

## APLICAÇÃO DO CÓDIGO MCNP5 E SUAS BIBLIOTECAS DE ENERGIA CONTÍNUA EM ANÁLISES DE SEGURANÇA DE CRITICALIDADE

Jean A. D. Salomé, Cláudia Pereira

Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brazil  
jadsalome@yahoo.com.br; claudia@nuclear.ufmg.br

### ABSTRACT

O estudo de sistemas críticos e subcríticos é muito importante na concepção, instalação e operação de vários dispositivos, principalmente, reatores nucleares e usinas de energia. As informações geradas por esses sistemas podem orientar as decisões a serem tomadas na elaboração do projeto executivo de uma instalação, na análise da viabilidade econômica de um empreendimento e nas medidas de segurança preventivas e de intervenção a serem empregadas em uma instalação nuclear.

Simulando alguns experimentos do International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, o código MCNP5 produziu resultados que estavam em conformidade com os valores obtidos experimentalmente, além disso, foi validado como ferramenta para análise de segurança de criticalidade nuclear, pois os valores produzidos atenderam às exigências dos padrões das normas de segurança para estocagem de materiais combustíveis estabelecidos pelas autoridades brasileiras.

### 1. INTRODUÇÃO:

Neste estudo, o código computacional MCNP5 é validado como uma ferramenta para analisar a criticalidade de alguns sistemas. Para executar essa tarefa, o código MCNP5 simula a resolução da equação de transporte de nêutrons, considerando as dependências temporal e energética em uma geometria tridimensional, através do método estatístico de Monte Carlo. Depois de verificar a consistência dos resultados simulados em comparação com os valores de referência, a relevância desses valores no que diz respeito aos limites de criticalidade para o armazenamento de material combustível exigido pelas autoridades nucleares brasileiras será avaliada.

### 2. METODOLOGIA:

No total, 79 casos são simulados: 18 casos para LCT006, 30 casos de LCT010, 8 casos de LCT054, 14 casos de LCT073, 5 casos para LCT077 e 4 casos para LCT089. Nas simulações foram usados 500 ciclos ativos com 5000 nêutrons por ciclo.

#### 2.1 Modelo LEU-COMP-THERM-006

O modelo consiste em uma matriz de barras de combustível dispostas em forma retangular, que varia de 16x16 a 21x21 hastes. O combustível é enriquecido a 2,6%, em peso, de  $U^{235}$ . Os arranjos estão à temperatura ambiente e parcialmente submersos em água leve [1]. A água leve serve como moderador e material refletor. Detalhes das configurações são mostrados na Figura 1.

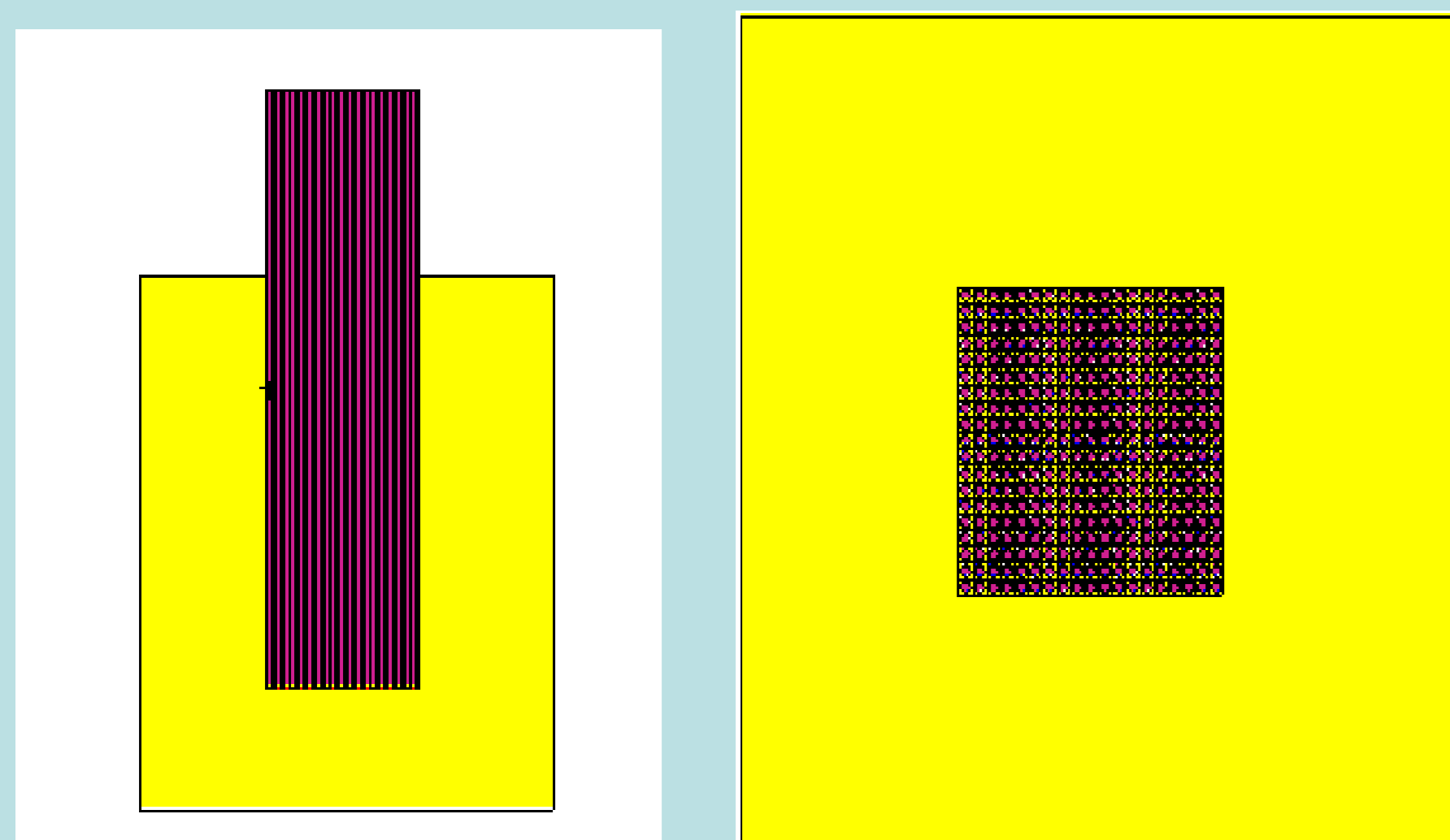


Fig. 1 – Visão Longitudinal e Transversal de LCT006

#### 2.2 Modelo LEU-COMP-THERM-010

O experimento consiste em três matrizes retangulares de barras de combustível. Os grupos são compostos por conjuntos de 13x8 ou 12x16 hastes de acordo com cada caso. O combustível é enriquecido a 4,31%, em peso, de  $U^{235}$ . Os três conjuntos de hastes são apoiados em uma placa de acrílico e são ladeados por duas paredes refletoras de metal. As paredes podem ser de chumbo, aço ou urânio empobrecido. Os detalhes das configurações são mostrados na Figura 2.

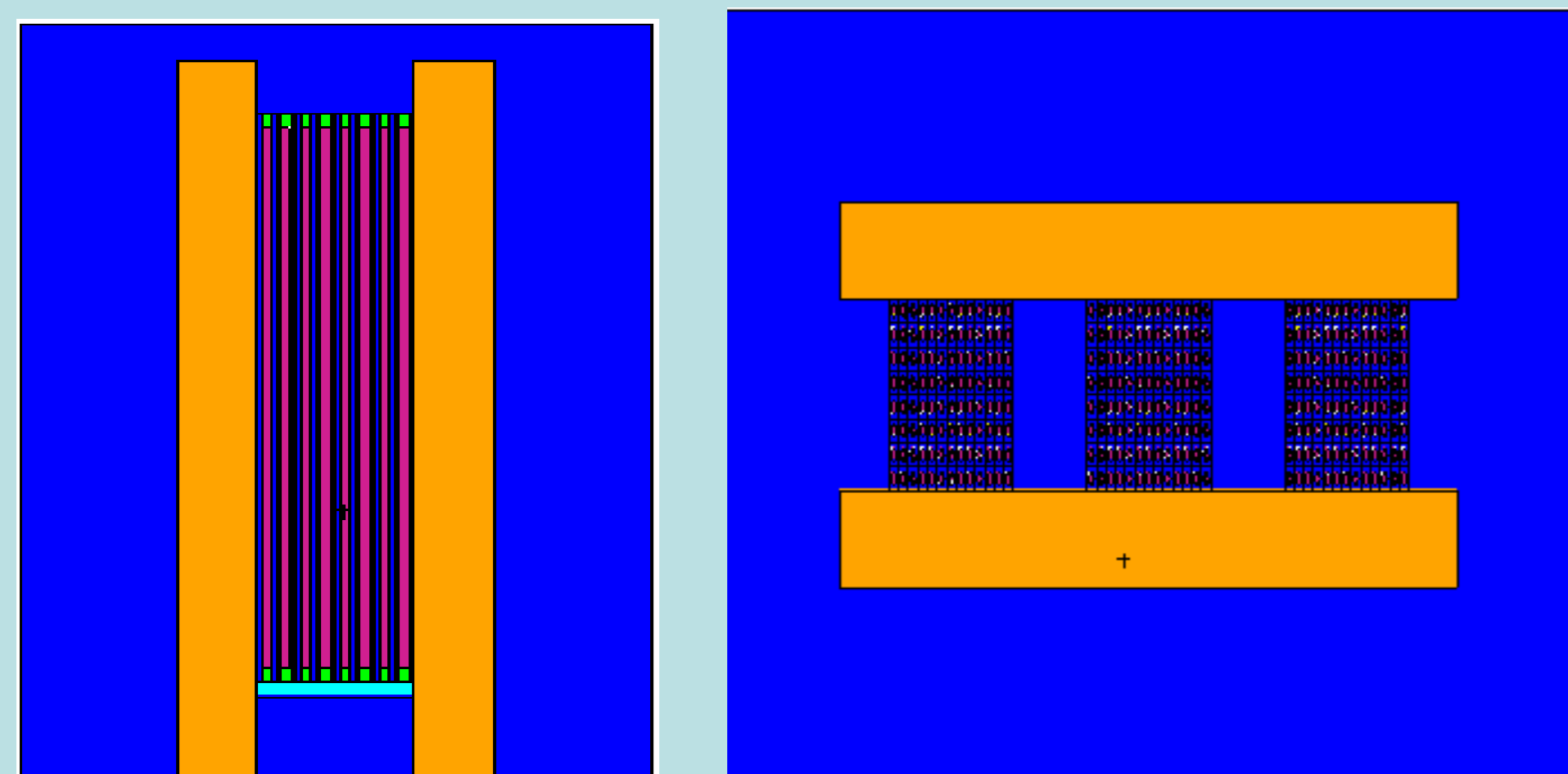


Fig. 2 – Visão Longitudinal e Transversal de LCT010

#### 2.3 Modelo LEU-COMP-THERM-054

Os casos simulados referem-se a uma série de experimentos conduzidos nas instalações do reator de pesquisa IPEN/MB-01. As barras de combustível contêm  $UO_2$  com urânio enriquecido a 4,35% em peso, de  $U^{235}$ . As configurações incluem a presença de um determinado número de barras  $UO_2$ - $Gd_2O_3$  no núcleo ativo do reator. A Figura 3 representa uma das oito configurações que foram avaliadas [1].

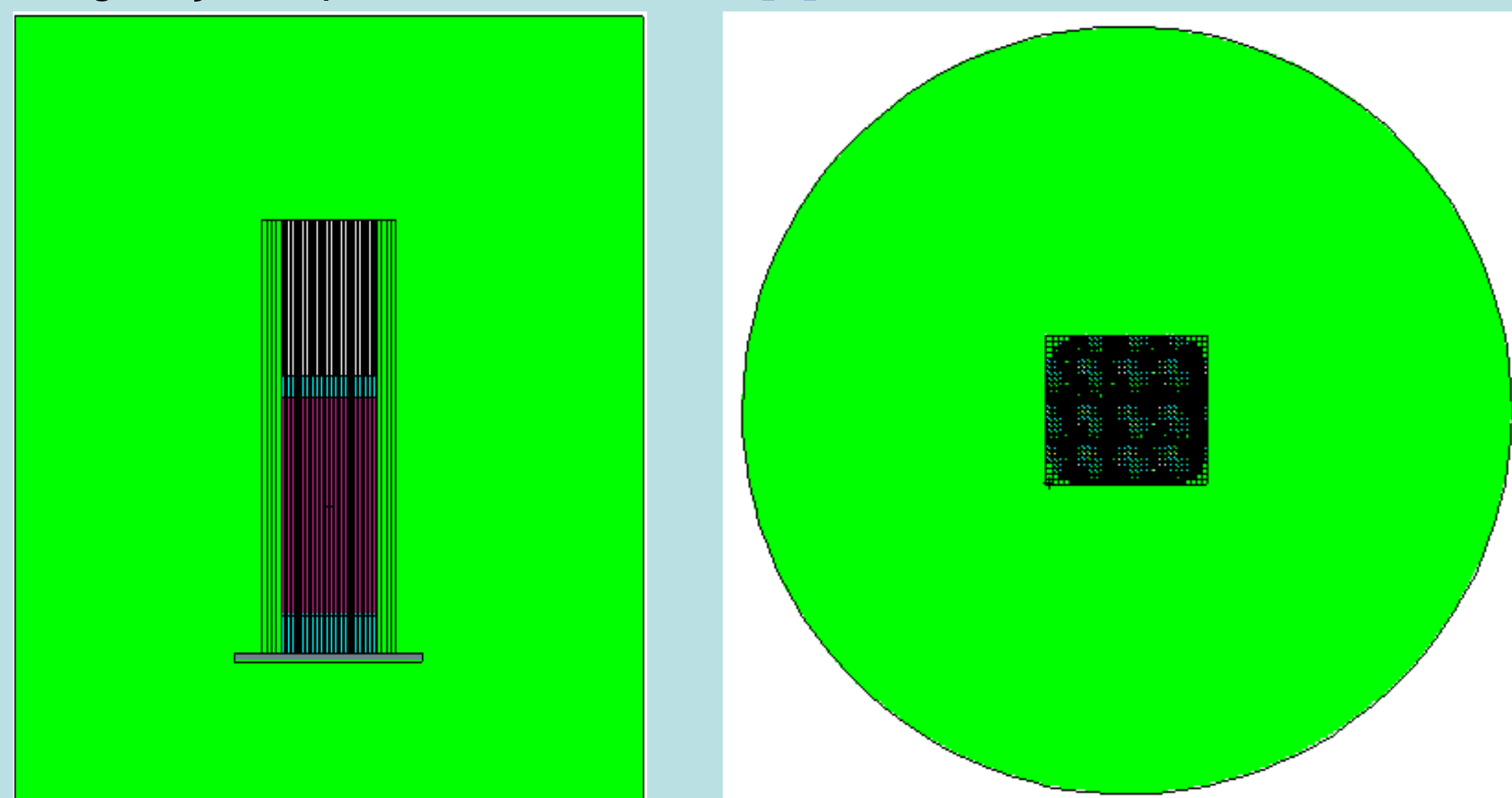


Fig. 3 – Visão Longitudinal e Transversal de LCT054

#### 2.4 Modelo LEU-COMP-THERM-073

O experimento consiste em quatro lattices compostas de barras de combustível preenchidas com pastilhas de  $UO_2$  com urânio enriquecido a 4,74%, em peso, de  $U^{235}$ . Os experimentos foram realizados no Valduc Centre for Nuclear Studies, França, em 1998. No total, 14 experimentos foram feitos. A Figura 4 mostra a configuração de um desses experimentos.

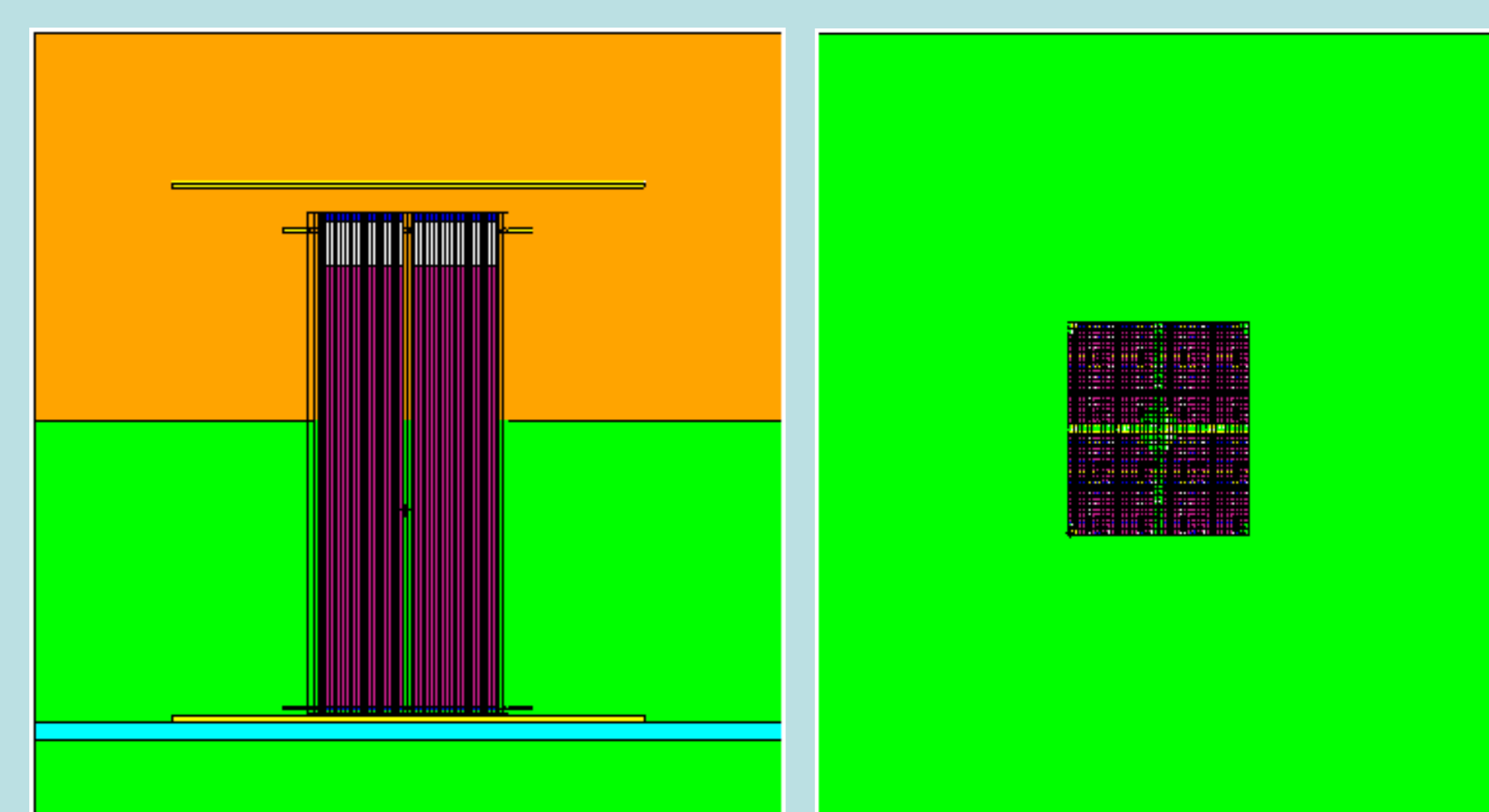


Fig. 4 – Configurações Longitudinal e Transversal de LCT073

#### 2.5 Modelo LEU-COMP-THERM-077

Nesta experiência, o núcleo do reator IPEN/MB-01 é envolto por chapas retangulares defletoras. As chapas são compostas por placas de aço inoxidável. As barras de combustível contêm  $UO_2$  com urânio enriquecido a 4,35%, em peso, de  $U^{235}$ . Algumas configurações também incluem a presença de barras de veneno queimável ( $Al_2O_3$  -  $B_4C$ ) inseridas no núcleo. A Figura 5 ilustra uma dessas experiências [1]. Foram realizados cinco experimentos no total.

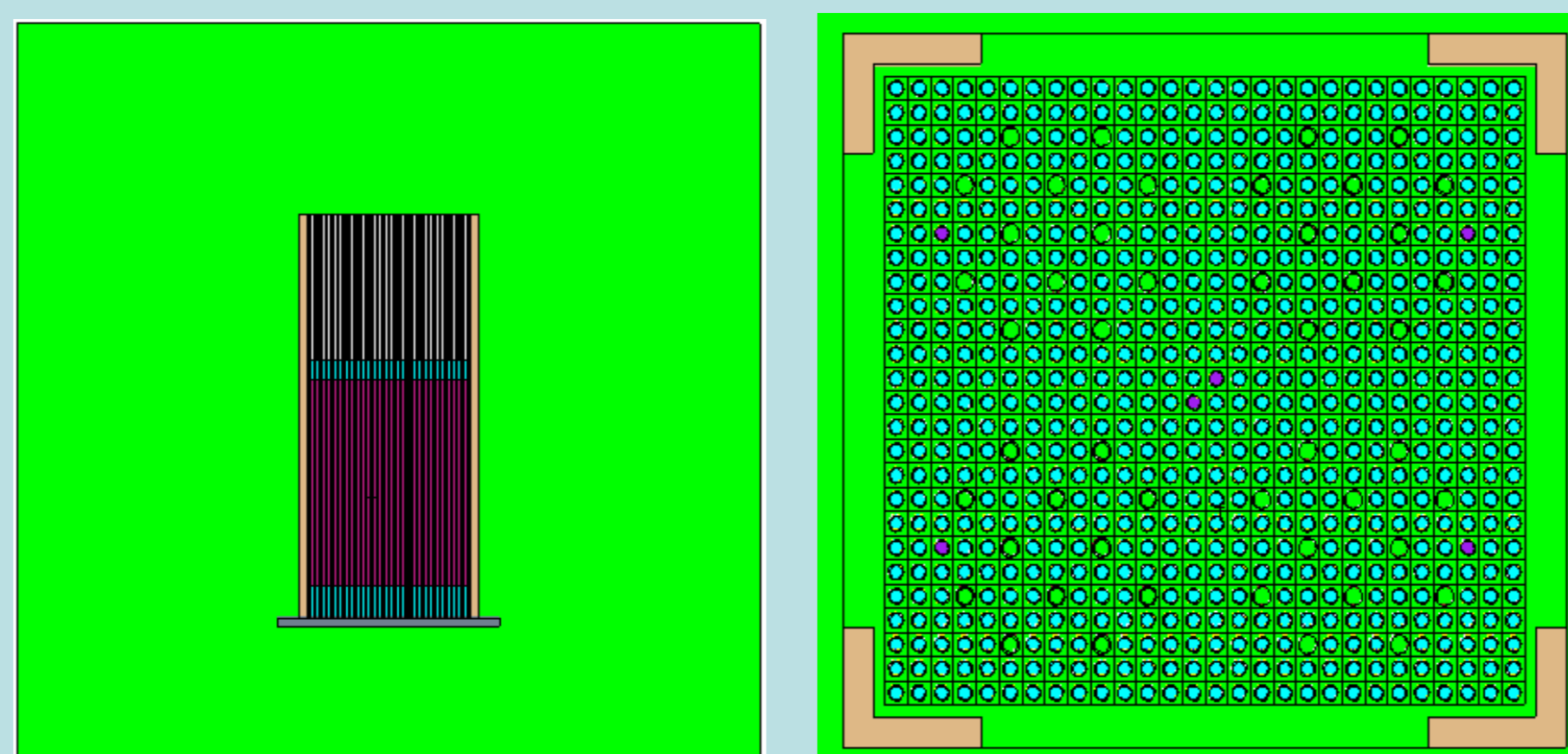


Fig. 5 – Configurações Longitudinal e Transversal de LCT077

#### 2.6 Modelo LEU-COMP-THERM-089

Nesse estudo, o reator IPEN/MB-01 é utilizado novamente no estabelecimento dos benchmarks. As configurações avaliadas incluem a inserção de duas placas de aço borado inseridas entre as barras de combustível. A Figura 5 ilustra uma dessas experiências [1]. Foram feitos 4 experimentos.

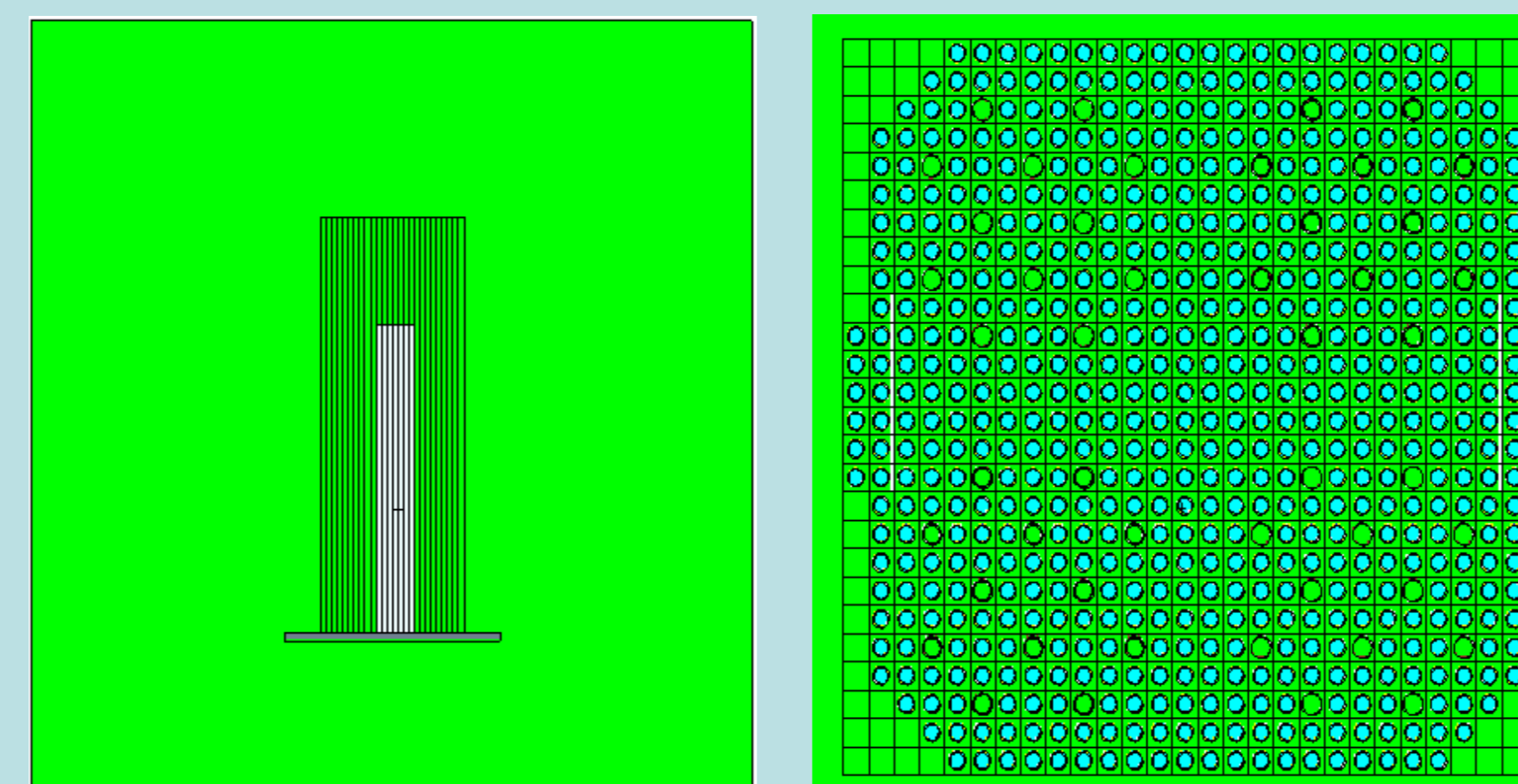


Fig. 6 – Configurações Longitudinal e Transversal de LCT089

### 3. RESULTADOS:

Para realizar o cálculo do valor médio de  $k_{eff}$  para os eventos de fissão, o código MCNP5 utiliza a seguinte expressão (1) [2]:

$$k_{eff} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n W_i \bar{\nu}_k \frac{\sigma_{fk}}{\sigma_{ck} + \sigma_{fk}} \quad (1)$$

Na tabela 1 são apresentados os resultados obtidos por MCNP5. Observa-se que 81% dos resultados obtidos por MCNP5 estão em conformidade com os valores de referência.

Para verificar a relevância das simulações com respeito à norma, foi determinado o Limite Subcrítico Superior (LSS) para cada situação. Este limite é obtido a partir da equação (2):

$$LSS = {}^{nom}k_{eff} - \beta - 2 \cdot \sigma_{avg} \quad (2)$$

O valor de  $\beta$  é calculado pela equação (3):

$$\beta = |1 - {}^{avg}k_{eff}| \quad (3)$$

Os valores encontrados são:

$${}^{avg}k_{eff} = 1,0001 \pm 0,0005$$

$$\beta = 0,0001$$

$$LSS = 0,9489^{(1)} \text{ e } 0,9789^{(2)}$$

Os valores calculados para LSS são comparados com os limites impostos pela norma CNEN-NE-5.02 na Tabela 2 [3].

Material Combustível	Operação	$k_{eff}$ (Norma)	LSS
Não irradiado	Normal <sup>(1)</sup>	0,95	0,9489
	Acidente <sup>(2)</sup>	0,98	0,9789
Irradiado	Normal <sup>(1)</sup>	0,95	0,9489
	Acidente <sup>(1)</sup>	0,95	0,9489

Tab. 2 – Valores do Limite Subcrítico Superior (LSS)

#### Agradecimentos:

Os autores são gratos à CAPES, CDTN/CNEN, FAPEMIG e CNPq pelo suporte financeiro.

#### Referências:

- [1] NUCLEAR ENERGY AGENCY – NEA, International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03/I-IX, OECD-NEA, September, 2010.
- [2] J. F. BRIESMEISTER, MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, Los Alamos National Laboratory, Report LA-13709-M, 1997.
- [3] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR – CNEN, NE-5.02 Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Elementos Combustíveis de Usinas Nucleoeletrônicas, Rio de Janeiro, 2003.

Caso nº	Valores Referência	Valores Simulados
	$k_{eff} \pm \sigma_{keff}$	$k_{eff} \pm \sigma_{keff}$
LCT006-C01	1,000 ± 0,002	0,9982 ± 0,0005
LCT006-C02	1,000 ± 0,002	0,9988 ± 0,0005
LCT006-C03	1,000 ± 0,002	0,9990 ± 0,0005
LCT006-C04	1,000 ± 0,002	0,9993 ± 0,0005
LCT006-C05	1,000 ± 0,002	0,9998 ± 0,0004
LCT006-C06	1,000 ± 0,002	0,9998 ± 0,0005
LCT006-C07	1,000 ± 0,002	0,9994 ± 0,0004
LCT006-C08	1,000 ± 0,002	0,9989 ± 0,0005
LCT006-C09	1,000 ± 0,002	0,9987 ± 0,0005
LCT006-C10	1,000 ± 0,002	0,9998 ± 0,0004
LCT006-C11	1,000 ± 0,002	0,9996 ± 0,0005
LCT006-C12	1,000 ± 0,002	1,0002 ± 0,0005
LCT006-C13	1,000 ± 0,002	0,9999 ± 0,0005
LCT006-C14	1,000 ± 0,002	0,9997 ± 0,0005
LCT006-C15	1,000 ± 0,002	0,9993 ± 0,0004
LCT006-C16	1,000 ± 0,002	0,9994 ± 0,0004
LCT006-C17	1,000 ± 0,002	1,0005 ± 0,0007
LCT006-C18	1,000 ± 0,002	0,9983 ± 0,0007
LCT010-C01	1,0000 ± 0,0021	<b>1,0089 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT010-C02	1,0000 ± 0,0021	<b>1,0093 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT010-C03	1,0000 ± 0,0021	<b>1,0059 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT010-C04	1,0000 ± 0,0021	<b>0,9960 ± 0,0004<sup>(a)</sup></b>
LCT010-C05	1,0000 ± 0,0021	0,9996 ± 0,0004
LCT010-C06	1,0000 ± 0,0021	<b>1,0150 ± 0,0004<sup>(a)</sup></b>
LCT010-C07	1,0000 ± 0,0021	1,0014 ± 0,0004
LCT010-C08	1,0000 ± 0,0021	0,9996 ± 0,0005
LCT010-C09	1,0000 ± 0,0021	1,0011 ± 0,0005
LCT010-C10	1,0000 ± 0,0021	1,0008 ± 0,0005
LCT010-C11	1,0000 ± 0,0021	1,0015 ± 0,0005
LCT010-C12	1,0000 ± 0,0021	1,0007 ± 0,0005
LCT010-C13	1,0000 ± 0,0021	<b>0,9971 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT010-C14	1,0000 ± 0,0028	0,9991 ± 0,0004
LCT010-C15	1,0000 ± 0,0028	0,9996 ± 0,0005
LCT010-C16	1,0000 ± 0,0028	0,9994 ± 0,0005
LCT010-C17	1,0000 ± 0,0028	0,9998 ± 0,0005
LCT010-C18	1,0000 ± 0,0028	0,9984 ± 0,0005
LCT010-C19	1,0000 ± 0,0028	0,9981 ± 0,0005
LCT010-C20	1,0000 ± 0,0028	1,0028 ± 0,0005
LCT010-C21	1,0000 ± 0,0028	1,0016 ± 0,0005
LCT010-C22	1,0000 ± 0,0028	1,0016 ± 0,0005
LCT010-C23	1,0000 ± 0,0028	0,9982 ± 0,0005
LCT010-C24	1,0000 ± 0,0028	0,9985 ± 0,0005
LCT010-C25	1,0000 ± 0,0028	1,0006 ± 0,0005
LCT010-C26	1,0000 ± 0,0028	1,0004 ± 0,0004
LCT010-C27	1,0000 ± 0,0028	1,0024 ± 0,0005
LCT010-C28	1,0000 ± 0,0028	1,0019 ± 0,0005
LCT010-C29	1,0000 ± 0,0028	1,0021 ± 0,0005
LCT010-C30	1,0000 ± 0,0028	1,0003 ± 0,0005
LCT054-C01	1,0007 ± 0,0005	1,0000 ± 0,0005
LCT054-C02	1,0005 ± 0,0005	1,0002 ± 0,0005
LCT054-C03	1,0004 ± 0,0005	1,0004 ± 0,0005
LCT054-C04	1,0006 ± 0,0005	0,9998 ± 0,0005
LCT054-C05	1,0005 ± 0,0005	0,9998 ± 0,0005
LCT054-C06	1,0002 ± 0,0005	1,0002 ± 0,0005
LCT054-C07	1,0005 ± 0,0005	0,9998 ± 0,0004
LCT054-C08	1,0002 ± 0,0005	0,9992 ± 0,0005
LCT073-C01	1,0000 ± 0,0010	<b>0,9980 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C02	1,0000 ± 0,0010	<b>0,9982 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C03	1,0000 ± 0,0010	<b>0,9958 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C04	1,0000 ± 0,0016	0,9997 ± 0,0005
LCT073-C05	1,0000 ± 0,0016	0,9985 ± 0,0005
LCT073-C06	1,0000 ± 0,0011	0,9990 ± 0,0005
LCT073-C07	1,0000 ± 0,0011	0,9984 ± 0,0005
LCT073-C08	1,0000 ± 0,0011	<b>0,9967 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C09	1,0000 ± 0,0021	0,9984 ± 0,0005
LCT073-C10	1,0000 ± 0,0010	0,9992 ± 0,0005
LCT073-C11	1,0000 ± 0,0010	<b>0,9979 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C12	1,0000 ± 0,0011	<b>0,9982 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C13	1,0000 ± 0,0011	<b>0,9979 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT073-C14	1,0000 ± 0,0011	<b>0,9964 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT077-C01	1,0003 ± 0,0010	1,0016 ± 0,0005
LCT077-C02	1,0004 ± 0,0010	1,0010 ± 0,0005
LCT077-C03	1,0004 ± 0,0010	1,0017 ± 0,0005
LCT077-C04	1,0004 ± 0,0010	1,0016 ± 0,0004
LCT077-C05	1,0003 ± 0,0010	<b>1,0026 ± 0,0005<sup>(a)</sup></b>
LCT089-C01	1,0003 ± 0,0010	0,9997 ± 0,0004
LCT089-C02	1,0005 ± 0,0010	0,9996 ± 0,0005
LCT089-C03	1,0003 ± 0,0010	1,0001 ± 0,0005
LCT089-C04	1,0003 ± 0,0010	1,0008 ± 0,0005

(a) Não conformidade entre simulação e valor de referência.

Tab. 1 – Valores de  $k_{eff}$  calculado por MCNP5.

### 4. CONCLUSÃO:

Considerando os valores apurados por essa pesquisa e os comparando com os valores de referência, pode ser afirmado que o código MCNP5 e suas bibliotecas de energia contínua são ferramentas apropriadas para realizar a análise das condições de criticalidade de sistemas experimentais. Assim, a modelagem feita através do código MCNP5 pode ser considerada útil no planejamento de projetos de segurança de instalações nucleares. Obviamente, mais pesquisas podem corroborar e enriquecer os resultados encontrados através desse estudo.