

ER 78 01243



**ANÁLISE DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DE CÉLULAS CONTENDO BARRAS  
DE COMBUSTÍVEIS DE  $\text{ThO}_2$  E  $\text{UO}_2$ , MODERADAS POR ÁGUA**

**José Onusic Jr. e Willem Jan Oosterkamp**

**PUBLICAÇÃO IEA 493  
CEN - AFP. 54**

**DEZEMBRO/1977**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DE CÉLULAS CONTENDO BARRAS  
DE COMBUSTÍVEIS DE  $\text{ThO}_2$  E  $\text{UO}_2$ , MODERADAS POR ÁGUA**

José Onusic, Jr. e Willem Jan Oosterkamp

**CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR**  
Área de Física de Reatores

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
SÃO PAULO - BRASIL

**APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM OUTUBRO/1977**

**CONSELHO DELIBERATIVO**

**MEMBROS**

Klaus Reinach - Presidente  
Roberto D'Utra Vaz  
Helcio Modesto da Costa  
Ivano Humbert Marchesi  
Admer Cervellini

**PARTICIPANTES**

Regina Elisabete Azevedo Beretta  
Flávio Gori

**SUPERINTENDENTE**

Rômulo Ribeiro Pieroni

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**  
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)  
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"  
**SÃO PAULO - BRASIL**

# ANÁLISE DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DE CÉLULAS CONTENDO BARRAS DE COMBUSTÍVEIS DE $\text{ThO}_2$ E $\text{UO}_2$ , MODERADAS POR ÁGUA

José Onúscio Jr. e Willem Jan Oosterkamp

## RESUMO

Analizou-se uma série de células moderadas por água leve com a utilização de  $\text{UO}_2$  e  $\text{ThO}_2$  em barras combustíveis com o programa HAMMER.

Obteve-se com este estudo avaliar os resultados fornecidos pelo programa por meio de comparações com valores experimentais.

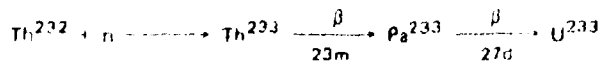
Discutiu-se os modelos empregados na análise e efetuou-se algumas modificações nos parâmetros de ressonância do  $\text{Th-232}$  recomendando-se valores diferenciais que forneceram parâmetros integrais celulares mais convergentes com a experiência.

## 1 - INTRODUÇÃO

Este trabalho pode ser considerado como uma continuação do que já foi apresentado na recente dissertação de mestrado<sup>(1)</sup>. Nesta foi feito um estudo crítico do programa HAMMER<sup>(10)</sup>, levando-se em conta as diversas combinações teóricas que podem ser utilizadas durante a sua aplicação. Na elaboração da dissertação utilizamos nos de células características dos reatores PWRs, entretanto considerando-se a enorme quantidade de resultados experimentais encontrados para as células que possuem urânio metálico levemente enriquecido como combustível, nenhuma citação foi dada àquelas que se utilizam de  $\text{UO}_2$ . Desta forma nossa primeira preocupação é efetuar uma análise dos resultados encontrados com o programa para células que se utilizam de  $\text{UO}_2$  nas barras de combustíveis, para complementar o estudo anterior.

A utilização de tório em reatores nucleares torna-se cada vez mais atrativa com a crescente demanda de  $\text{U-235}$  encarecendo desta forma o produto. Graças às excelentes propriedades nucleares do  $\text{U-233}$  este elemento é de grande interesse na fabricação de combustíveis nucleares substituindo com vantagem os combustíveis fabricados a partir do  $\text{U-235}$ .

A obtenção do  $\text{U-233}$  pode ser realizada nos reatores nucleares a partir do  $\text{Th-232}$ , segundo a reação,



Portanto, notamos que é de interesse real um estudo mais aprofundado do ponto de vista dos parâmetros neutrônicos celulares obtidos com o programa HAMMER quando da sua aplicação em células que possuam  $\text{Th-232}$  e  $\text{U-233}$ .

Também serão utilizadas algumas células envenenadas por  $\text{H-BO}_3$  na região de moderador para se estudar o comportamento dos parâmetros neutrônicos integrais com este tipo de célula.

## 2 – PROCEDIMENTO

O programa HAMMER é utilizado em cálculos celulares e determina o valor de  $K_{ef}$  dependente do valor de entrada do buckling. Desta maneira o valor de  $B^2$  necessário para que  $K_{ef} = 1$  pode ser determinado, assim como usando-se o valor medido do buckling crítico o programa determina o valor de  $K_{ef}$ .

procedendo-se da segunda maneira poderemos então fazer uma comparação entre os parâmetros nucleares integrais calculados pelo programa e os valores experimentais encontrados na literatura. Uma vez que a teoria utilizada pelo programa já foi extensivamente analisada no trabalho anterior, resta-nos apenas dirigir atenção para os parâmetros diferenciais utilizados pelo programa que se encontram armazenados nas bibliotecas do mesmo, quando algum desvio mais acentuado for encontrado entre os valores medidos e calculados, e que podem requerer alguma modificação.

Em síntese propõe-se à avaliação dos parâmetros por meio de comparações com valores medidos modificando-se alguns dos dados da biblioteca quando os utilizados já não satisfizerem às exigências do cálculo.

## 3 – CÉLULAS COM $UO_2 \cdot H_2O$

Como dissemos anteriormente esta parte tem a finalidade de complementar o trabalho de dissertação baseado em combustível a partir de U-238 e U-235 na forma metálica. As barras combustíveis tem o formato cilíndrico com aço inoxidável envolvendo o óxido combustível. As barras denominadas NMSR foram usadas preliminarmente em experiências para o projeto do "Nuclear Ship Savannah"<sup>(15)</sup> e caracterizam-se por dois diferentes tipos de enriquecimento a 3% e 4%. Na tabela I descrevemos estes tipos de combustível.

Tabela I

Descrição das Barras Combustíveis

Designação do Combustível	Razão $U_5/U_6$	Camisa	Densidade do Combustível ( $g/cm^3$ )	Diâmetro da Barra (cm)	Diâmetro do pellet (cm)	Espessura da Camisa (cm)
NMSR-3	0,0313	aço-304	9,28	1,270	1,126	0,072
NMSR-4	0,0422	aço-304	9,43	1,270	1,126	0,072

### 3.1 – Configurações das Células

As células analisadas formam redes quadradas. Na tabela II mostramos os valores dos bucklings críticos medidos experimentalmente e as distâncias entre barras combustíveis contíguas denominadas de "lattice pitch"<sup>(11)</sup>. Esses parâmetros são necessários como dados de entrada para o programa.

### 3.2 – Resultados

Para estes tipos de células vamos fazer somente uma análise global do sistema que é representado pelo valor de  $K_{ef}$ . Os parâmetros neutrônicos que caracterizam determinadas regiões

Tabela II

Configuração das Células

Caso	Designação do Combustível	Lattice pitch(cm)	buckling ( $m^{-2}$ )
1	NMSR 3	2,196	69
2	"	1,684	64
3	"	1,554	51
4	NMSR 4	2,381	92
5	"	2,196	93
6	"	1,684	86
7	"	1,554	69

energéticas apresentaram o mesmo comportamento quando da utilização de combustível metálico. Portanto, uma discussão particularizada destes parâmetros não se faz aqui necessário uma vez que está detalhadamente descrito no trabalho recente<sup>(7)</sup>.

Dando prosseguimento a esta idéia mostramos na tabela III os valores de  $K_{ef}$  obtidos para estas células.

Os resultados encontrados são considerados excelentes caracterizando-se por estarem abaixo do valor unitário e dentro de um desvio do valor experimental inferior a 1%.

Tabela III

Valores de  $K_{ef}$  Obtidos com o Programa HAMMER

Caso	$K_{ef}$	desvio
1	0,988	0,012
2	0,992	0,008
3	0,995	0,005
4	0,993	0,007
5	1,008	0,008
6	0,995	0,005
7	0,999	0,001

#### 4 - CÉLULAS COM $^{233}\text{UO}_2 - \text{ThO}_2 - \text{H}_2\text{O}$

Nesta parte vamos analisar as células que contém Tório e Urânio-233 nas barras combustíveis. Os resultados experimentais utilizados nas comparações são provenientes de vários arranjos críticos<sup>(11,12)</sup>, e podemos dividir o conjunto de células em dois blocos distintos. Inicialmente um grupo onde contamos apenas com Tório na região combustível, essas barras são identificadas como CETR por terem sido inicialmente usadas para o projeto do "Consolidated Edison Thorium Reactor"<sup>(2,4)</sup> e como TUPE quando usadas numa série de experiências do "Thorium Uranium Physics Experiments"<sup>(1,9)</sup>. No outro bloco de células já contamos com barras combustíveis que apresentam U-233 em sua composição, inclusive com algumas células moderadas por água leve borada<sup>(12)</sup>.

#### 4.1 – Geometria e Composição das Barras Combustíveis

As barras combustíveis são caracterizadas por diferentes proporções entre os elementos férteis e físseis. O combustível é uma mistura entre  $UO_2$  e  $ThO_2$ , sendo que o óxido de urânio é enriquecido a 93,17% em U-235. Nas tabelas IV e V mostramos as características de cada barra analisada.

Tabela IV

Geometria das Barras Combustíveis

Designação do combustível	Diâmetro do pellet (cm)	Espessura do encamisamento (cm)	Espessura de ar (cm)	Diâmetro da barra (cm)
CETR-4	0,660	0,048	0,018	0,792
CETR-7	0,660	0,048	0,018	0,792
TUPE-4	0,594	0,086	0,01	0,785
TUPE-7	0,660	0,036	0,025	0,782

Tabela V

Composição das Barras Combustíveis

Designação do Combustível	Densidade do Combustível ( $g/cm^3$ )	Enca-misa-manto	Composição do Combustível (átomos/barr.cm)			
			$Th^{232}$	$U^{238}$	$U^{235}$	$O^{16}$
CETR-4	8,35	aço-304	0,0182870	0,0000513	0,0007083	0,0395740
CETR-7	8,35	aço-304	0,0177714	0,0000857	0,0011640	0,0380801
TUPE-4	8,45	alumínio	0,0184920	0,0000533	0,0007310	0,0385304
TUPE-7	8,33	alumínio	0,0177292	0,0000854	0,0011812	0,0379835

densidade do aço –  $7,9 g/cm^3$

densidade do Al –  $2,7 g/cm^3$

A seguir damos as características geométricas e de composição para a barra combustível que contém U-233 em forma de óxido.

densidade do combustível:	8,96 $g/cm^3$
diâmetro do pellet:	1,0922 cm
encamisamento:	Zircaloy-2
espessura da camisa:	0,0876 cm
diâmetro da barra:	1,2675 cm
densidade do Zircaloy:	6,8365 $g/cm^3$
composição do combustível:	$U^{233}O_2 \cdot ThO_2$

Elemento	átomos por célula
H <sup>232</sup>	0,0195115
U <sup>233</sup>	0,0006102
U <sup>234</sup>	$9,09 \times 10^{-6}$
U <sup>235</sup>	$2,7 \times 10^{-7}$
U <sup>238</sup>	$6,55 \times 10^{-6}$
O <sup>16</sup>	0,0408832
B <sup>10</sup>	$4,4 \times 10^{-7}$

#### 4.2 – Configuração das Células

Na tabela VI colocamos os valores do "lattice pitch" e do buckling crítico medido experimentalmente para as células que se utilizam dos combustíveis CETR e TUPE. Todas as células são de geometria quadrada.

Tabela VI

Configuração das Células CETR e TUPE

Caso	Designação do Combustível	Lattice pitch (cm)	buckling ( $\text{m}^{-2}$ )
1	CETR-4	1,023	29,3
2	"	0,966	26,2
3	CETR-7	1,933	57
4	"	1,367	94
5	"	1,115	84
6	"	1,023	72
7	"	0,966	61
8	TUPE-4	1,446	53,55
9	"	1,222	64,01
10	TUPE-7	1,222	114,2
11	"	1,023	94,25
12	"	0,978	85,31

Na tabela VII colocamos as características das células que contém a barra combustível com U-233 no seu interior. Aparece na tabela a razão entre os volumes ocupados pelo moderador e combustível representados por  $V_M/V_F$  que são os dados fornecidos na literatura. A partir destes valores calculamos o diâmetro da célula cilíndrica equivalente à célula real segundo a equação:

$$d_c = (1,6066 + 1,1929 \frac{V_M}{V_F})^{1/2}$$

onde  $d_c$  representa o diâmetro da célula equivalente. Os valores encontrados estão na tabela e foram utilizados como dados de entrada para o programa HAMMER.



Tabela VII

Características das Células  $U^{233}O_2 - ThO_2$ 

Caso	$V_M/V_F$	$H_3BO_3$ (mg/cm <sup>3</sup> )	$d_c$ (cm)	buckling (m <sup>-2</sup> )
1	0,997	0,0	1,6721	75,88
2		13,3		42,1
3		25,0		18,8
4	1,384	0,0	1,8048	86,06
5		7,82		50,6
6		22,9		3,65
7	1,7134	0,0	1,9106	89,34
8		4,74		60,4
9		18,88		-1,8
10	2,1943	0,0	2,0553	90,35
11		4,71		50,5
12		13,3		-2,1
13	3,0043	0,0	2,2783	85,54
14		4,99		26,5
15		7,82		1,99
16	4,2722	0,0	2,5890	69,8
17		2,68		22,6
18		4,96		-7,67
19	6,8449	0,0	3,1260	32,2
20		1,7		-10,8
21	9,2747	0,0	3,5595	-1,22

#### 4.3 – Razão do Fluxo Térmico

##### 4.3.1 – Introdução

Para realizarmos uma análise mais detalhada destas células dividiremos a região energética de nêutrons numa região térmica compreendida entre 0 eV e 0,625 eV, e numa região epitérmica rápida acima de 0,625 eV.

Na região térmica encontramos na literatura uma série de medidas experimentais relativas à distribuição de nêutrons dentro da célula representada pelo fluxo ou densidade de nêutrons. A representação destas medidas é dada pelo fator de desvantagem térmico que nos fornece a razão entre os fluxos ou as densidades de nêutrons do moderador e combustível.

Desta maneira o fator de desvantagem térmico é escrito,

$$\delta\phi = \frac{\bar{\phi}_M}{\bar{\phi}_F} \quad \text{ou} \quad \delta N = \frac{\bar{N}_M}{\bar{N}_F}$$

onde

- $\bar{\phi}_M$  - fluxo térmico médio no moderador
- $\bar{\phi}_F$  - fluxo térmico médio no combustível
- $\bar{N}_M$  - densidade média de nêutrons térmicos no moderador
- $\bar{N}_F$  - densidade média de nêutrons térmicos no combustível

#### 4.3.2 - Comparação com Valores Experimentais

Avaliamos o fator de desvantagem térmico pelos dois métodos possíveis que o programa possui para o cálculo da distribuição de nêutrons. Esses dois métodos diferem quanto à teoria empregada para o cálculo do kernel de transporte na solução do fluxo de nêutrons térmicos da célula<sup>(7)</sup>.

Baseado nesta consideração mostramos nas tabelas VIII e IX os valores calculados do fator de desvantagem térmico com os dois métodos empregados ao lado dos correspondentes valores experimentais para efeito de comparação.

Tabela VIII

Valores Calculados e Experimentais de  $\delta\phi$  para as Células CETR e TUPE

Caso	Combustível	Experimental	Kernel exato	Desvio	Aproximação Muller-Linartz	Desvio
1	CETR-4	1,14	1,22	0,08	1,12	-0,02
6	CETR-7	1,19	1,31	0,12	1,17	-0,02
8	TUPE-4	1,22	1,20	0,02	1,17	-0,05
9	TUPE-4	1,16	1,20	0,04	1,14	-0,02
10	TUPE-7	1,22	1,29	0,07	1,21	0,01
11	TUPE-7	1,12	1,30	0,18	1,16	0,04
12	TUPE-7	1,22	1,31	0,09	1,14	-0,08

Tabela IX

Valores Calculados e Experimentais de  $\delta N$ . Células  $^{233}\text{UO}_2 - \text{ThO}_2$

Caso	$V_M/V_F$	Experimental	Kernel exato	Desvio	Aproximação Muller-Linartz	Desvio
1	0,997	1,219 ± 0,024	1,334	0,115	1,222	0,003
4	1,384	1,257 ± 0,024	1,328	0,071	1,255	-0,002
7	1,7134	1,270 ± 0,024	1,332	0,062	1,278	0,008
10	2,1943	1,302 ± 0,024	1,349	0,047	1,307	0,005
13	3,0043	1,325 ± 0,024	1,373	0,048	1,344	0,019
16	4,2722	1,379 ± 0,024	1,403	0,024	1,388	0,009
19	6,8449	1,430 ± 0,034	1,446	0,016	1,446	0,016
21	9,2747	1,447 ± 0,034	1,479	0,032	1,480	0,033

Os resultados mostram que o método de Muller-Linnartz fornece os valores do fator de vantagem térmico mais convergentes com os valores experimentais. É importante frisar também que os resultados se encontram dentro dos desvios experimentais, o que nos garante a necessária confiabilidade nos parâmetros diferenciais da biblioteca do programa. Veremos adiante a importância desta conclusão ao analisarmos a criticidade dos sistemas.

#### 4.4 – Ressonância e Criticalidade

##### 4.4.1 – Introdução

A região epitérmica é caracterizada pela existência de picos de ressonância nos elementos férteis como U-238 e Th-232 que são extremamente importantes no cálculo de um reator. O parâmetro representativo desta região energética medido experimentalmente é  $\rho$  que é dado pela razão entre as capturas ocorridas pelo elemento fértil na região de ressonância pelas capturas na região térmica.

Para o nosso caso o elemento de interesse é o tório, assim

$$\rho = \frac{\text{Capturas do Th na região de ressonância}}{\text{Capturas do Th na região térmica}}$$

##### 4.4.2 – Comparação com Valores Experimentais

Nas tabelas X e XI apresentamos os resultados calculados para  $\rho$  comparando-os com valores experimentais.

Tabela X

Valores Teóricos e Experimentais de  $\rho$  para as Células CETR

Caso	Combustível	Experimental	Calculado	Desvio
2	CETR-4	1,28	1,07	-0,21
6	CETR-7	1,49	1,32	-0,17
7	CETR-7	2,08	1,65	-0,43

Veremos que os valores calculados apresentam-se divergentes dos valores experimentais. Entretanto um desvio acentuado no cálculo deste parâmetro pode não afetar significativamente a criticidade do sistema. Assim antes de nos aprofundarmos na tentativa de explicar essa divergência vejamos como se comporta o valor do fator de multiplicação efetivo,  $K_{ef}$ , para estas células.

Colocamos, então, nas tabelas XII e XIII os valores do fator de multiplicação efetivo,  $K_{ef}$ , e os desvios do valor unitário.

Observando-se as tabelas XII e XIII verificamos que o programa superestima o valor de  $K_{ef}$  numa faixa de 2% a 3%. Se compararmos nossos resultados com os valores teóricos encontrados na literatura [2, 11, 12], chegaremos à conclusão de que estes desvios são muito altos.

Tabela XI

Valores Calculados e Experimentais de  $\rho$ . Células  $^{233}\text{UO}_2 - \text{ThO}_2$ 

Caso	$V_M/V_F$	Experimental	Calculado	Desvio
1	0,997	$1,380 \pm 0,042$	1,158	-0,222
4	1,384	$0,928 \pm 0,038$	0,794	-0,134
7	1,7134	$0,754 \pm 0,024$	0,630	-0,124
10	2,1943	$0,607 \pm 0,026$	0,487	-0,120
13	3,0043	$0,435 \pm 0,013$	0,358	-0,077
19	6,8449	$0,218 \pm 0,008$	0,177	-0,041
21	9,2747	$0,170 \pm 0,007$	0,142	-0,028

Tabela XII

Valores de  $K_{eff}$  para as Células CETR e TUPE

Caso	Combustível	Calculado	Desvio
1	CETR-4	1,030	0,030
2	"	1,021	0,021
3	CETR-7	1,014	0,014
4	"	1,016	0,016
5	"	1,022	0,022
6	"	1,025	0,025
7	"	1,030	0,030
8	TUPE-4	1,016	0,016
9	"	1,021	0,021
10	TUPE-7	1,023	0,023
11	"	1,013	0,013
12	"	1,012	0,012

Tabela XIII

Valores de  $K_{eff}$  para as Células com  $^{233}\text{UO}_2 - \text{ThO}_2$ 

Caso	$V_M/V_F$	Calculado	Desvio
1	0,997	1,025	0,025
4	1,384	1,022	0,022
7	1,7134	1,023	0,023
10	2,1943	1,022	0,022
13	3,0043	1,020	0,020
16	4,2722	1,017	0,017
19	6,8449	1,011	0,011
21	9,2747	1,007	0,007

Analisando-se a tabela XIII notamos que os desvios diminuem à medida em que aumenta a relação de moderador para combustível. Significa que o erro aumenta à medida que o espectro neutrônico tende a ser mais duro. Sabendo-se que não há maiores problemas no cálculo dos parâmetros da região térmica como foi visto no ítem 4.3.2. e que onde os espectros neutrônicos se apresentam mais duros há uma maior influência da região epitérmica, concluímos que é esta região a responsável pelos altos desvios em  $K_{ef}$ . A partir deste raciocínio achamos necessário uma avaliação dos parâmetros diferenciais armazenados na biblioteca epitérmica do programa.

#### 4.4.3 – Largura de Captura, $\Gamma\gamma$

Observando-se as tabelas X e XI verificamos que os valores calculados de  $\rho$  são sistematicamente menores que os valores experimentais. A causa deste comportamento traduz-se pela subestimação das capturas de nêutrons pelo Tório, levando a uma superestimação de  $K_{ef}$ .

O programa HAMMER ao calcular as seções de choques na região de ressonância necessita como "input", dos parâmetros de ressonância armazenados na biblioteca. Dentre estes parâmetros encontra-se aquele relativo às capturas do Tório,  $\Gamma\gamma$ , denominado largura de captura. Os valores de  $\Gamma\gamma$  utilizados são recomendados por Sehgal e podem ser vistos na tabela do Anexo 1.

Uma alternativa para melhorar nossos resultados é utilizar os parâmetros de largura de ressonância recomendados por Devaney<sup>(3)</sup> em substituição aos parâmetros de Sehgal. Veja-se Tabela do Anexo 1. A metodologia da mudança desses parâmetros é explicada no Anexo 2.

Com a criação da nova biblioteca, refizemos os cálculos, mostrando inicialmente nas tabelas XIV e XV os resultados encontrados para  $\rho$ .

Tabela XIV

Valores Calculados de  $\rho$  com  $\Gamma\gamma$  Recomendado por Devaney. Células CETR

Caso	Combustível	Experimental	Calculado	Desvio
2	CETR-4	1,28	1,22	-0,06
6	CETR-7	1,49	1,47	-0,02
7	CETR-7	2,08	1,84	-0,24

Tabela XV

Valores Calculados de  $\rho$  com  $\Gamma\gamma$  Recomendado por Devaney. Células  $^{235}\text{UO}_2 - \text{ThO}_2$

Caso	$V_M/V_F$	Experimental	Calculado	Desvio
1	0,997	1,380 ± 0,042	1,287	-0,093
4	1,384	0,928 ± 0,038	0,880	-0,048
7	1,7134	0,754 ± 0,024	0,697	-0,057
10	2,1943	0,607 ± 0,026	0,539	-0,068
13	3,0043	0,435 ± 0,013	0,396	-0,039
19	6,8449	0,218 ± 0,008	0,195	-0,023
21	9,2747	0,170 ± 0,007	0,158	-0,012

Há uma sensível melhora nas novas determinações de  $\rho$  com a modificação efetuada.

Mostramos nas tabelas XVI e XVII o efeito da mudança na criticidade dos sistemas.

Uma comparação entre as tabelas onde aparecem as determinações para  $K_{ef}$ , mostra que com os novos parâmetros introduzidos criando uma nova opção de cálculo reduz-se sensivelmente os desvios em  $K_{ef}$ .

Com a nova biblioteca estimamos  $K_{ef}$  com um desvio máximo de 1,5%, enquanto anteriormente chegamos a 3%. Esses novos cálculos podem ser considerados excelentes pois uma determinação de  $K_{ef}$  dentro de 1,5% está nos padrões aceitos para uso rotineiro em cálculo. Trabalho recente para células com Th e  $^{233}\text{U}$  utilizando modelos teóricos e programas de computação mais sofisticados chegou a determinações de  $K_{ef}$  dentro de 1,3% de desvio.

Tabela XVI

Valores de  $K_{ef}$  para as Células CETR e TUPE

Caso	Combustível	Calculado	Desvio
1	CETR-4	1,017	0,017
2	"	1,006	0,006
3	CETR-7	1,012	0,012
4	"	1,011	0,011
5	"	1,012	0,012
6	"	1,013	0,013
7	"	1,015	0,015
8	TUPE-4	1,012	0,012
9	"	1,015	0,015
10	TUPE-7	1,015	0,015
11	"	1,001	0,001
12	"	0,998	- 0,002

Tabela XVII

Valores de  $K_{ef}$  para as Células  $^{233}\text{UO}_2 - \text{ThO}_2$

Caso	$V_M/V_F$	Calculado	Desvio
1	0,997	1,007	0,007
4	1,384	1,008	0,008
7	1,7134	1,012	0,012
10	2,1943	1,013	0,013
13	3,0043	1,013	0,013
16	4,2722	1,012	0,012
19	6,8449	1,008	0,008
21	9,2747	1,005	0,005

Para visualizarmos melhor a influencia de  $\Gamma\gamma$  nas absorções do Tório fazemos no Anexo 3 uma comparação entre o balanceamento de nêutrons para cada caso estudado.

Na tabela XVIII mostramos os valores calculados de Kef com os parâmetros recomendados por Devaney para as células que possuem boro diluído na região moderadora.

Tabela XVIII

Valores de Kef para as Células Boradas

Caso	$V_M/V_F$	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (mg/cm <sup>3</sup> )	Kef
2	0,997	13,3	1,011
3	"	25,0	1,015
5	1,384	7,82	1,013
6	"	22,9	1,011
8	1,7134	4,74	1,009
9	"	18,88	1,006
11	2,1943	4,71	1,010
12	"	13,3	1,004
14	3,0043	4,99	1,006
15	"	7,82	0,999
17	4,2722	2,68	1,004
18	"	4,96	0,994
20	6,8449	1,7	0,996

## 5 - CONCLUSÕES

Pelo trabalho exposto chegamos à conclusão que a região térmica está bem representada com os parâmetros utilizados pelo programa. Na região epitérmica criamos uma nova biblioteca para o Tório baseado na necessidade de uma melhor estimativa de Kef. Com esta modificação conseguimos melhores resultados que forem comprovados durante a exposição do trabalho.

Portanto, baseado na análise efetuada, recomendamos a utilização desta nova biblioteca em cálculos de projetos de reatores que incluem Tório em sua composição.

Para os demais elementos não há necessidade de maior refinamento em seus parâmetros.

## Anexo 1

Parâmetros da Lança de Captura  $\gamma$  Modificados para o Tório  
Região das Ressonâncias Resolvidas

Energia de Ressonância (eV)	Experimental* (eV x 10 <sup>-3</sup> )	Devaney (eV x 10 <sup>-3</sup> )	Seghal (eV x 10 <sup>-3</sup> )
21,8	23 ± 2	34	30
23,5	25 ± 2	35	30
59,4	23,2 ± 1,2	21	30
69,0	21,9 ± 1,0	43	30
112,8	20,1 ± 0,9	42	30
120,6	21,0 ± 1,0	41	30
129,0	18,8 ± 2,0	40	30
145,7		40	30
154,3		40	30
170,2	22,4 ± 0,9	48	30
192,4	18 ± 2	50	30
196,0		40	30
199,1	18,5 ± 2,0	40	30
220,9	20,7 ± 1,5	46	30
251,2	21,5 ± 1,5	42	30
263,0	18,6 ± 1,4	40	30
285,4	20,8 ± 1,2	50	30
305,1	20 ± 2	40	30
328,8	23,0 ± 1,0	53	30
341,7	20,0 ± 1,0	40	30
365,1	21 ± 2	40	30
369,3	22 ± 2	40	30
400,8	25 ± 6	40	30
420,7		40	30
454,3		40	30
462,4	21,5 ± 1,5	40	30
488,6	19,2 ± 1,2	40	30
510,7		40	30
528,6	20 ± 3	40	30
540,1		40	30
569,7	19,1 ± 1,6	30	30
578,2		40	30
598,2	19 ± 2	40	30
617,9		40	30
656,8	19 ± 2	40	30
665,2	18 ± 2	40	30
675,2	19,0 ± 1,6	40	30
687,4	21,3 ± 1,5	40	30
701,0	19 ± 4	40	30
712,8	19 ± 3	40	30
740,8	21,4 ± 1,4	40	30

Região das ressonâncias não resolvidas

2.035 KeV &lt; E &lt; 163,2 KeV

Recomendação de Devaney  $\Gamma = 0,04$  eVRecomendação de Seghal  $\Gamma = 0,01$  eV



De acordo com a tabela os dados recomendados por Devaney e Seghal diferem dos valores experimentais fornecidos pela BNL 3ª Edição. As energias dos picos de ressonância e os correspondentes valores de  $\Gamma\gamma$  são medidos experimentalmente e referem-se às ressonâncias do tipo s-wave. Teoricamente somente este tipo de ressonância é levado em conta devido à dificuldade teórica no tratamento das contribuições do tipo p-wave. Entretanto, para considerar a contribuição das p-wave recomenda-se valores maiores de  $\Gamma\gamma$  a fim de compensar o seu efeito.

Sabe-se que, experimentalmente, as integrais de ressonância para barras combustíveis isoladas são funções lineares de  $\sqrt{S/M}$ ,

$$I = a + b \sqrt{S/M}$$

onde S é a área superficial da barra e M é a massa do combustível. As constantes a e b são funções do tipo de combustível.

Desta forma, os parâmetros de ressonância são ajustados ao se levantar a curva teórica das integrais de ressonância testando-a com a curva experimental.

## ANEXO 2

**Metodologia da Mudança dos Parâmetros de Ressonância na Biblioteca do Programa HAMMER**

O primeiro passo efetuado foi gravar em disco as informações contidas em fita. Isto é realizado com o programa descrito na folha de programação 1. Neste processo recebemos uma listagem contendo todos os dados da biblioteca epitérmica do programa.

Por esta listagem identificamos o campo de interesse e procedemos às modificações necessárias. Na folha de programação 2 mostramos o caminho para estas modificações. Após o cartão `"/SYSIN DD"` entramos com os cartões que contêm os novos dados de interesse. Para o caso dos parâmetros de ressonância o critério é o seguinte:

## a) cartões de parâmetros de ressonâncias resolvidas

colunas	símbolo	descrição
1	3	identifica as ressonâncias resolvidas
2 a 4	GRP	grupo energético em que ocorre a ressonância
5 a 7	SEQ	nº sequencial da ressonância dentro do grupo
9 a 16	ER	energia de ressonância (eV)
17 a 24	$\Gamma_N$	largura de nêutron (eV)
25 a 32	$\Gamma_\gamma$	largura de captura (eV)
33 a 40	$\Gamma_F$	largura de fissão (eV)
41 a 48	SG	fator de spin, g
73 a 80	IDENTIFY	nº que identifica o cartão

## b) cartões dos parâmetros de ressonâncias não resolvidas

colunas	símbolo	descrição
1	4	identifica as ressonâncias não resolvidas
2 a 4	GRI	grupo inicial no qual ocorre a ressonância
5 a 7	GRF	grupo final no qual ocorre a ressonância
9 a 16	D	espaçamento de nível médio (eV)

A seguir gravamos em disco esta nova biblioteca agora no formato de leitura para o programa HAMMER. Veja-se folha de programação 3. Portanto, a nova biblioteca encontra-se no "data-set" EN.ONUSIC.HELP2 no disco 14.

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
 FOLHA DE PROGRAMAÇÃO FORTRAN 1

Pa. .... de ....

DIA	MES	ANO	PROGRAMA
			PROGRAMADOR:

```

// EXEC PGM=IEBUPDTE,PARM=MOD
// SYSPRINT DD SYSOUT=A
// SYSUT1 DD DSN=H= MJOBRA,UNIT=280,LABEL=(7,NL),
// DISP=(OLD,KEEP),VOL=SER= MJOBRA,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200)
// SYSUT2 DD DSN=H= EN.MUSIC.HAMBPGTH,UNIT=3330,VOL=SER=100014,
// DCB=(RECFM=FB,LRECL=80,BLKSIZE=3200)DISP=(NEW,KEEP),
// SPACE=(TRK,(10,10),RLSE)
// SYSLIN DD *
// CHANGE LIST=ALL
// NUMBER NEW=40,INCR=10
// ENDU P
    
```

INSTITUTO DE ENERGIA ATOMICA  
 DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
 PLANO DE MANEJO DE RESIDUOS

1. OBJETIVO: El presente documento tiene como finalidad establecer las normas y procedimientos para el manejo de los residuos generados en las actividades de la planta de Ensenada.

2. ALCANCE: Este procedimiento aplica a todos los empleados de la planta de Ensenada que generen residuos durante sus actividades laborales.

3. REFERENCIAS: Este procedimiento se basa en el Reglamento de Seguridad Nuclear y en las normas establecidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

4. DEFINICIONES: Se definen los siguientes términos para efectos de este procedimiento:

4.1. Residuo: Cualquier material que sea el resultado de una actividad humana y que sea susceptible de causar daño a la salud humana o al medio ambiente.

4.2. Residuo radiactivo: Residuo que contiene uno o más radionúclidos en cantidades superiores a los límites establecidos en el Reglamento de Seguridad Nuclear.

5. PROCEDIMIENTO: El procedimiento para el manejo de los residuos se describe a continuación:

5.1. Clasificación de los residuos.

5.2. Almacenamiento de los residuos.

5.3. Eliminación de los residuos.

6. CONTROL Y MONITORIA

IDENTIFICACION	FECHA	ESTADO	COMENTARIOS
1	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
2	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
3	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
4	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
5	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
6	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
7	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
8	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
9	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo
10	10/10/2010	EN USO	Residuo radiactivo



## ANEXO 3

## Balanceamento de Nêutrons

Mostramos nas tabelas A.3.1 e A.3.2 os balanceamentos neutrônicos característicos da célula do caso 11 que utiliza o combustível TUPE-7 usando os parâmetros recomendados por Seghal e Devaney para efeito de comparação.

O grupo energético 3 que corresponde à região energética compreendida entre 0.625 eV e 5,53 KeV é a que sofre a influência dos parâmetros modificados.

Tabela A.3.1

Balanceamento de Nêutrons Utilizando-se os Parâmetros de Captura Recomendados por Seghal

Absorções					
Isótopo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Total
Th-232	7,42	9,96	69,84	70,08	157,30
U-238	0,10	0,07	4,51	0,12	4,80
U-235	3,77	7,40	92,49	391,81	495,47
H	0,01	0,06	3,21	23,48	26,76
O	2,83	0,00	0,00	0,00	2,83
Al	0,34	0,12	0,81	2,01	3,08
Fugas	148,20	98,26	53,73	8,57	309,76
Total	162,67	116,87	224,39	496,07	1000,00
Fissões					
Isótopo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Total
Th-232	11,77	—	—	—	11,77
U-238	0,23	—	—	—	0,23
U-235	9,47	14,40	151,08	813,06	988,00
Total	21,47	14,40	151,08	813,06	1000,00

Tabela A.3.2

Balaceamento de Nêutrons Utilizando-se os Parâmetros de Captura Recomendados por Devaney

Absorções					
Isótopo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Total
Th-232	7,47	10,98	77,80	70,02	166,25
U-238	0,10	0,07	4,52	0,12	4,81
U-235	3,80	7,47	82,58	391,80	485,65
H	0,01	0,08	3,21	23,44	26,72
O	2,85	-	-	-	2,85
Al	0,33	0,12	0,61	2,01	3,07
Fugas	143,97	98,62	52,03	8,23	300,85
Total	158,53	115,30	230,75	485,42	1000,00
Fissões					
Isótopo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Total
Th-232	11,85				11,85
U-238	0,22				0,22
U-235	9,53	14,54	151,24	812,62	987,93
Total	21,60	14,54	151,24	812,62	1000,00

## ABSTRACT

A large number of light water moderated lattices of  $UO_2$  and  $ThO_2$  fuel rods were analyzed with the code HAMMER.

The purpose of the study was to compare experimental results with calculated values with the code.

The model employed is described and some modification were introduced in the resonance parameters of Th-232 to increase the agreement with the experimental value.

## RESUMÉ

On a analysé une série de réseaux ralentis à l'eau légère comprenant des barres de combustible d' $UO_2$  et  $ThO_2$  avec le code HAMMER.

La proposition de cet'étude a été comparer les résultats expérimentaux avec ce du code.

On a discuté les modèles employés dans l'analyse et on a effectué quelques modifications dans les paramètres de résonance du Th-232 pour obtenir paramètres intégrés plus convergent avec les valeurs expérimentales.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BARRETT, L. G. & MORTENSON, J. H. *Exponential experiments on lattices moderated by  $D_2O$   $H_2O$  mixtures: spectral shift reactor basic physics program*. Lynchburg, Va., The Babcock & Wilcox Co., Jan. 1962.
2. BATCH, M. L. & SNIDOW, N. L. *Consolidated Edison thorium reactor critical experiments with oxide fuel pins*. Lynchburg, Va., The Babcock & Wilcox Co., July 1960. (BAW-119).
3. DEVANEY, J. J. et alii. *Thorium cross sections and their temperature dependence*. Los Alamos, N. Mex., Los Alamos Scientific Lab., July 1961. (LA-2525).
4. EDLUND, M. C. et alii. *Physics of water-moderated thorium reactor*. In: UNITED NATIONS, Geneva. *Proceedings of the second United Nations international conference on the peaceful uses of atomic energy, held in Geneva, 1 September - 13 September 1958, v.13: Reactor physics and economics*. Geneva, 1958. p.482-91.
5. MacKINNEY, A. L. & BALL, R. M. *Reactivity measurements on unperturbed slightly enriched uranium lattices*. *Trans. Am. nucl. Soc.*, Hinsdale, Ill., 3:72-4, 1960.
6. MUGHABGHAB, S. F. & GARBER, D. I. *Neutron cross sections*. 3.ed. Brookhaven, Brookhaven National Lab., June 1973. (BNL-325).
7. ONUSIC JR., J. *Possibilidades teóricas de cálculo do programa de computação HAMMER*. São Paulo, 1976. [Dissertação de Mestrado].
8. SEHGAL, B. R. et alii. *Analysis of BNL  $^{233}U$ - $ThO_2$  exponential experiments with ENDF/B Data*. *Trans. Am. nucl. Soc.*, Hinsdale, Ill., 23:559-60, 1976.
9. SNIDOW, N. L. et alii. *Thorium uranium physics experiments: final report*. Lynchburg, Va., The Babcock & Wilcox Co., May 1960.
10. SUICH, J. E. & HONECK, H. C. *The HAMMER system: heterogeneous analysis by multigroup methods of exponential and reactors*. Aiken, S. C., Savannah River Lab., June 1967. (DP-1064).
11. WEHMEYER, D. B. *Analysis of water moderated  $UO_2$  and  $ThO_2$  lattices*. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. *Light water lattices: report of the panel on ... in Vienna, 28 May - 1 June 1962*. Vienna, 1962. p.177-210.
12. WINDSOR, H. H. et alii. *Exponential experiments with lattices of uranium-233 oxide and thorium oxide in light and heavy water*. *Nucl. Sci. Engng*, Hinsdale, Ill., 42:160-61, 1970.

