tratados através dos parâmetros de ressonância e outros por meio dos perfís de ressonância.

Por outro lado, as taxas de reação das ressonâncias calculadas por códigos mais sofisticados, utilizando os perfís detalhados de ressonância, podem ser fornecidas ao HAMMER e utilizadas na análise epitérmica.

As frações de absorção e fissão calculadas com "buckling" zero para a célula unitária heterogênea são e eliminadas após a homogeneização da célula unitária, usando para isso de uma seção de choque macroscópica equivalente do grupo MUFT. As seções de choque equivalentes são calculadas iterativamente preservando as taxas de reações calculadas pelo tratamento de transporte integral. Essas seções de choque de absorção e fissão do grupo fornecem o espectro corrigido pela fuga quando um "buckling" diferente de zero é fornecido.

Fluxos e correntes na estrutura de grupos do MUFT e parâmetros dos grupos epitérmicos largos são fornecidos tanto para um valor de fuga insignificante como para o "buckling" fornecido. Esses resultados são de valor para "benchmark analysis" e para determinar o efeito da fuga sobre os parâmetros dos grupos largos.

2.1.2 - Região Térmica

A modificação mais importante na região térmica foi a incorporação, como uma das opções do THERMOS, das probabilidades de escape baseados na formulação de Transporte Integral Discreto de Carlvik.

2.2 - Tratamentos disponíveis para as ressonâncias no HTEC

2.2.1 - Tratamento integral de Nordheim usando parâmetros de ressonância

O tratamento padrão de Nordheim é uma das opções disponíveis no código HAMMER modificado. Este método calcula as integrais efetivas de ressonância sobre a parte central de cada ressonância individualmente. O efeito de interferência entre ressonâncias diferentes não é levado em conta ou seja, o comportamento $1/E$ do fluxo é mantido no espaço entre as ressonâncias para fins de cálculo, quando o que ocorre é uma distorção deste comportamento. Um procedimento similar é usado na região das ressonâncias não resolvidas.

2.2.2 - Tratamento integral de Nordheim usando perfis de ressonância

A nova opção Nordheim (NITPRO) incluído no código HAMMER preserva o procedimento padrão (NIT) delineado acima usando perfis tabelados de ressonância ao invés dos parâmetros de ressonância na região das ressonâncias resolvidas. Como consequência, a integração numérica das equações de moderação são efetuadas sobre cada grupo MUFT em sua totalidade e não mais apenas sobre a parte central das ressonâncias contidas no grupo. Para esse fim uma subdivisão em letargia é definida. A densidade de colisão é calculada para cada letargia resolvendo as equações integrais usando a técnica de integração parcial de Simpson baseada em

"backvalues" armazenados para avaliar as integrais de moderação, ou seja, os valores já calculados são armazenados e utilizados na avaliação do resultado seguinte. Taxas de absorção são calculadas na sequência por integração numérica sobre uma malha de letargia mais fina, que percebe a forma do perfil da ressonância e interpola entre as densidades de colisão calculadas. O procedimento trata todas as ressonâncias resolvidas e contribuições suaves dos núclídeos ressonantes no combustível juntos, tanto a sequência de um núclídeo simples como para ressonâncias de diferentes núclídeos.

Quando mais de tres núclídeos ressonantes, são incluídos na região do combustível, é possível tratar de dois, se o combustível for um óxido, a tres, no caso de combustível metálico destes núclídeos pelo método NITPRO, para os remanescentes é utilizado o procedimento padrão de Nordheim.

2.2.3 - Tratamento integral RABBLE usando perfis de ressonância

Ao contrário do uso das integrais efetivas de ressonância para se determinar as taxas de reação correspondentes, o código RABBLE calcula as taxas de reação diretamente. Isto evita qualquer dúvida na definição e uso das integrais efetivas de ressonância, especialmente quando e

xistem misturas de nuclídeos ressonântes.

O tratamento RABBLE é um método de transporte integral onde as integrais de moderação são calculadas usando fórmulas de recorrência para grupos muito finos, e assume um fluxo isotrópico no sistema de laboratório e espalhamento isotrópico no sistema centro de massa.

No código HTEC uma opção baseada no procedimento RABBLE (RABPRO) foi incluído, usando os perfis tabelados de ressonância na região das ressonâncias resolvidas. O tratamento da moderação foi reestruturado. As integrais de moderação são calculadas em pontos discretos de letargia usando a técnica de integração parcial de Simpson como no procedimento Nordheim. O algoritmo da integração parcial por Simpson foi generalizado de forma a poder ser usado para um número arbitrário de nuclídeos em cada subdivisão das regiões da célula unitária. As probabilidades de colisão de região para região são calculadas pela aproximação "cosine currents-flat source". Um procedimento iterativo é usado para calcular a densidade de colisão em cada ponto de letargia em todas as subregiões.

A versão RABPRO do HTEC usa o perfil exato do alargamento Doppler das ressonâncias. Assim, não há mais dúvidas em saber quantas ressonâncias devem ser incluídas para calcular as seções de choque em cada energia, e não há mais qualquer separação artificial entre as ressonânci

as e as partes suaves das seções de choque.

As taxas de reação calculadas pela opção RABPRO são usadas diretamente no HTEC para calcular os parâmetros integrais, incluindo o Kef. Deve-se notar que a opção RABPRO não permite rodadas mistas, isto é, onde alguns nuclídeos ressonantes são descritos pelos seus perfís de ressonância e outros representados pelos parâmetros de ressonância. O limite, para combustível metálico, é de tres nuclídeos ressonantes na região do combustível.

2.2.4 - Introdução do HTEC das taxas de reação calculados externamente

Quando se deseja cálculos com precisão compatível com "benchmarks" um tratamento mais sofisticado pode ser utilizado. Tanto códigos que usam o método de Monte Carlo, REPC ou RECAP, como métodos baseados na opção de transporte integro-diferencial do código OZMA-1⁵ podem ser usados para esse proposito. As taxas de reação, normalizadas pelo termo de fonte, das ressonâncias calculadas por esses códigos na região das ressonâncias resolvidas podem ser introduzidas no HTEC usando uma estrutura de grupo apropriado. O código trabalha de forma a preservar as taxas de reação com "buckling" zero ao final dos cálculos de moderação da faixa epitérmica da célula unitária homogeneizada. O número de nuclídeos ressonantes, na região do combustível, que podem ser representados pelos seus perfís de ressonância depende, neste caso, do código externo utilizado, não sen

do mais limitado a tres como nas opções internamente dispo
níveis.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

Os resultados obtidos pelo HTEC foram comparados com resultados de experimentos críticos, exponenciais e numéricos. Esses experimentos foram classificados segundo o tipo de combustível e cobrem não só sistemas de UO_2 , mas também óxidos mistos PuO_2-UO_2 e $^{232}ThO_2-^{233}UO_2$, assim como U-metálico e Pu-Al. Esses experimentos cobrem uma ampla faixa de parâmetros de importância em projeto de reatores, tais como a razão entre volume de moderador e de combustível, tamanho da pastilha, enriquecimento de combustível, "buckling", etc.

Os parâmetros usados para comparação além do K_{eff} foram :

- R28 - razão entre as taxas de captura nas faixas e picadmia (ou epitérmica) e subcadmia (ou térmica) no ^{238}U ;
- D25 - razão entre as taxas de fissão nas faixas e picadmia e subcadmia no ^{235}U ;
- D28 - razão entre as taxas de fissão no ^{238}U e ^{235}U ;
- C - razão entre a taxa de captura no ^{238}U e a taxa de fissão no ^{235}U ;

RCO2 - razão entre as taxas de captura epícadmia e subcadmia no ^{232}Th .

Todos os experimentos foram simulados usando a opção NITPRO, usando-se os perfís detalhados de ressonância para os isótopos ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu e ^{240}Pu quando disponíveis e de acordo com as limitações impostas pelo código.

Todos os cálculos foram efetuados com a energia de corte padrão para o grupo térmico (0.625eV) e tres grupos rápidos com cortes nos grupos 20(67.38 KeV) e 26(3.355 KeV). Foram usados apenas tres regiões para cada célula, pastilha, revestimento e moderador.

Maiores detalhes sobre cada experimento podem ser encontrados no Apêndice B.

3.1 - Experimentos com UO_2

Os resultados calculados e os dados experimentais são mostrados nas Tabelas 1 a 4. Foram usados tres séries de experimentos para análise, uma série crítica⁶ (ID. 1-7), uma série numérica⁷ (NB) e uma exponencial⁷ (BNL).

Os experimentos numéricos (NB) consistem de tres células, sendo que a NB-1 é caracterizado por um baixo enriquecimento e um passo relativamente grande. O NB-4 é uma célula típica de PWR, enquanto que o NB-5 é um arranjo de alta conversão caracterizado por um arranjo estreito e um

espectro de neutrons duro. Os resultados deste experimento foram obtidos pelo valor médio dos códigos SAM-CE e PX-KENO que utilizam o método de Monte Carlo.

Na Tabela 1 são apresentados as características das células e o valor calculado de Kef de todas as células. Para os "benchmarks" numéricos e exponenciais os resultados dos parâmetros integrais e do Kef calculados pelo HTEC, além dos valores obtidos por outros códigos são mostrados nas Tabelas 2 e 3 respectivamente. A Tabela 4 mostra as diferenças percentuais dos valores calculados pelo HTEC em relação aos obtidos pelos experimentos.

A Tabela 1 mostra que o valor de Kef. é satisfatoriamente consistente com os dados experimentais para os experimentos críticos. Já no caso dos "benchmarks" numéricos e exponenciais é subestimado em até 3.3%, como mostra a Tabela 4.

O código EPRI-CELL⁷, cujos resultados estão na Tabela 2, é um código de teoria de transporte onde o espectro térmico de energia é calculado pelo THERMOS e o epitérmico pelo código GAM, modificado de forma a poder utilizar perfis detalhados de ressonância. Este código foi modificado de forma que os seus resultados pudessem se aproximar mais dos obtidos por Monte Carlo. Os resultados do método de Monte Carlo e do código EPRI-CELL foram obtidos com bibliotecas derivadas da ENDF/B-V, portanto, mais atualizado

TABELA 1 : Constantes de multiplicação para experimentos com combustível de UO_2 calculado pelo HTEC.

ID.	Diam.Pastilha (cm)	ENR. (wt%)	REV. O.D. (cm)	Passo (cm)	V_m/V_c	B_m^2 (m^{-2})	Kef
1	0.790±0.002	4.742	0.94	1.26	1.83	118.0	0.998
2				1.60	3.81	141.0	1.007
3				2.10	7.58	116.0	1.007
4				2.52	11.54	75.3	1.003
5				1.35	1.80	118.0	0.995
6				1.72	3.81	141.0	1.007
7				2.26	7.61	116.0	1.007
NB1	0.9728	1.3	1.1506	1.56	1.429	0.0	1.1263
NB4	1.0160	2.7	1.1895	1.46	1.260	0.0	1.3136
NB5	0.9350	3.0	1.0580	1.17	0.434	0.0	1.1126
BNL1	1.128	3.0	1.267	1.719	1.319	56.60	0.967
BNL2				1.819	1.632	65.81	0.967
BNL3				1.957	2.091	70.49	0.976
BNL4				2.169	2.863	70.22	0.984
BNL5				2.466	4.071	61.73	0.984

TABELA 2 : Comparação entre os resultados calculados pelo HTEC com os experimentos numéricos NB

	NB-1	NB-4	NB-5
Kef Monte Carlo	1.1471	1.3424	1.1456
HTEC	1.1263	1.3136	1.1126
EPRI-CELL	1.1424	1.3384	1.1405
R28 Monte Carlo	1.363	2.654	8.503
HTEC	1.453	2.849	9.283
EPRI-CELL	1.371	2.654	8.536
D25 Monte Carlo	0.0803	0.1594	0.5480
HTEC	0.0846	0.1649	0.5859
EPRI-CELL	0.0814	0.1570	0.5488
D28 Monte Carlo	0.0722	0.0617	0.1330
HTEC	0.0709	0.0613	0.1338
EPRI-CELL	0.0707	0.0614	0.1321
C Monte Carlo	0.7977	0.5494	1.006
HTEC	0.8210	0.5739	1.068
EPRI-CELL	0.8003	0.5509	1.007

do que a ENDF/B-IV utilizado pelo HTEC. Estas são as principais razões do HTEC ter apresentado resultados piores do que o EPRI-CELL em relação aos valores calculados por Monte Carlo, como mostra a Tabela 2. Por outro lado o espectro muito duro na célula NBS é um teste rigoroso para o tratamento epitérmico do HTEC, por essa razão os resultados foram os mais discrepantes.

O MURLI⁸ um código indiano, que utiliza teoria de transporte com 69 grupos de energia, a estrutura do código WIMS e a biblioteca inglesa "U.K. Nuclear Data Files". Ele foi bastante usado para comparação devido a sua precisão no cálculo de reticulados de água leve. Sua peculiaridade de poder ser acomodado em pequenos computadores de 32K de memória o torna bastante interessante.

Para o experimento exponencial os valores mostram que tanto os resultados do HTEC como os do código MURLI subestimam o valor de K_{ef} sendo que os resultados obtidos pelo HTEC são um pouco piores. O valor de R28 está muito discrepante em relação ao valor experimental, variando de 15% a 10.6% do valor experimental, como mostra a Tabela 4. Os resultados de D28 concordam razoavelmente bem com os dados experimentais e o obtido pelo MURLI.

As diferenças dos resultados do HTEC em relação ao experimento exponencial podem ser, em parte, atribuídas às incertezas relativamente grandes das medidas experimentais

TABELA 3 : Comparação entre os resultados calculados pelo HTEC e os dados experimentais dos reticulados BNL

	Kef			R28			D28		
	expt.	HTEC	MURLI	expt.	HTEC	MURLI	expt.	HTEC	MURLI
BNL-1	1.00	0.967	0.993	2.92	3.24	2.93	0.065	0.066	0.065
BNL-2	1.00	0.967	0.990	2.41	2.63	2.39	0.056	0.057	0.055
BNL-3	1.00	0.976	0.988	1.81	2.08	1.84	0.048	0.047	0.045
BNL-4	1.00	0.984	0.989	1.41	1.56	1.46	0.037	0.038	0.036
BNL-5	1.00	0.984	0.983	1.04	1.16	1.07	0.031	0.030	0.029

TABELA 4 : $\Delta\%$ dos valores das Tabelas 2 e 3

	$\Delta\%$					
	Vm/Vc	Kef	R28	D25	D28	C
NB-5	0.434	-2.881	9.173	6.916	0.602	5.368
NB-4	1.260	-2.145	7.347	3.450	-0.648	4.459
BNL-1	1.319	-3.3	10.959		1.539	
NB-1	1.429	-1.813	6.603	5.355	-1.801	2.921
BNL-2	1.632	-3.3	9.128		1.786	
BNL-3	1.957	-2.4	14.917		-2.083	
BNL-4	2.863	-1.6	10.638		2.703	
BNL-5	4.071	-1.6	11.539		-3.226	

que ocorrem em tais experimentos, principalmente no que se refere ao "buckling". Por outro lado as diferenças em relação ao código MURLI são devidos à estrutura de grupos e a biblioteca básica utilizada.

3.2 - Experimentos com U-metálico

Para esse tipo de combustível foram usados os "benchmarks" TRX⁹ e MIT¹⁰. No caso dos experimentos TRX (Tabela 5) os valores obtidos pelo HAMMER/REPC¹¹, calculados por Rothenstein, são ligeiramente melhores do que os obtidos pelo HTEC, enquanto que os resultados do HTEC, em geral, concordam melhor com os valores experimentais do que os obtidos pelo MURLI. A exceção é feita no cálculo do Kef onde obteve-se resultados ligeiramente piores. Neste experimento os valores calculados pelo HTEC de C e D28 estão dentro do erro experimental.

Para o "benchmark" MIT a Tabela 6 mostra que os resultados do HTEC e os obtidos pelo HTEC-IEAv¹² são bastante semelhantes, enquanto que os do HAMMER/REPC são ligeiramente melhores. Nos experimentos MIT os valores de Kef do HTEC também possuem menor precisão.

Esses resultados de certa forma eram esperados pois os resultados do HAMMER foram obtidos usando Monte Carlo para o cálculo da região das ressonâncias resolvidas, código REPC, enquanto que no HTEC-IEAv foi usado o HTEC com as bibliotecas geradas no IEAv.

TABELA 5 : Comparação dos resultados calculados pelo HTEC com os obtidos em outras referências para o experimento TRX

$V_m/V_c =$	TRX-3 (1.00)	TRX-1 (2.35)	TRX-2 (4.02)	TRX-4 (8.11)
Kef expt.	1.000	1.000	1.000	1.000
HAMMER	0.9935	0.9880	0.9921	0.9974
MURLI	0.998	1.005	0.999	0.997
HTEC	1.0483	0.986	0.9916	1.0197
R28 expt.	3.03±0.05	1.32±0.0021	0.837±0.016	0.481±0.011
HAMMER	3.07	1.367	0.846	0.491
MURLI	2.94	1.276	0.796	0.465
HTEC	3.14	1.387	0.861	0.493
D25 expt.	0.231±0.003	0.0987±0.001	0.0614±0.0008	0.0358±0.0005
HAMMER	0.235	0.0994	0.0612	0.0345
MURLI	0.225	0.0963	0.0587	0.0346
HTEC	0.242	0.1017	0.0622	0.0356
D28 expt.	0.167±0.008	0.0946±0.0041	0.0693±0.0035	0.0482±0.0020
HAMMER	0.174	0.0944	0.0666	0.0467
MURLI	0.170	0.0948	0.670	0.466
HTEC	0.164	0.0956	0.0675	0.0470
C expt.	1.255±0.011	0.797±0.008	0.647±0.006	0.531±0.004
HAMMER	1.252	0.799	0.640	0.527
MURLI	1.238	0.783	0.634	0.527
HTEC	1.265	0.804	0.645	0.527

TABELA 6 : Comparação dos resultados calculados pelo HTEC com os obtidos em outras referências para o experimento MIT

$V_m/V_c =$	MIT-1 (20.76)	MIT-2 (25.89)	MIT-3 (36.61)
Kef expt.	1.000	1.000	1.000
HAMMER	0.9905	0.9897	0.9921
HTEC-IEAv	0.9861	0.9862	0.9886
HTEC	0.9858	0.9857	0.9881
R28 expt.	0.502±0.010	0.400±0.004	0.313±0.005
HAMMER	0.500	0.411	0.316
HTEC-IEAv	0.513	0.422	0.328
HTEC	0.512	0.421	0.327
D25 expt.	0.0469±0.0019	0.0335±0.003	0.0265±0.0011
HAMMER	0.0462	0.0376	0.0294
HTEC-IEAv	0.0453	0.0373	0.0290
HTEC	0.0458	0.0376	0.0292
D28 expt.	0.0588±0.003	0.0587±0.0030	0.0575±0.0030
HAMMER	0.0579	0.0562	0.0546
HTEC-IEAv	0.0571	0.0554	0.0538
HTEC	0.0569	0.0553	0.0537
C expt.	1.017±0.023	0.948±0.020	0.859±0.016
HAMMER	0.965	0.913	0.856
HTEC-IEAv	0.974	0.920	0.864
HTEC	0.972	0.918	0.866

Na Tabela 7 são mostrados as diferenças percentuais dos parâmetros analisados, indicando que os resultados das células TRX concordam melhor com os valores experimentais do que os obtidos para MIT.

Pode-se ver nesses experimentos que não houve grandes variações entre os resultados calculados pelos códigos como ocorreram para os experimentos NB e BNL. Convém notar que estes experimentos, principalmente os da série TRX, são bastante precisos e são normalmente usados para avaliação e ajustes de bibliotecas derivadas da ENDF/B. Era de se esperar portanto, que os códigos apresentassem bons resultados nesses testes.

As Tabelas 7 e 4, que mostram as diferenças percentuais dos índices espectrais dos isótopos de urânio, possuem muitos pontos em comum. O mais evidente é a superestimativa da razão entre as taxas de captura do ^{238}U . Esta é uma falha inerente à biblioteca ENDF/B-IV e um dos seus maiores problemas^{13,14}. Por outro lado, o valor de D28 é o parâmetro que mais se aproxima do valor experimental, isso indica que a razão entre as taxas de fissão dos isótopos de urânio são coerentes, como confirma os resultados obtidos a partir do ENDF/B-V¹⁵.

TABELA 7 : $\Delta\%$ dos parâmetros integrais dos experimentos TRX e MIT

	V_m/V_c	Kef	$\Delta\%$			
			D28	D25	D28	C
TRX-3	1.00	4.831	3.630	4.762	-1.796	0.784
TRX-1	2.35	-1.37	5.076	3.040	1.057	0.878
TRX-2	4.02	-0.834	2.867	1.303	-2.597	-0.309
TRX-4	8.11	1.968	2.495	-0.559	-2.490	-0.753
MIT-1	20.76	-1.412	1.992	-2.345	-3.231	-4.396
MIT-2	25.89	-1.429	5.250	12.239	-5.792	-3.113
MIT-3	36.61	-1.192	4.473	10.189	-6.609	0.815

TABELA 8 : Constantes de multiplicação calculados para o experimento $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-H}_2\text{O}$

ID	Passo (cm)	V_m/V_c	B_m^2 (m^{-2})	MURLI	Kef		
					HTEC	DIT-IV	DIT-V
8	1.59	0.997	75.88	1.005	0.990	0.984	0.999
9	1.72	1.384	86.06	1.000	0.993	0.983	0.999
10	1.82	1.713	89.34	1.001	0.997	0.987	1.003
11	1.96	2.194	90.35	1.001	1.000		
12	2.17	3.004	85.54	0.998	1.002		
13	2.46	4.272	69.80	0.998	1.003		
14	2.98	6.845	32.20	0.995	0.999		

3.3 - Experimentos com $^{233}\text{UO}_2$ - $^{232}\text{ThO}_2$

Foi encontrado com esse tipo de combustível um experimento exponencial¹⁶ com 3% de enriquecimento em ^{233}U . Além dos dados fornecidos abaixo (Tabela 8) essa célula possui uma pastilha de 0.43in de diâmetro e 8.9618g/cm^3 de densidade, com um revestimento de ZR-2 de 0.499in de diâmetro.

O código DIT¹⁵, de 85 grupos de energia, foi desenvolvido pela "Combustion Engineering, Inc." e efetua o cálculo de transporte sobre a geometria explícita do "assembly", o que elimina aproximações de homogeneização. Os seus resultados foram calculados usando-se as bibliotecas ENDF/B-IV e ENDF/B-V e denominados de DIT-IV e DIT-V respectivamente.

Os valores de Kef da Tabela 8 indicam que os resultados obtidos pelo HTEC, usando perfís detalhados de ressonância para os isótopos ^{235}U e ^{238}U , de 0.998 ± 0.005 , são intermediários entre os obtidos pelo MURLI (1.000 ± 0.003) e DIT-IV.

Os valores da razão de captura epícadmia e subcadmia do ^{232}Th , RC02, foram obtidos diretamente do código com os isótopos 90232 (Th-232) e 92233 (U-233) na posição das variáveis WB(1) e WB(2) do cartão D1 do conjunto de cartões de entrada do HTEC⁴. Deve-se ressaltar que neste tipo de combustível os nuclídeos com perfís de ressonância, ^{238}U e ^{235}U , se apresentam apenas como impurezas na célula.

TABELA 9 : Comparação da razão entre as taxas de reações calculados pelo HTEC com os obtidos em outras referências para o experimento $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-H}_2\text{O}$

Vm/Vc	expt.	MJRLI	RCO2		
			HTEC	DIT-IV	DIT-V
0.997	1.380±0.042	1.233	1.261	1.231	1.255
1.384	0.928±0.038	0.849	0.867	0.856	0.871
1.713	0.754±0.024	0.675	0.688	0.683	0.695
2.194	0.607±0.026	0.523	0.533		
3.004	0.435±0.013	0.386	0.392		
4.272		0.282	0.285		
6.845	0.218±0.008	0.195	0.195		

TABELA 10 : $\Delta\%$ dos valores calculados pelo HTEC em relação aos resultados experimentais para o experimento $^{233}\text{UO}_2\text{-ThO}_2\text{-H}_2\text{O}$

Vm/Vc	Kef	$\Delta\%$	
		HTEC	RCO2
0.997	-1.0		-8.623
1.384	-0.7		-6.573
1.713	-0.3		-8.723
2.194	0.0		-12.191
3.004	0.2		-9.885
4.272	0.3		
6.845	-0.1		-10.551

A Tabela 9 nos mostra que os valores da razão entre as taxas de captura do ^{232}Th (RC02) são melhores do que os obtidos pelo MURLI e pelo DIT-IV. A diferença entre os valores experimentais e calculados continua, contudo, grande. Variando de -12.203% a -6.598% como mostra a Tabela 10.

Pelos resultados apresentados, nota-se que os valores obtidos pelo código DIT usando a biblioteca ENDF/B-V foram, como se esperava, melhores.

A grande discrepância nos valores calculados de RC02 em relação aos dados experimentais é uma indicação de deficiências nos dados nucleares, pois o tório não é um nuclide bem estudado, e também da incerteza nos resultados experimentais.

3.4 - Experimentos com UO_2 - PuO_2

Foi analisado um experimento crítico contendo pastilhas de UO_2 , natural com 2% de PuO_2 ¹⁷. Algumas das características da célula assim como o Kef calculado são fornecidos na Tabela 11. Os resultados obtidos levaram em consideração a existência de traços de ^{241}Am , que surgem do decaimento do ^{241}Pu , permitindo uma simulação mais exata da célula.

Nos cálculos foi usado perfis detalhados de ressonância tanto para os isótopos ^{235}U e ^{238}U (U-U) como para ^{238}U e ^{239}Pu (U-Pu), este último mais abundante do que o ^{235}U .

TABELA 11 : Kef das células de UO_2 - PuO_2

ID.	Pu-240 (%)	Passo (in)	Vm/Vc	B_m^2 (m^{-2})	U-U	Kef	
						Pu-U	MURLI
15	7.65	0.80	1.515	93.7	0.972	0.974	0.996
16		0.93	2.487	103.3	1.012	1.013	1.013
17		1.05	3.515	101.3	1.023	1.024	1.015
18		1.143	4.396	97.0	1.018	1.019	1.012
19		1.32	6.281	75.6	1.013	1.015	1.007
20		1.386	7.053	68.6	1.002	1.004	0.995
21	16.54	0.93	2.487	86.5	1.015	1.016	1.010
22		1.05	3.515	85.4	1.022	1.024	1.011
23		1.143	4.396	81.5	1.015	1.017	1.012
24		1.32	6.281	61.6	1.007	1.009	1.006
25	23.50	0.80	1.515	63.1	0.990	0.993	1.013
26		0.93	2.487	79.4	1.004	1.006	1.007
27		1.05	3.515	77.6	1.012	1.014	1.013
28		1.143	4.396	72.2	1.009	1.010	1.008
29		1.32	6.281	53.7	0.996	0.998	0.997
30		1.386	7.053	44.3	0.993	0.995	0.996

Todos os valores de K_{ef} calculados usando U-Pu foram ligeiramente maiores do que os calculados usando U-U, na média os valores foram de 1.009 ± 0.013 e 1.006 ± 0.013 respectivamente. Os resultados do código MURLI, de 1.007 ± 0.007 , foram em geral um pouco melhores do que os obtidos pelo HTEC.

Estes resultados indicam que as células de óxidos mistos são teoricamente mais difíceis de serem simulados do que células de urânio apenas. Isto é devido principalmente ao comportamento complexo das seções de choque dos isótopos de plutônio.

3.5 - Experimentos com Pu-Al

O reticulado estudado é formado por células de combustível metálico, liga de alumínio com 1.83% em peso de plutônio, de 0.5in de diâmetro revestido de zircaloy-2 com 0.030in de espessura.

Os resultados obtidos pelo HTEC surpreendem pela discrepância dos valores de K_{ef} obtidos, que foi de 1.044 com desvio padrão de 0.015. Considerando o refinamento teórico do código e tomando como válido de que o mesmo é capaz de realizar cálculos com precisão compatível com "benchmarks", torna-se claro que houve falhas na geração dos perfis detalhados de ressonância dos isótopos de plutônio (^{239}Pu e ^{240}Pu) nas bibliotecas existentes na CNEN, provenientes de Michigan. Deve ter sido esta a razão pelo qual no experimento $\text{UO}_2\text{-PuO}$, os resultados obtidos com U-U foram ligei

ramente melhores do que usando Pu-U, apesar do ^{239}Pu ser mais abundante do que o ^{235}U , isso indica que os parâmetros de ressonância dos isótopos de plutônio produzem resultados melhores do que os obtidos a partir dos perfís de ressonância.

O experimento $\text{ThO}-\text{UO}_2$ serviu para demonstrar que mesmo que os nuclídeos com perfís de ressonância estejam presentes apenas como traços na célula, o HTEC executa esses casos normalmente. Assim, como teste adicional para as bibliotecas com perfís de Pu, foram recalculadas as células de UO_2-PuO_2 , usando os perfís dos isótopos ^{240}Pu e ^{239}Pu . Os resultados da Tabela 13 confirmam a nossa suspeita, pois os erros no Kef são maiores do que os obtidos no item anterior. Existe uma pequena diferença devido ao uso dos parâmetros ao invés dos perfís de ressonância do ^{238}U , essa diferença, contudo, é muito pequena (cerca de 0.3% da opção NIT em relação a NITPRO¹⁸ para o experimento MIT).

Os resultados poderiam ser melhores se as ressonâncias de captura do ^{240}Pu , logo acima da energia de corte epitérmica, fossem incorporados ao espectro térmico. Esta opção é permitida pelo HTEC.

TABELA 12 : Kef das células de Al-1.8%Pu

ID	Passo (in)	H/Pu	Vm/Vc	Bm^2 (m^{-2})	Kef HTEC
31	0.75	630	1.2041	60.2±0.2	1.064
32	0.80	810	1.5459	61.3±0.3	1.054
33	0.85	1000	1.9098	60.1±0.3	1.039
34	0.90	1204	2.2957	52.7±0.3	1.040
35	0.95	1418	2.7037	47.3±0.3	1.025

TABELA 13 : Kef do experimento UO_2 - PuO_2 usando perfis dos ^{240}Pu e ^{239}Pu

Vm/Vc	7.65%	^{240}Pu 16.54%	23.5%
1.515	1.017		1.064
2.487	1.044	1.060	1.057
3.515	1.048	1.057	1.052
4.396	1.038	1.044	1.043
6.281	1.028	1.028	1.020
7.053	1.016		1.015

3.6 - Variação do K_{ef}

Erros sistemáticos podem ser introduzidos através do procedimento de cálculo e se apresentam como tendências e xistentes na variação do K_{ef} com qualquer um dos parâme tros estudados.

Os experimentos críticos de combustível levemente enriquecido são sistemas onde a fuga de neutrons é bastan te elevada¹⁹. Como a fuga é uma importante fonte de erros, torna-se importante examinar os resultados em função da fu ga para determinar se existem efeitos sistemáticos. As Fi guras 1 e 2 mostram os valores de K_{ef} versus "buckling" para as células de UO_2 e UO_2 - PuO_2 respectivamente.

Examinando a Figura 1 nenhuma tendência é evidente para as células de UO_2 . Na Figura 2 nota-se uma tendência geral do K_{ef} aumentar com o aumento do "buckling", atingindo um valor mais ou menos estável em torno de $100m^{-2}$, ape sar dos experimentos contendo a mesma porcentagem de ^{240}Pu apresentarem os seus K_{ef} de forma bastante aleatória.

Um dos motivos de se efetuar um experimento crítico usando diferentes espaçamentos do reticulado com as mesmas varetas de combustível é obter dados que cobrem uma ampla faixa da razão volume de moderador sobre volume de combus tível. A posse de dados onde a única variável é a razão de moderador sobre combustível permite traçar gráficos com a finalidade de detectar a existência de erros sistemáti

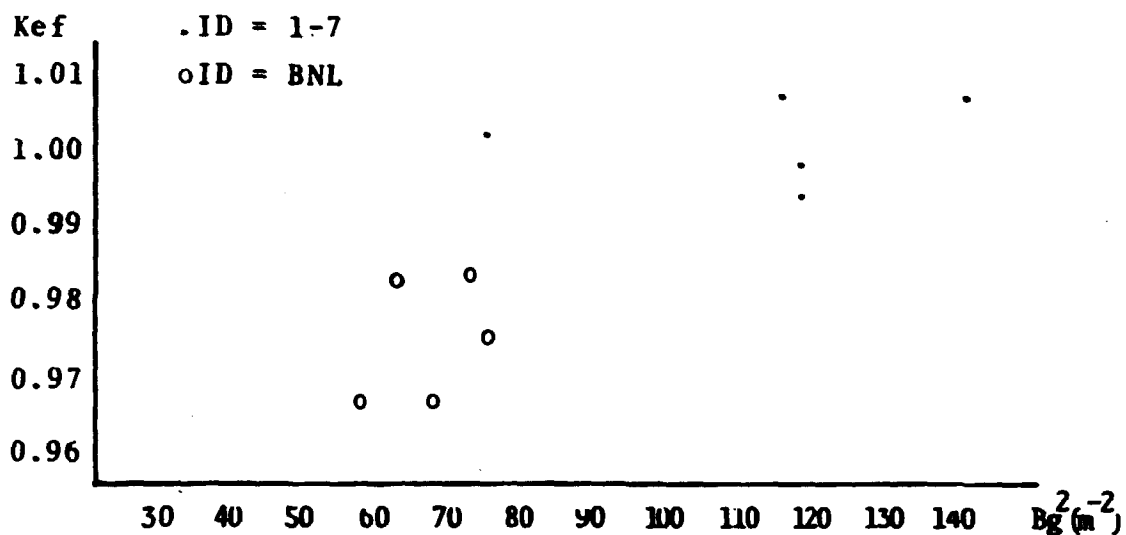


Figura 1 : Variação do K_{eff} com o buckling para as células de UO_2

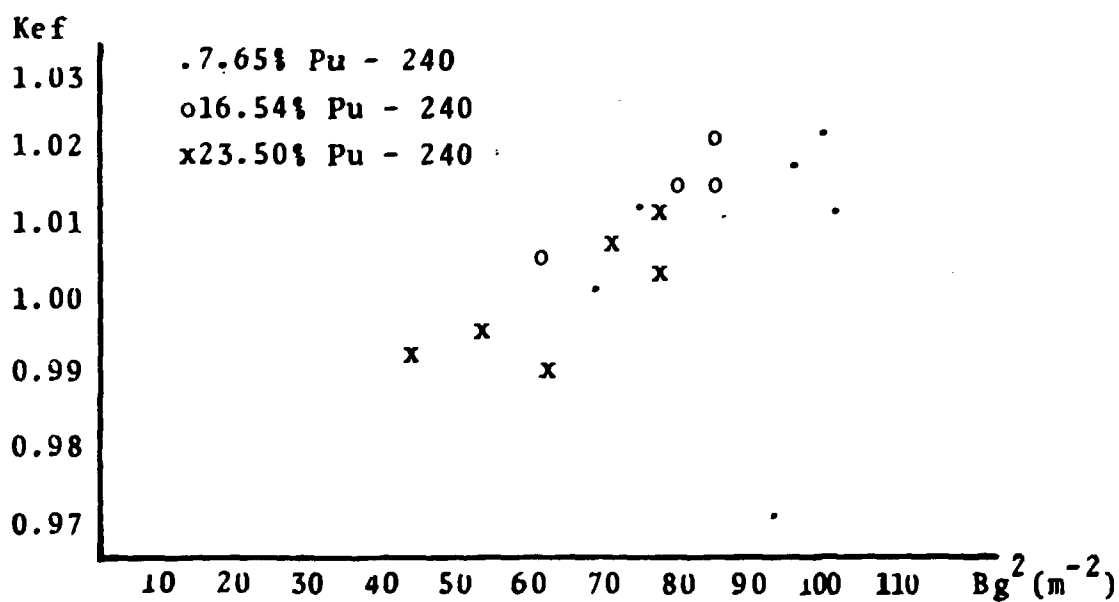


Figura 2 : Variação do K_{eff} com o buckling para as células de $UO_2 - PuO_2$

cos do modelo teórico. As Figuras 3 e 4 mostram os valores de K_{ef} em função da razão V_m/V_c das células de UO_2 e UO_2 - PuO_2 respectivamente.

Examinando a Figura 3 não há tendência evidente para as células de UO_2 . A Figura 4 mostra que o K_{ef} forma uma curva quando se traça um diagrama em função de V_m/V_c para as células de óxido misto.

Os resultados desta análise mostram que o procedimento de cálculo é adequado para as células de UO_2 e que os valores de K_{ef} das células de UO_2 - PuO_2 dependem tanto da fuga como da razão V_m/V_c . Como a principal diferença existente entre esses dois tipos de combustível é o plutônio, é possível que a dependência tenha sido causado por estes isótopos.

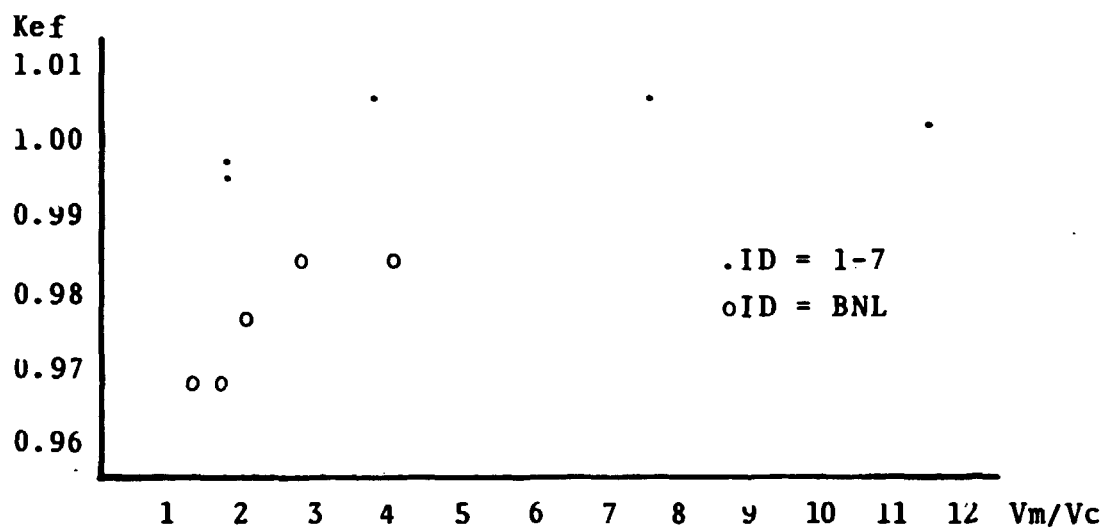


Figura 3 : Variações do Kef com a razão Vm/Vc para as células de UO_2

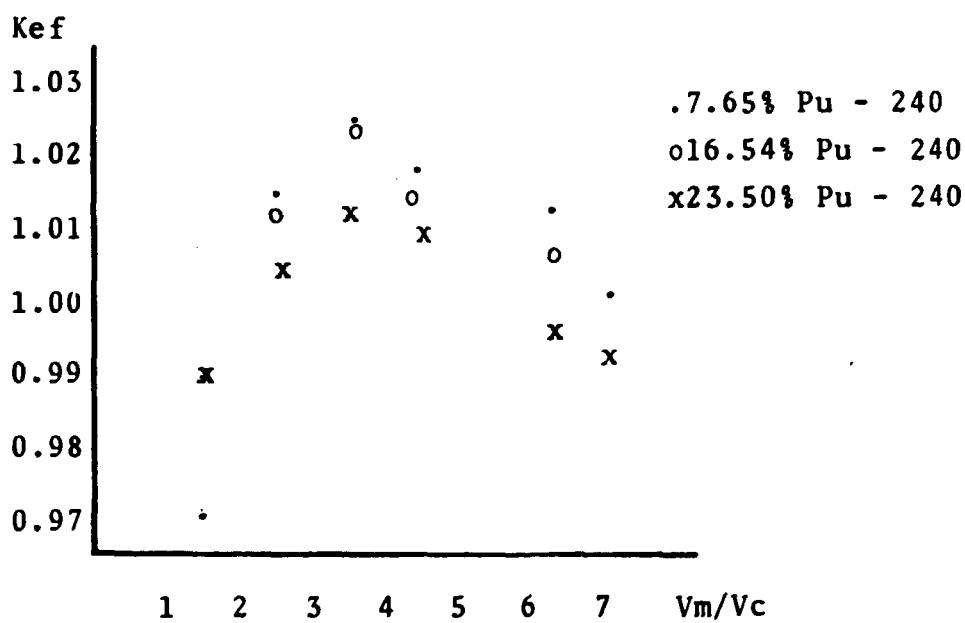


Figura 4 : Variação do Kef com a razão Vm/Vc para as células $UO_2 - PuO_2$

CAPÍTULO IV

COMPARAÇÕES COM O HAMMER E LEOPARD

Neste Capítulo serão comparados os valores de K_{ef} calculados pelos códigos HTEC, HAMMER²⁰ e LEOPARD²¹. Estas comparações tem por objetivo situar o HTEC em relação aos códigos já existentes de cálculo de célula e de uso bastante difundido e dão uma idéia da contribuição do código ao cálculo neutrônico. Alguns destes casos foram calculados usando outros tratamentos de ressonância internamente disponíveis (NIT), nestes casos foi comparado o tempo de processamento.

O código HAMMER utiliza o tratamento Nordheim padrão no cálculo das ressonâncias, portanto a única diferença com relação a opção NIT do HTEC está nas bibliotecas de seções de choque. O código HTEC tem um biblioteca mais atualizada do que o HAMMER, e, portanto, deve apresentar resultados melhores.

Apesar do LEOPARD ser um código teoricamente menos rigoroso do que o HTEC, ele apresenta os melhores resultados para células de urânio em função dos ajustes existentes no código²².

Todos resultados mostrados neste Capítulo o número de identificação dos experimentos, ID., e os resultados da

opção NITPRO são os mesmos do Capítulo 3.

O experimento crítico de UO_2 , ID=1-7 (Tabela 14), mostra que os resultados de Kef calculados usando as opções NIT e NITPRO não possuem, na média, nenhuma diferença. Essa semelhança nos resultados é também evidenciado na razão entre as taxas de reação, como mostra o Apêndice C. Os valores obtidos foram de 1.003 ± 0.005 para ambas as opções, enquanto que a diferença no tempo de processamento da opção NIT em relação a NITPRO foi 2.4 vezes menor. Para este experimento os melhores resultados foram obtidos pelo HTEC. O LEOPARD, contudo, com um tempo de processamento 5 vezes menor do que a NIT, chega a um valor de 0.996 ± 0.004 ; ou seja a 0.4% do Kef experimental contra 0.3% do HTEC.

Na Tabela 15 são mostrados os valores obtidos para os experimentos NB e BNL. Os resultados das células NB indicam que os valores de Kef calculados pelo HTEC são os mais discrepantes em relação aos obtidos pelo método de Monte Carlo (Kef de 1.1471, 1.3424 e 1.1456 para as células NB1, NB4 e NB5 respectivamente). Os melhores resultados foram obtidos pelo LEOPARD seguido pelo HAMMER. Mais uma vez devido ao espectro muito duro da célula NB5 os resultados para esta célula foram os mais discrepantes. Para as células BNL novamente foi o LEOPARD quem apresentou os melhores resultados ao passo que o HAMMER e o HTEC apresentaram, na média, valores de 0.976 ± 0.002 e 0.976 ± 0.009 respectivamente.

TABELA 14 : Kef do experimento crítico de UO₂

ID.	HTEC-NITPRO	HTEC-NIT	HAMMER	LEOPARD
1	0.998(24.103)*	0.996(9.626)	1.001	0.993
2	1.007(24.935)	1.006(9.961)	0.993	1.001
3	1.007(25.056)	1.007(10.441)	0.986	0.999
4	1.003(25.529)	1.003(10.925)	0.976	0.992
5	0.995(24.054)	0.994(9.502)	0.987	0.991
6	1.007(24.339)	1.006(9.816)	0.993	1.001
7	1.007(24.979)	1.006(10.433)	0.985	0.998

*Tempo de processamento em minutos

TABELA 15 : Kef dos experimentos NB e BNL

ID.	HTEC-NITPRO	HAMMER	LEOPARD
NB1	1.1263	1.132	1.141
NB4	1.3136	1.323	1.334
NB5	1.1126	1.126	1.120
BNL1	0.967	0.978	0.997
BNL2	0.967	0.973	0.992
BNL3	0.976	0.977	0.995
BNL4	0.984	0.979	0.997
BNL5	0.984	0.975	0.992

Os resultados das células de UO_2 estão dentro das expectativas, pois concordam com o que foi dito inicialmente. A exceção são os experimentos NB onde os resultados do HTEC foram os piores. A diferença contudo é pouco significativa.

Na Tabela 16 são mostrados os resultados das células de U-metálico, TRX e MIT. O LEOPARD foi o código que apresentou os melhores resultados para a célula TRX e os mais discrepantes em relação às células MIT. De uma forma geral os resultados do HTEC foram melhores do que os do HAMMER para as células TRX, ao passo que para as células MIT foi o HAMMER que obteve resultados melhores.

Os resultados do LEOPARD eram esperados pois concordam com os obtidos pela Westinghouse, ou seja, de que o código apresenta bons resultados para células de urânio moderadas a água leve mas não é adequado quando o moderador é água pesada, como é o experimento MIT. Entre o HTEC e o HAMMER esperava-se que o HTEC fornecesse os melhores resultados devido ao tratamento mais rigoroso das ressonâncias, e é o que acontece nos caso TRX. Para a série MIT, os melhores resultados do HAMMER devem ser atribuídos a ajustes existentes no código.

Os resultados do experimento exponencial ThO_2-UO_2 são mostrados na Tabela 17. A diferença no tempo de processamento da NIT em relação a NITPRO é 1.7 vezes menor. Em

TABELA 16 : Kef dos experimentos TRX e MIT

ID.	HTEC-NITPRO	HAMMER	LEOPARD
TRX1	0.986	0.980	1.017
TRX2	0.992	0.981	1.008
TRX3	1.048	1.053	1.035
TRX4	1.020	1.000	1.007
MIT1	0.986	0.992	0.968
MIT2	0.986	0.990	0.962
MIT3	0.988	0.989	0.967

TABELA 17 : Kef do experimento $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$

ID.	HTEC-NITPRO	HTEC-NIT	HAMMER	LEOPARD
8	0.990(27.441)	0.989(16.217)	0.987	1.010
9	0.993(27.831)	0.992(16.104)	0.984	1.011
10	0.997(27.486)	0.997(16.310)	0.986	1.014
11	1.000(27.524)	1.000(16.388)	0.986	1.015
12	1.002(28.143)	1.001(16.685)	0.985	1.014
13	1.003(28.292)	1.003(17.001)	0.985	1.012
14	0.999(28.530)	0.999(17.633)	0.986	1.004

relação aos experimentos de UO_2 a célula de tório possui um número maior de nuclídeos e portanto o seu tempo de processamento é maior. Pode-se notar também que o aumento do número de isótopos diminui a diferença no tempo de processamento da NIT em relação à NITPRO. Como se esperava os resultados das opções NIT e NITPRO são praticamente identicos para este caso e são melhores do que os obtidos pelo HAMMER e pelo LEOPARD. Surpreendentemente os K_{ef} obtidos pelo LEOPARD são tão bons quanto os obtidos pelo HAMMER.

A semelhança nos resultados das opções NIT e NITPRO é devido ao fato de que os principais nuclídeos deste combustível, ^{232}Th e ^{233}U , não possuem perfis de ressonância (os perfis de ressonância foram utilizados para os isótopos ^{235}U e ^{238}U).

Para o reticulado de UO_2-PuO_2 os valores de K_{ef} do HTEC, dados na Tabela 18, usados para comparação, foram aqueles obtidos usando-se perfis detalhados de ressonância dos isótopos ^{235}U e ^{238}U . Os resultados do HAMMER e do HTEC foram, na média, iguais a 1.006 com um desvio padrão de 0.014 e 0.013 respectivamente. Como era de se esperar o LEOPARD com um K_{ef} de 1.021 ± 0.014 foi o código que apresentou os resultados mais discrepantes, pois nenhum dos ajustes existentes no LEOPARD leva em consideração os isótopos de plutônio. Deve-se ressaltar que os resultados do HAMMER e do LEOPARD não levam em consideração a existência do ^{241}Am pois não possuem este nuclídeo nas suas bibliotecas.

TABELA 18 : Kef do experimento UO_2 - PuO_2

ID.	HTEC-NITPRO	HAMMER	LEOPARD
15	0.972	0.975	0.998
16	1.012	1.013	1.033
17	1.023	1.023	1.040
18	1.018	1.018	1.031
19	1.013	1.013	1.019
20	1.002	1.002	1.006
21	1.015	1.014	1.035
22	1.022	1.022	1.040
23	1.015	1.017	1.030
24	1.007	1.009	1.016
25	0.990	0.982	1.009
26	1.004	1.000	1.021
27	1.012	1.011	1.027
28	1.009	1.010	1.022
29	0.996	0.998	1.004
30	0.993	0.995	0.999

TABELA 19 : Kef do experimento Al-1.8%Pu

ID.	HTEC-NITPRO	HTEC-NIT	HAMMER
31	1.064(19.319)	1.039(13.162)	1.018
32	1.054(19.565)	1.034(13.333)	1.028
33	1.039(19.573)	1.023(13.923)	1.016
34	1.040(19.777)	1.026	1.021
35	1.025(19.930)	1.013(13.610)	1.008

Em princípio, o HTEC deve fornecer resultados melhores do que o HAMMER para as células de óxidos mistos devido ao tratamento mais rigoroso das ressonâncias e a inclusão do ^{241}Am no cálculo da célula. Contudo os resultados foram praticamente idênticos. Isto provavelmente foi devido ao ajuste existente nas bibliotecas do HAMMER para o ^{240}Pu , que compensou aqueles dois fatores.

Os valores de K_{ef} calculados pelo HTEC para as células de Pu-Al da Tabela 19 confirmam os resultados dos itens 3.4 e 3.5, pois mostram que para os isótopos de Pu obtem-se resultados melhores usando-se parâmetros de ressonância ao invés de perfís detalhados de ressonância. Ambas as opções, porém, apresentam resultados piores do que o HAMMER devido ao ajuste existente nas suas bibliotecas para o ^{240}Pu . A diferença no tempo de processamento da NIT em relação a NITPRO é 1.45 vezes menor. Neste tipo de célula o número de núclídeos é maior do que nas células de UO_2 e menor do que $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$, donde o tempo de processamento deveria ser também intermediário, como ocorre no caso NIT. O tempo de CPU da opção NITPRO é, contudo, muito menor neste caso do que nos anteriores. Esta constatação pode ser mais uma indicação de que há erros na tabela dos perfís de ressonância dos isótopos de Pu.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados da análise ressaltam a importância de se avaliar detalhadamente os resultados obtidos por um código, comparando-os com valores experimentais e resultados obtidos por outros códigos. Tal tipo de análise determina quais as reais vantagens que o novo código trás sobre os códigos em uso e de capacidade comprovada. Com isso, permite-se localizar os pontos fracos, onde os resultados são menos confiáveis, e fornecer informações sobre os locais para posteriores ajustes e correções.

Podemos concluir então que :

a) Os resultados do código HTEC são os que se poderia esperar em face da teoria utilizada e das bibliotecas de seções de choque empregados.

b) Há problemas nas bibliotecas geradas para os isotopos de plutônio, mesmo assim, o cálculo do Kef apresenta resultados satisfatórios em células cuja concentração de urânio é dominante.

c) Não se recomenda o uso do código no cálculo de células cujo espectro seja muito duro.

d) Só se recomenda o uso da opção NITPRO em casos excepcionais, pois a precisão adicional obtida não compensa, nos casos comuns, o tempo de processamento adicional.

e) A vantagem no uso do código HTEC em relação ao LEOPARD está na sua flexibilidade, pois o LEOPARD só fornece bons resultados para células de urânio moderado a água leve.

f) O código HTEC é mais preciso do que o HAMMER desde que se evite o uso dos perfis detalhados de ressonância dos isótopos de plutônio.

g) Como é comum efetuar ajustes nos códigos dentro de uma faixa de interesse, os resultados do HTEC só foram significativamente melhores quando foi simulado um combustível pouco usado, o $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$.

Quanto aos ajustes necessários, dois são os mais importantes em virtude dos nuclídeos que envolve. O primeiro é o que diz respeito ao cálculo da razão entre as taxas de captura epitérmica e térmica do ^{238}U e o segundo, são os cálculos efetuados com as bibliotecas com perfis detalhados dos isótopos de Pu. Secundariamente, a razão entre as taxas de captura epitérmica e térmica do ^{232}Th é, igualmente, um valor não muito satisfatório. Este trabalho pode ser efetuado por meio de dois parâmetros, C1 e C2, existentes no conjunto de cartões de entrada do código e cujo pro

cedimento já foi delineado num trabalho anterior⁴.

Com os dados coletados para os parâmetros C1 e C2 po
de-se elaborar uma fórmula empírica que faça o ajuste des
tes parâmetros automaticamente.

Além dos ajustes das bibliotecas de seções de choque
há a necessidade de se verificar quais são os erros exis
tentes na opção RABPRO.

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS EXPERIMENTOS CRÍTICOS, NÚMERICOS E EXPONENCIAIS

Um arranjo experimental é dito crítico se uma quantidade de material fissionável consegue manter a sua criticidade, sem necessitar de uma fonte externa de neutrons. Em alguns reatores a criticalidade pode ser alcançada por adição de combustível, em outros a quantidade de combustível é fixa e se ajusta o nível de moderador até a criticidade; em outros ainda, carrega-se o combustível e o moderador e se remove as barras de controle até que o sistema se torne crítico.

O experimento exponencial consiste em colocar uma quantidade subcrítica do material a ser testado perto de uma fonte intensa de neutrons, como por exemplo um reator crítico. As principais vantagens deste tipo de arranjo experimental é de que se necessita de menor quantidade de material fissionável que o requerido nos experimentos críticos e requerem garantias menores de segurança.

Nos experimentos numéricos são usados os métodos teóricos mais rigorosos disponíveis tanto no que se refere às bibliotecas empregadas como no método numérico empregado para a resolução da equação de transporte, de forma que se possa assegurar que os erros serão menores possíveis.

APÊNDICE B

DESCRIÇÃO DOS RETICULADOS UTILIZADOS

Nos experimentos descritos abaixo, caso não haja indicação da temperatura, fica implícito que esta corresponde à temperatura ambiente (20°C). Assim como, caso não seja especificado, o moderador será H₂O.

TABELA 20 : Características do experimento crítico de UO_2 com 4.75% de enriquecimento

Combustível : diâmetro da pastilha = 0.790 ± 0.002 cm
 enriquecimento = 4.742 ± 0.001 %
 densidade = 10.38 ± 0.04 g/cm³
 impureza em equivalente de $^{10}B = 5.19 \times 10^{-6}$ g/cm³

Revestimento : diâmetro externo = 0.94 cm
 diâmetro interno = 0.82 cm
 composição (wt%) - Al=98.85, Mg=0.47, Si=0.43,
 Fe=0.22, Zn=0.03

Temperatura : 22°C

Reticulado (ID)	Tipo de célula	Passo (cm)	$Bm^2 (m^{-2})$
1	quadrado	1.26	118.0
2		1.60	141.0
3		2.10	116.0
4		2.52	75.3
5	triangular	1.35	118.0
6		1.72	141.0
7		2.26	116.0

TABELA 21 : Características dos experimentos numéricos NB

Reticulado	Tipo	Passo (cm)	O.D. Pastilha (cm)	O.D. Revestimento (cm)
NB1	hexagonal	1.5578	0.9728	1.1506
NB4	quadrado	1.4605	1.0160	1.1895
NB5	hexagonal	1.1660	0.9350	1.0580

Região	Isótopo	Densidade Atômica ($\times 10^{24}$)		
		NB1	NB4	NB5
Combustível	^{16}O	4.6946×10^{-2}	4.6420×10^{-2}	4.50473×10^{-2}
	^{235}U	3.1120×10^{-4}	6.4650×10^{-4}	6.94117×10^{-4}
	^{238}U	2.3127×10^{-2}	2.2559×10^{-2}	2.18195×10^{-2}
Revestimento	Al	4.899×10^{-2}		4.73054×10^{-2}
	Zr		4.015×10^{-2}	
Moderador	H	6.676×10^{-2}	6.676×10^{-2}	6.676×10^{-2}
	^{16}O	3.338×10^{-2}	3.338×10^{-2}	3.338×10^{-2}

TABELA 22 : Especificações dos reticulados hexagonais TRX

Região	Raio Externo (cm)	Isótopo	Átomos/b.cm
Combustível	0.4915	^{235}U	0.0006253
		^{238}U	0.047205
vazio	0.5042		
revestimento moderador	0.5753	^{27}Al	0.06025
		^1H	0.06676
		^{16}O	0.03338
Reticulado	Passo (cm)	V_m/V_c	B^2 Experimental (m^{-2})
TRX-1	1.8060	2.35	57.0
TRX-2	2.1740	4.02	54.69
TRX-3	1.4412	1.00	0.0
TRX-4	2.8824	8.11	0.0

TABELA 23 : Especificações dos reticulados hexagonais MIT

Região	Raio Externo (cm)	Isótopo	Átomos/b.cm
combustível	1.283	^{235}U	0.0003441
		^{238}U	0.04745
revestimento moderador	1.354	^{27}Al	0.06049
		^1H	0.000185
		^2H	0.06641
		^{16}O	0.03321
Reticulado	Passo (cm)	Altura Crítica (cm)	B^2 experimental (m^{-2})
MIT-1	11.43	103.8	8.48
MIT-2	12.70	102.9	8.65
MIT-3	14.605	106.2	8.15

TABELA 24 : Especificações dos reticulados hexagonais $^{233}\text{UO}_2$ - ThO_2

Região	Diâmetro (in)	Isótopo	Átomos/cm ³ (x10 ²³)
combustível	0.430	^{16}O	0.408832
		^{232}Th	0.198115
		^{233}U	0.0061021
		^{234}U	0.0000909
		^{235}U	0.0000027
		^{238}U	0.0000655
		^{10}B	0.0900220
revestimento moderador	0.499	Zr-2	0.4506904
		H	0.06676
		^{16}O	0.03338
Reticulado (ID)	Passo (in)	Vm/Vc	Bm ² (m ⁻²)
8	0.6269	0.997	78.88±2.0
9	0.6767	1.384	86.06±1.3
10	0.7163	1.7134	89.34±2.0
11	0.7706	2.1943	90.35±1.6
12	0.8542	3.0043	85.54±0.8
13	0.9707	4.2722	69.80±1.0
14	1.1720	6.8449	32.20±0.2

TABELA 25 : Características dos reticulados hexagonais UO_2 -
- PuO_2

Combustível : urânio natural

2% em peso de PuO_2 =22.56g/vareta (19.85 g plutônio)

massa de UO_2 - PuO_2 =1128g/vareta

densidade=9.54g/cm³

diâmetro=0.5045in

composição isotópica do plutônio em wt%

	8% ²⁴⁰ Pu	16% ²⁴⁰ Pu	24% ²⁴⁰ Pu
²³⁹ Pu	91.62	81.11	71.76
²⁴⁰ Pu	7.65	16.54	23.50
²⁴¹ Pu	0.70	2.15	4.08
²⁴² Pu	0.03	2.20	0.66

Revestimento : Zr-2

diâmetro externo = 0.565

	Reticulado(ID)	Passo(in)	Vm/Vc	Bm ² (m ⁻²)
8% ²⁴⁰ Pu	15	0.80	1.515	93.7±0.3
T=22°C	16	0.93	2.4870	103.3±0.3
	17	1.05	3.515	101.3±0.5
	18	1.143	4.3960	97.0±0.2
	19	1.32	6.2810	75.6±0.3
	20	1.386	7.0530	68.6±0.3
16% ²⁴⁰ Pu	21	0.93	2.4870	86.5±0.2
T=23°C	22	1.05	3.515	85.4±0.4
	23	1.143	4.3960	81.5±0.2
	24	1.32	6.2810	61.6±0.2
24% ²⁴⁰ Pu	25	0.80	1.515	63.1±0.2
T=24°C	26	0.93	2.4870	79.4±0.2
	27	1.05	3.515	77.6±0.3
	28	1.143	4.3960	72.2±0.2
	29	1.32	6.2810	53.7±0.1
	30	1.386	7.0530	44.3±0.1

Correção da composição do ^{241}Pu devido ao decaimento em ^{241}Am (átomos/b.cm)

Passo (in)	$8\%^{240}\text{Pu}$		$16\%^{240}\text{Pu}$		$24\%^{240}\text{Pu}$	
	^{241}Pu	^{241}Am	^{241}Pu	^{241}Am	^{241}Pu	^{241}Am
	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-6}$)	($\times 10^{-5}$)	(10×10^{-5})
0.80	2.82	0.54			1.69	0.16
0.93	2.89	0.47	7.66	1.39	1.71	0.14
1.05	2.84	0.52	7.50	1.55	1.68	0.17
1.143	2.90	0.46	7.38	1.67	1.65	0.20
1.32	2.89	0.47	7.62	1.43	1.66	0.19
1.386	2.87	0.49			1.71	0.14

TABELA 26 : Características dos reticulados hexagonais Al-Pu

Combustível : 389.32g de Al-Pu/vareta

7.12g de Pu/vareta (1.83%)

diâmetro = 0.500in

composição isotópica em wt%

plutônio	aluminio
^{239}Pu - 93.97	Al - 97.21
^{240}Pu - 5.58	Ni - 1.61
^{241}Pu - 0.44	Si - 0.69
^{242}Pu - 0.014	Fe - 0.69

Revestimento : Zr-2

diâmetro externo : 0.565in

Temperatura : 17°C

Reticulado (ID)	Passo (in)	V_m/V_c	$B_m^2 (m^{-2})$
31	0.75	1.2041	60.2±0.2
32	0.80	1.5459	61.3±0.3
33	0.85	1.9098	60.1±0.3
34	0.90	2.2957	52.7±0.3
35	0.95	2.7037	47.3±0.3

APÊNDICE C

COMPARAÇÃO ENTRE A RAZÃO DAS TAXAS DE REAÇÃO DO HTEC E LEOPARD

São mostrados nas Tabelas 27, 28 e 29 a razão entre as taxas de reação dos experimentos numéricos NB. Como po de-se observar, de uma forma geral o código LEOPARD apre senta os melhores resultados.

TABELA 27 : Razão entre as taxas de reação do experimento NB1

	R28	D25	D28	C	Kef
M. Carlo	1.363	0.0803	0.0722	0.7977	1.1471
LEOPARD	1.321	0.0803	0.0676	0.7808	1.141
NIT	1.437	0.0862	0.0701	0.8149	1.1276
NITPRO	1.453	0.0846	0.0709	0.8210	1.1263

TABELA 28 : Razão entre as taxas de reação do experimento NB4

	R28	D25	D28	C	Kef
M. Carlo	2.654	0.1594	0.0617	0.5494	1.3424
LEOPARD	2.607	0.1572	0.0591	0.5386	1.334
NIT	2.843	0.1691	0.0607	0.5711	1.3128
NITPRO	2.849	0.1649	0.0613	0.5739	1.3136

TABELA 29 : Razão entre as taxas de reação do experimento NB5

	R28	D25	D28	C	Kef
M. Carlo	8.503	0.5480	0.1330	1.006	1.1456
LEOPARD	9.080	0.5797	0.1304	1.024	1.120
NIT	9.300	0.6068	0.1329	1.048	1.1138
NITPRO	9.283	0.5859	0.1338	1.068	1.1126

BIBLIOGRAFIA

1. J. Barhen, W. Rothenstein e E. Taviv, The HAMMER Code System, EPRI NP-565, Project 709, Key Phase Report (1978).
2. G. F. Kuncir, A Program for the Calculation of Resonance Integrals. GA-2525, General Atomic (1961).
3. P. H. Kier e A. A. Robbs, RABBLE-A Programa for the Computation of Resonance Absortion in Multiregion Reactor Cells, ANL-7326 (1976).
4. A. C. O. Barroso, A.C. Pontedeiro e M. A. B. Alvarenga, Uma Nova Versão do Programa HAMMER (HTEC), Comissão Nacional de Energia Nuclear, Relatório DR-No. 117/83 (1983).
5. J. Barhen e W. Rothenstein, OZMA-A Code to Calculate Resonance Reaction Rates in Reactor Lattices Using Resonance Profile Tabulations, NP-926, Project 709-1 (1981).
6. J. C. Marananche et al., Critical Experiment with Lattices of 4.75 w% - U-235 Enriched UO₂ Rods in Water, Nucl.Sci.Eng., 71/154 (1979).

7. Oak Ridge National Laboratory, Improvements in EPRI-CELL Methods and Benchmarking of the ENDF/B-V Cross Section Library, EPRI-NP-2416.
8. H. C. Huria, Evaluation of the Lattice Code MURLI for Light Water Systems, Annals of Nuclear Energy, 8, 183 (1981).
9. R. Sher e S. Fiarman, Studies of Thermal Reactor Benchmark Data Interpretation : Experimental Corrections, EPRI Report NP-209, October 1976.
10. Cross Section Evaluation Working Group, Benchmark Specifications, BNL-19302, Brookhven National Laboratory (1974).
11. W. Rothenstein, Thermal Reactor Lattice Analysis Using ENDF/B-IV Data with Monte Carlo Resonance Reaction Rates, Nucl. Sci. Eng., 59, 337 (1976).
12. S. Q. B. Leite, E.S. Chalhoub e M. Moraes, Geração e Testes de Biblioteca para o Sistema HAMMER a partir de Dados do ENDF/B-IV, IEAv/NT-015/83 (1983).
13. R. R. Lee, O. Ozer e W. R. Cobb, Proceedings of the Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Core Thermal Hydraulics, 22-24, 36 (1982).

14. C. R. Weisbin, G. de Saussure, R.T. Santoro e D.Gilai, Meeting Cross-Section Requirements for Nuclear-Energy Design, Ann. nucl. Energy, 9,615 (1982).
15. Analysis of Selected Critical Experiments Using ENDF/B-IV and ENDF/B-V Data, NP-2076, Research Project 978-1(1981).
16. H. H. Windsor, Exponential Experiments with Lattices of U-233 Oxid and Thorium Oxide in Light and Heavy Water, Nucl. Sci. Eng., 42, 150 (1970).
17. V. O. Uotinen, J. H. Lauby, L.C. Schmid e N.P. Stinson, Lattices of Plutonium-Enriched Rods in Light Water-Part I : Experimental Results, Nucl. Technol.,15,257 (1972).
18. J. Barhen e W. Rothenstein, Thermal Reactor Benchmark Calculations Using Resonance Profiles, NP-1098, Research Project 975-1, BNL-NCS-25047, ENDF-270(1979).
19. R. C. Liikala, V. O. Uotinen e U. F. Jenquin, Lattices of Plutonium-Enriched Rods in Light Water-Part II: Theoretical Analysis of Plutonium Fueled Systems, Nucl. Technol.,15,272(1972).

20. J. E. Suich e H. C. Honeck, The HAMMER System, DP-1064, Savannah River Laboratory (1967).
21. R. F. Barry, LEOPARD - a Spectrum Dependent Non-Spatial Depletion Code, WCAP-3269-26, September 1963.
22. L. E. Strawbridge e R. F. Barry, Criticality Calculations for Water-Moderated Lattices, Nucl. Sci. Eng., 23/58 (1965).

TESE APRESENTADA POR :



CHAO TSU CHIA

APROVADA PELOS SRS.:



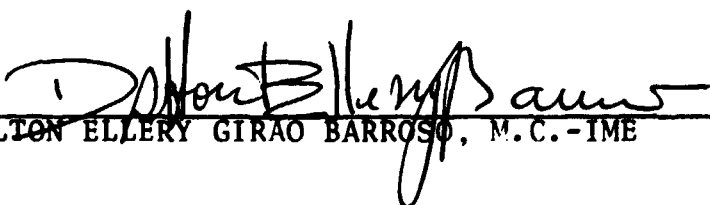
ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA BARROSO, Ph.D. - CNEN



AQUILINO SENRA MARTINEZ, D.C. - COPPE/UFRJ



CLOTILDE MOREIRA DE PINA DOS SANTOS, M.C. - CNEN



DALTON ELLERY GIRAÓ BARROSO, M.C. - IME