

## NOVO "CUT-OFF" TÉRMICO DO HAMMER-TECHNION

MARCO ANTONIO RODRIGUES FERNANDES e ADIMIR DOS SANTOS

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN-SP  
Departamento de Tecnologia de Reatores - Divisão de Física de Reatores  
Caixa Postal 11049 - Pinheiros - Cep-05499 - São Paulo - SP - Brasil

### RESUMO

O sistema computacional HAMMER-TECHNION, utilizado para geração de seções de choque em poucos grupos de energia apresenta resultados questionáveis para cálculos celulares que contenham isótopos de Plutônio. Uma das razões disto é o fato deste sistema adotar uma energia de corte térmica (cut-off) em 0.625 eV, a qual não abrange os efeitos das ressonâncias dos actíneos. Um novo cut-off térmico (1.855 eV) foi determinado e uma nova biblioteca térmica de dados nucleares elaborada com o sistema NJOY. O sistema HAMMER-TECHNION com o novo cut-off térmico foi avaliado através de experimentos críticos padrões e os resultados obtidos foram comparados com os valores experimentais e outros resultados obtidos na literatura.

### INTRODUÇÃO

Os resultados da utilização das bibliotecas de dados nucleares em códigos de análise de reatores depende da qualidade das seções de choque básicas e das aproximações físicas fundamentais usadas para o cálculo do fluxo de neutrons dependente do espaço, para a autoblindagem das ressonâncias, para a colapso das seções de choque e homogeneização da célula. Assim sendo, é preciso verificar a validade dessas aproximações nos cálculos celulares, pois algumas vezes, os dados de seções de choque, contidos nas bibliotecas básicas de dados nucleares, são responsabilizados por problemas que são mais propriamente atribuídos à infelizes aproximações nos métodos de cálculo. Isto envolve, em primeira instância, estabelecer a validade da teoria de cálculo neutrônico utilizada pelos códigos, quer seja a equação integral de transporte de neutrons ou a teoria de difusão de neutrons, e em segundo lugar, verificar a exatidão das aproximações físicas nos arranjos de células unitárias consideradas nos códigos de análise celular.

Neste trabalho, os experimentos críticos utilizados [1], caracterizam-se por redes de células unitárias ("lattice") compostas de varetas combustíveis de  $UO_2$ - $PuO_2$ . O material usado como revestimento ("cladding") é o zircaloy-2 e o moderador a água leve. Para cada "lattice" estudou-se diferentes razões de moderação e concentrações do isótopo Pu-240 no óxido de plutônio.

#### Objetivos do Trabalho:

- 1) Estudar o efeito do "cut-off" térmico no sistema HAMMER-TECHNION [2].
- 2) Analisar os experimentos críticos de  $UO_2$ - $PuO_2$  disponíveis na literatura, visando testar o desempenho do sistema HAMMER-TECHNION.
- 3) Validar a biblioteca de dados nucleares para o sistema HAMMER-TECHNION processada com o sistema acoplado NJOY - AMPX-II [3].

#### Justificativa do Trabalho :

Verificou-se interesse neste tipo de estudo nos grandes laboratórios e institutos de pesquisa nas áreas da energia nuclear, bem como a preocupação com a reutilização do plutônio a fim de propiciar uma melhor utilização das reservas de urânio, como é a filosofia dos projetos de LWHCR (light water converter reactor).

Além disso, a reciclagem do plutônio nos PWRs possibilita uma redução dos fatores de risco [4] no armazenamento do combustível nuclear irradiado.

Vários códigos computacionais têm sido adaptados, modificados ou apropriados para serem usados nesses sistemas físicos. Estudos teóricos têm sido dirigidos a fim de desenvolver modelos matemáticos que prevêm perfeitamente o comportamento físico dos sistemas de reatores nucleares. Uma medida da validade do modelo matemático é obtida comparando os parâmetros integrais calculados e os medidos, tal como o fator de multiplicação efetivo do reator.

Em geral, os códigos celulares disponíveis são, na realidade, combinações de programas independentes como o THERMOS, para cálculos na região de energias térmicas do neutron e o MUFT, para as energias epitérmicas e rápidas, e métodos para cálculos de termalização, como o Wigner-Wilkins, e procedimentos para o tratamento conveniente das autoblindagens das ressonâncias como o de Nordheim ou o de Bondarenko. Esses programas e métodos combinados podem formar um sistema computacional adequado para a análise celular.

### DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Com base nos objetivos acima citados, primeiramente estudou-se os métodos de cálculo tratados nas rotinas do sistema HAMMER, em seguida pesquisou-se os trabalhos realizados com alguns arranjos celulares críticos ("critical benchmarks") de interesse. Ateve-se às células de  $UO_2$ - $PuO_2$ , pois era de interesse inicial a verificação do comportamento do sistema HAMMER em elementos combustíveis que contenham isótopos do plutônio, uma vez que este tipo de estudo já havia sido realizado para as células tradicionais de  $UO_2$  [5], onde o código HAMMER, na sua versão mais atual, o HAMMER-TECHNION, demonstrou-se um excelente instrumento de trabalho para análise celular com este tipo de vareta combustível. Entretanto, devido às fortes ressonâncias próximas à região de energias térmicas percebidas nas seções de choque dos isótopos de plutônio, o espectro de neutrons calculado com o código HAMMER-TECHNION para sistemas de  $UO_2$ - $PuO_2$  é diferente do espectro de neutrons apresentado para sistemas que contenham apenas  $UO_2$ . Próximo às energias de ressonância, o espectro neutrônico apresenta uma depressão característica, e tal efeito não é levado em consideração na região térmica, devido à energia de corte térmica ("cut-off") usada neste código estar fora do alcance dessas ressonâncias. Este efeito, mascarado no código HAMMER-TECHNION, deve provocar, em

princípio, uma discrepância entre os resultados experimentais e os calculados nos experimentos críticos.

Os sistemas celulares críticos selecionados foram então executados com o código HAMMER e com sua versão implementada em Israel, o HAMMER-TECHNION, verificando os resultados obtidos com as várias opções de cálculos proporcionadas por este último. Em seguida, procedeu-se a elaboração de uma biblioteca térmica composta pelos nuclídeos existentes nas células estudadas. Os resultados obtidos para os parâmetros celulares calculados com o HAMMER-TECHNION com as duas bibliotecas térmica, a original gerada via FLANGE-II, e esta, via NJOY - AMPX-II, são comparadas.

A fim de se verificar o efeito do "cut-off" térmico nos cálculos de experimentos críticos, elaborou-se uma nova biblioteca de seções de choque térmicas, novamente utilizando-se o sistema acolado NJOY-AMPX-II, com uma estrutura de 36 grupos de energia e energia de corte térmica de 1.855 eV. Os problemas selecionados foram novamente executados, agora com esta nova biblioteca térmica.

Estudou-se o efeito da autoblindagem energética na região de energia epitérmica, para algumas células de interesse, através da execução do módulo ROLAIDS do sistema AMPX-II. Este módulo foi usado aqui para gerar a biblioteca epitérmica de dados nucleares, para o problema especificado em estudo, numa estrutura de multigrupos compatível com o sistema HAMMER-TECHNION.

Uma metodologia, mais refinada para análise de experimentos críticos foi desenvolvida, combinando a capacidade de pré-processamento dos dados nucleares do sistema NJOY e a condição de autoblindagem mútua dos nuclídeos actínídeos através do módulo ROLAIDS do AMPX-II. Esta metodologia de cálculo foi aplicada à duas células críticas de  $UO_2-2\%PuO_2(8\%Pu-240)$ , sendo os dados nucleares básicos fornecidos pelas bibliotecas ENDF/B-IV e JENDL-2. A configuração da célula unitária cilíndrica, utilizada aqui, consiste de três regiões distintas: uma região interna para o combustível, uma região revestindo a região do combustível denominada "cladding", e uma região mais externa para o moderador. A região do combustível foi subdividida num conjunto de dez zonas de áreas iguais; isto para se verificar as seções de choque auto-blindadas dos actínídeos ao longo do raio do "pellet".

#### Metodologia do Trabalho:

Após a escolha do "benchmarks" de interesse a este trabalho, procede-se a elaboração das bibliotecas de dados nucleares que devem conter, para todos os nuclídeos que constituem as regiões celulares destes experimentos críticos, os parâmetros requisitados na execução do código HAMMER-TECHNION.

Para a execução do sistema HAMMER-TECHNION são necessárias bibliotecas de dados nucleares que são elaboradas distintamente para as regiões de energia térmica e rápida.

O processamento começa com as bibliotecas de dados nucleares básicos, neste trabalho, a ENDF/B-IV ou a JENDL-2. Nestas bibliotecas, todos os parâmetros necessários para os cálculos efetuados pelos códigos de análise nucleares, tais como as seções de choque microscópicas, são dispostos em função da energia da reação de interesse, numa forma pontual.

No procedimento normal, para a região térmica, o programa FLANGE-II acessa o ENDF/B-IV e prepara as seções de choque em 30 grupos de energia do neutron, utilizando uma função ponderação disponível no programa, geralmente uma Maxwelliana na temperatura da aplicação. Para materiais que possuem leis de espalhamento do tipo  $S(\alpha, \beta, T)$ , como o hidrogênio ligado na água, o FLANGE-II calcula a matriz de espalhamento térmica necessária no THERMOS. Após este passo, o programa LITHE formata os dados fornecidos pelo FLANGE-II, como as seções de choque e a matriz de espalhamento, numa forma compatível para a utilização no HAMMER-TECHNION.

Para os materiais que não possuem leis de espalhamento  $S(\alpha, \beta, T)$ , o LITHE calcula a matriz de espalhamento com o modelo de gás livre ou Kernel de St.John-Brown, preparando em seguida as fontes de moderação dentro de cada grupo térmico.

Outra metodologia disponível e aceitável, a qual foi utilizada neste trabalho para a geração da biblioteca térmica, é a realizada com o sistema acoplado NJOY-AMPX-II.

A diferença básica entre estes dois procedimentos para a obtenção da biblioteca térmica consiste no pré-processamento com o respectivo acesso ao arquivo de dados nucleares básicos, que no segundo é feito pelo sistema NJOY e não pelo programa FLANGE-II utilizado no procedimento original.

Além da biblioteca térmica padrão para o sistema HAMMER-TECHNION, a qual possui uma estrutura de 30 grupos de energia e energia de corte ("cut-off" térmico) em 0.625 eV, gerou-se uma biblioteca térmica em 36 grupos de energia e "cut-off" térmico em 1.855 eV, sendo o pré-processamento dos dados em ambas as bibliotecas térmica geradas, realizado com o sistema NJOY-AMPX-II.

Para a obtenção da biblioteca térmica em 36 grupos de energia e "cut-off" térmico de 1.855 eV, utilizou-se a estrutura de faixas de velocidade do neutron usada no programa EPRI-CELL. Os limites destes grupos de velocidade são dados de entrada na execução do programa LITHE. A velocidade característica de cada grupo corresponde ao valor médio entre os dois limites deste grupo. Para a estrutura de grupos padrão do THERMOS, os limites de velocidade de cada grupo, utilizados no LITHE, devem ser normalizados pela energia térmica de 0.0253 eV.

O sistema acoplado NJOY-AMPX-II foi usado também para acessar a biblioteca JENDL-2, e criar a biblioteca térmica para alimentação do código HAMMER-TECHNION. Assim pode-se comparar a qualidade dos dados nucleares fornecidos por este arquivo com aqueles fornecidos pelo ENDF/B-IV.

Para efeito de verificação dos resultados obtidos para os parâmetros celulares calculados com o sistema HAMMER-TECHNION, quando se eleva sua energia de corte térmica original (0.625 eV) para 1.855 eV, foi mantida a biblioteca epitérmica originalmente processada e disponível. Assim sendo, qualquer discrepância entre os valores dos parâmetros, calculados para os dois "cut-off" acima, que por ventura viesse a ocorrer, poderia ser explicada simplesmente pelas diferentes abordagens feitas nas duas distintas bibliotecas térmica processadas.

Todavia, vários procedimentos numéricos, têm sido desenvolvidos para se tratar os efeitos da interferências das ressonâncias para as bibliotecas de multigrupo pré-processadas. Assim sendo, a fim de se utilizar um método de cálculo mais refinado para o tratamento dos nuclídeos ressonantes, na região de energias com ressonâncias resolvidas, para algumas células, procedeu-se a execução ROLAIDS do sistema AMPX-II.

Os fatores de autoblindagem nesta faixa de energia foram analisados comparando os resultados obtidos para as seções de choque de captura e de fissão para os nuclídeos U-235, U-238 e Pu-239, com o tratamento de diluição infinita feito pelo sistema NJOY com os obtidos com o módulo ROLAIDS.

#### Descrição dos experimentos analisados:

Nas células estudadas, os compostos químicos são:  $UO_2-PuO_2$  para a região do combustível, zircaloy-2 para o encamisamento, e água leve para a região do moderador. Para cálculo da densidade isotópica do zircaloy-2 considerou-se esta liga constituída de 98,1% de zircônio, 1,6% de estanho, 0,16% de ferro e 0,14% de cromo, sendo a densidade deste composto igual a  $6,55 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ . Para a água a  $20^\circ\text{C}$  usou-se uma densidade de  $0,998234 \text{ g/cm}^3$ .

O diâmetro externo do combustível e o do revestimento, para estas varetas combustíveis, são 0,505 e 0,565 polegadas respectivamente. O comprimento ativo da vareta é de 36 polegadas.

**Tabela 1**  
**Características das células com combustível UO<sub>2</sub>-2%PuO<sub>2</sub>**

CASOS "A" - UO <sub>2</sub> -2%PuO <sub>2</sub> (8%Pu-240)-Temp. média= 22°C					
CASO	BUCK(m <sup>2</sup> )	PITCH(in)	N.VAR.CRI	RAZ. VM/VF	RAIO CRI (cm)
A1	93,70	0,800	319,70	1,211	19,0759
A2	103,30	0,930	192,40	1,987	17,2032
A3	101,30	1,050	152,10	2,808	17,2694
A4	97,00	1,143	147,50	3,513	18,5125
A5	75,60	1,320	163,10	5,019	22,4814
A6	68,90	1,386	179,50	5,635	24,7639
CASOS "B" - UO <sub>2</sub> -2%PuO <sub>2</sub> (16%Pu-240)-Temp. média= 23°C					
CASO	BUCK(m <sup>2</sup> )	PITCH(in)	N.VAR.CRI	RAZ. VM/VF	RAIO CRI (cm)
B1	86,30	0,930	245,60	1,987	19,4366
B2	85,40	1,050	194,30	2,808	19,5186
B3	81,50	1,143	187,50	3,513	20,8723
B4	61,60	1,320	221,10	5,019	26,1753
B5	55,60	1,386	254,60	5,635	29,4928
CASOS "C" - UO <sub>2</sub> -2%PuO <sub>2</sub> (24%Pu-240)-Temp. média= 24°C					
CASO	BUCK(m <sup>2</sup> )	PITCH(in)	N.VAR.CRI	RAZ. VM/VF	RAIO CRI (cm)
C1	63,10	0,800	519,50	1,211	24,3168
C2	79,40	0,930	286,10	1,987	20,9780
C3	77,60	1,050	233,20	2,808	21,3834
C4	72,20	1,143	232,10	3,513	23,2224
C5	53,70	1,320	296,20	5,019	30,2963
C6	44,30	1,386	365,30	5,635	35,3274

**Tabela 2**  
**Concentrações atômicas do combustível UO<sub>2</sub>-2%PuO<sub>2</sub>**

NUCLÍDEO	8%Pu-240	16%Pu-240	24%Pu-240
U-235(Comb)	1,5040-04	1,5030-04	1,5030-04
U-238(Comb)	2,0730-02	2,0720-02	2,0710-02
Pu-238(Comb)	4,0000-08	-----	-----
Pu-239(Comb)	3,9740-04	3,4820-04	3,0440-02
Pu-240(Comb)	3,3440-05	5,7580-05	9,9400-05
Pu-241(Comb)	2,6400-06	9,2300-06	1,6800-05
Pu-242(Comb)	1,2000-07	8,5860-07	2,7000-06
Am-241(Comb)	4,7000-07	-----	1,7000-06
O-16(Comb)	4,4010-02	4,2560-02	4,2580-02
Zirc-2(Clad)	4,2260-02	4,2260-02	4,2260-02
H-1 (Moder)	6,6710-02	6,6700-02	6,6680-02
O-16(Moder)	3,3360-02	3,3350-02	3,3340-02

Todas as "lattices" estudadas com este tipo de vareta combustível são triangulares. As características das demais células analisadas estão detalhadas na referência [1].

Todos os dados celulares em 4 grupos de energia foram obtidos com o HAMMER-TECHNION. Os resultados finais foram obtidos com o CITATION em geometria bidimensional do tipo R-Z.

#### Resultados obtidos:

Confrontando os resultados obtidos quando se utiliza o método de Carlvick para o cálculo do espectro de neutrons térmicos com o procedimento padrão do sistema HAMMER-TECHNION, verifica-se que os valores obtidos com este último, em geral parecem subestimados em relação ao primeiro, quando se utiliza a versão original do código que possui energia de corte térmica de 0,625 eV. Entretanto, nota-se uma situação inversa quando se utiliza um "cut-off" térmico de 1,855 eV.

Quando os resultados com o novo "cut-off" são confrontados com o original, verifica-se que, o método de Carlvick superestima o cálculo de K-ef obtido com o "cut-off" original, tal comportamento

é dependente da razão de moderação da célula e da concentração de Pu-240 na vareta combustível.

Entretanto, nota-se de maneira geral que os valores de K-ef obtidos com o novo "cut-off" são maiores do que os obtidos com o "cut-off" original quando se utiliza o procedimento padrão (s/Carlvick), sendo que a diferença aqui também varia com a concentração de Pu-240 no combustível e do "pitch".

A dependência de K-ef com a fuga de neutrons da célula pode ser notada nas Tabelas 3, 4 e 5. Verifica-se uma tendência do sistema HAMMER-TECHNION em subestimar o valor de K-ef para as células mais estreitas. Isto demonstra a consistência da expressão utilizada por este sistema para o cálculo do fator de multiplicação efetivo de neutrons.

Observando os valores medidos de K-ef [1], pode-se dizer, em caráter qualitativo que, para células muito estreitas que possuem alta concentração de Pu-240, o método de Carlvick aplicado à versão que possui o novo "cut-off" térmico, fornece valores de K-ef mais próximos aos experimentais, e para as células mais térmicas que também possuem alta concentração de Pu-240, a versão com o novo "cut-off", utilizando o procedimento padrão do Thermos (sem Carlvick) é mais recomendada.

**Tabela 3**  
**K-ef via H-TEC/CITATION - células de UO<sub>2</sub>-2%PuO<sub>2</sub>**

CASO	MÉTODO DE CARLVICK		THERMOS PADRÃO	
	Energia de corte térmica (Cut-off)			
	0,625 eV	1,855 eV	0,625 eV	1,855 eV
Varetas com 8% de Pu-240				
A1	0,9954478	0,9907199	0,9925477	0,9955826
A2	1,0047245	1,0030518	1,0017738	1,0042362
A3	1,0032530	1,0027466	1,0010662	1,0028801
A4	1,0097532	1,0095100	1,0079947	1,0093575
A5	1,0098257	1,0094843	1,0086727	1,0091429
A6	1,0071669	1,0067234	1,0061855	1,0063543
Varetas com 16% de Pu-240				
B1	1,0192890	1,0162239	1,0162907	1,0197029
B2	1,0168619	1,0152826	1,0147915	1,0170975
B3	1,0184746	1,0173664	1,0168972	1,0185566
B4	1,0166864	1,0157347	1,0158167	1,0163412
B5	1,0135412	1,0125113	1,0125380	1,0130167
Varetas com 24% de Pu-240				
C1	0,9977952	0,9898326	0,9941974	1,0029430
C2	1,0014296	0,9973983	0,9983344	1,0039654
C3	1,0036955	1,0013962	1,0016718	1,0054655
C4	1,0072584	1,0055771	1,0057993	1,0086155
C5	1,0050583	1,0036640	1,0043678	1,0055828
C6	1,0023766	1,0009089	1,0018644	1,0026245

**Tabela 4**  
**K-ef via H-TEC/CITATION - células de UO<sub>2</sub>-4%PuO<sub>2</sub>**

CASO	MÉTODO DE CARLVICK		THERMOS PADRÃO	
	Energia de corte térmica (Cut-off)			
	0,625 eV	1,855 eV	0,625 eV	1,855 eV
Varetas com 18% de Pu-240				
D1	1,0012426	0,9932003	0,9981017	1,0070267
D2	1,0006914	0,9954292	0,9972488	1,0045195
D3	1,0109777	1,0081482	1,0076828	1,0131121
D4	1,0102253	1,0083952	1,0070524	1,0114450
D5	1,0117149	1,0105219	1,0088453	1,0109644
D6	1,0093031	1,0077600	1,0061712	1,0067825
D7	1,0086536	1,0067759	1,0049114	1,0048990

**Tabela 5**  
K-ef via H-TEC/CITATION - células de  $\text{UO}_2\text{-6.6\%PuO}_2$

CASO	MÉTODO DE CARLVICK		THERMOS PADRÃO	
	Energia de corte térmica (Cut-off)			
	0,625 eV	1,855 eV	0,625 eV	1,855 eV
<b>Varetas com 8.57% de Pu-240</b>				
E1	0.9943719	0.9811875	0.9941826	1.0015554
E2	0.9980226	0.9883387	0.9966452	1.0038948
E3	1.0050020	1.0030279	1.0010490	1.0062647
E4	1.0026484	1.0077715	1.0045891	1.0091362
E5	1.0230742	1.0232277	1.0188160	1.0212240

**Tabela 6**  
Valores de K-inf via H-TEC - células de  $\text{UO}_2\text{-2\%PuO}_2$

CASO	MÉTODO DE CARLVICK		THERMOS PADRÃO	
	Energia de corte térmica (Cut-off)			
	0,625 eV	1,855 eV	0,625 eV	1,855 eV
<b>Varetas com 8% de Pu-240</b>				
A1	1,3441570	1,3384890	1,3415180	1,3466000
A2	1,3923360	1,3883310	1,3892050	1,3911390
A3	1,3809520	1,3777520	1,3784910	1,3786850
A4	1,3510700	1,3482780	1,3490590	1,3485530
A5	1,2665110	1,2642320	1,2651990	1,2639870
A6	1,2297730	1,2276060	1,2286440	1,2273040
<b>Varetas com 16% de Pu-240</b>				
B1	1,3512840	1,3462000	1,3480200	1,3517880
B2	1,3392810	1,3353180	1,3369360	1,3382990
B3	1,3092490	1,3058720	1,3074680	1,3077960
B4	1,2251070	1,2224840	1,2241320	1,2233700
B5	1,1887400	1,1862940	1,1879640	1,1870090
<b>Varetas com 24% de Pu-240</b>				
C1	1,2472980	1,2392490	1,2435570	1,2567000
C2	1,2936320	1,2879840	1,2902040	1,2973600
C3	1,2826400	1,2782610	1,2803530	1,2840080
C4	1,2537840	1,2500840	1,2521480	1,2542180
C5	1,1724280	1,1696090	1,1716670	1,1719920
C6	1,1372760	1,1346860	1,1367280	1,1367170

**Tabela 7**  
Valores de K-inf via H-TEC - células de  $\text{UO}_2\text{-4\%PuO}_2$

CASO	MÉTODO DE CARLVICK		THERMOS PADRÃO	
	Energia de corte térmica (Cut-off)			
	0,625 eV	1,855 eV	0,625 eV	1,855 eV
<b>Varetas com 18% de Pu-240</b>				
D1	1,361704	1,354119	1,358911	1,374833
D2	1,395537	1,389325	1,392084	1,403839
D3	1,405833	1,400823	1,402194	1,409081
D4	1,390818	1,386399	1,387175	1,391683
D5	1,298462	1,294980	1,295090	1,296019
D6	1,187327	1,184290	1,183771	1,183384
D7	1,132485	1,129593	1,128405	1,127638

Analisando os valores apresentados nas Tabelas 6 e 7 verifica-se que a diferença percentual entre os valores de K-inf com as duas diferentes energias de corte térmicas utilizadas, semelhantemente do K-ef, é dependente da razão de moderação da célula e da concentração de  $\text{PuO}_2$  na vareta combustível.

Quanto ao tempo de execução computacional total, não se verificou alterações significantes quando se aumentou a estrutura de grupos de energia para 36 grupos térmicos com o novo "cut-off".

**Tabela 8**  
K-ef obtido após pré-processamento do ROLAIDS

CASO	HAMMER-TECHNION		CITATION
	C/CARLVICK	S/CARLVICK	*
A1	0,9923213	0,9898007	0,9986109
A2	1,0263610	1,0233960	1,0059757
A3	1,0344740	1,0319600	1,0031185
A4	1,0273390	1,0251450	1,0084839
A5	1,0202390	1,0185970	1,0068703
A6	1,0082190	1,0067910	1,0037222

A Tabela 8 mostra que o tratamento via ROLAIDS tende a superestimar o valor de K-ef para as células mais estreitas. Para as células mais térmicas, o valor de K-ef, obtido com o tratamento da autoblindagem das ressonâncias com o módulo ROLAIDS, são menores que os obtidos sem este procedimento.

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante o estudo desenvolvido neste trabalho verificou-se que o comportamento dos parâmetros celulares calculados pelo sistema HAMMER-TECHNION, de modo geral, concorda com as previsões teóricas e outros resultados encontrados na literatura.

O efeito da autoblindagem no espectro de neutrons térmicos, devido à ressonância gigante do nuclídeo  $\text{Pu-240}$ , na energia de 1,05 eV, é claramente notado na curva do espectro térmico obtida com o novo "cut-off" (1,855 eV). Todavia, a utilização desta nova energia de corte térmica não altera o comportamento do espectro de neutrons abaixo da energia de 0,625 eV.

Em todas as células estudadas, a curva de K-ef calculado, em função da razão de moderação, cresce atingindo um valor máximo, próximo à razão de moderação ótima (K-inf máximo), e então decresce conforme se aumenta a moderação da célula.

Os efeitos da interferência entre ressonâncias, revelam que o fator de autoblindagem, para sistemas que contenham  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ , pode ser maior que 1,0, indicando a importância das acentuadas ressonâncias dos isótopos do plutônio presentes no combustível. Também pode-se verificar que a utilização dos nuclídeos U-235, Pu-239, Pu-240, Pu-241 e Pu-242 da biblioteca JENDL-2 apresenta uma tendência de superestimar o valor de K-ef e K-inf em relação ao valor calculado quando se utiliza estes nuclídeos da biblioteca ENDF/B-IV.

A nova energia de corte térmica, utilizada neste trabalho, não apresentou efeito extremamente relevante, uma vez que valores de K-ef calculados com o novo "cut-off" não apresentam alterações substanciais daqueles calculados com o "cut-off" original.

Entretanto, muito trabalho ainda deve ser feito para uma avaliação geral do impacto de incluir as ressonâncias dos isótopos do plutônio na região de energia térmica; nesse sentido, como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- 1) reanalisar os dados de entrada utilizados ("buckling", "pitch", composição isotópica, etc...), pesquisando, junto a literatura disponível, resultados experimentais referentes aos parâmetros celulares integrais, e comparando-os com os resultados obtidos neste trabalho;
- 2) utilizar outras bibliotecas de dados nucleares básicos, como ENDF/B-VI e JENDL-3, já disponíveis na Divisão de Física de Reatores do IPEN/CNEN-SP;
- 3) processar a biblioteca térmica para temperaturas maiores que a utilizada neste trabalho, como por exemplo, a faixa de temperatura de operação de um PWR; verificando assim o efeito do up-scattering", mais acentuado nesta faixa de temperatura;

- 4) verificar a implicação da utilização de outras estruturas de grupos de energia e "cut-off" térmico ainda mais elevado, e
- 5) realizar cálculos considerando a queima do combustível, verificando o efeito do "cut-off" térmico sobre as densidades atômicas do plutônio e o coeficiente de reatividade do sistema.

## REFERÊNCIAS

- [1] FERNANDES, MARCO A. R. Análise de Experimentos Críticos de  $UO_2$ - $PuO_2$  utilizando os sistemas NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION. Dissertação de Mestrado - IPEN/CNEN-SP, 1990.
- [2] BARHEN, J.; ROTHENSTEIN, W.; TAVIV, E.; The HAMMER Code System, Palo Alto, CA, Elétric Power Research Inst., 1978 (EPRI-NP-565- Project 709).
- [3] SANTOS, A.; FERREIRA, C. R. Elaboração de uma interface AMPX-II/HAMMER-TECHNION, publicado no 3o. CGEN, Rio de Janeiro Brasil, 1990.
- [4] SANTOS, A.; LOPEZ, E. M. AMPXR e BRDROL: dois novos módulos para sistema NJOY, IPEN/CNEN-SP, 1990.
- [5] SANTOS, A.; FERREIRA, C.R.; FERNANDES. M.A.R.  $UO_2$ - $PuO_2$  criticality analysis based on a coupled system NJOY/AMPX-II/HAMMER-TECHNION, IAEA Technical Committee Meeting on Technical and Economical Aspectos of High Converters, Nurnberg FRG, 1990.

## ABSTRACT

The HAMMER-TECHNION, a few-group cell code, shows questionable results for reactor fueled with Plutonium. One of the reasons is the thermal energy cut-off (0.625 eV) used by this code wich does not include the effects of the resonances of actinides in the thermal region. A new thermal cut-off has been implemented in this code and a new library has been elaborated by NJOY. The new version of HAMMER-TECHNION has been checked by solving several critical benchmarcks and the results has been compared to others from literature. It has been achieved that the thermal energy cut-off alone can not justify all the discrepancies.