



## Cálculo de Transporte e Homogeneização de Elemento Combustível

Meira, L. F.<sup>1</sup>; Stefani, G. L.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*luisfelipemeira@poli.ufrj.br*

<sup>2</sup>*laranjogiovanni@poli.ufrj.br*

PROGRAMA DE ENGENHARIA  
NUCLEAR COPPE/UFRJ - UFRJ | Av.  
Horácio Macedo, 2030, Bloco G - Sala 206 -  
CT, Cidade Universitária CEP. 21.941-914 -  
Rio de Janeiro - RJ

### 1. Introdução

A demanda energética global tem aumentado devido ao largo consumo, muitas pesquisas estão sendo realizadas para suprir essa necessidade, a energia nuclear tem se mostrado como uma das fontes de energia mais eficazes para o futuro desta área de mercado [1]. Os reatores nucleares apresentam-se como eficazes candidatos, seja para atividades acadêmicas, em pesquisa e produção de radioisótopos para medicina e indústria, ou para produção de energia elétrica, como os reatores de potência [2]. No Brasil existem reatores de pesquisa, com exemplo temos o reator Argonauta, e de potência refrigerados a água pressurizada (PWR - Pressurized Water Reactors).

A utilização plena dos reatores nucleares de forma econômica e segura exige que se tenha boas condições do projeto e análise de importantes parâmetros relacionados aos dados nucleares, como a densidade de potência relativa de um reator, e das constantes de decaimento [2]. A Física de Reatores desempenha um importante papel nesse aspecto, através dela é possível simular o comportamento de parâmetros neutrônicos, assim como a reatividade do tempo de vida de um reator nuclear. O pleno conhecimento desses parâmetros favorecem o controle sobre o sistema do reator, por isso é importante que se tenha uma boa estimativa dos parâmetros envolvidos no sistema nuclear [2]. Existem muitos parâmetros que alteram a reatividade de um reator nuclear, dentre todos temos, a temperatura de operação e o consumo do combustível nuclear. Códigos computacionais especificamente projetados para essa finalidade possibilitam a simulação desses e demais parâmetros neutrônicos.

Esse trabalho tem como objetivo mostrar o cálculo de fluxo de potência de um elemento combustível em um reator nuclear. O modelo de elemento combustível a ser estudado neste trabalho possui a seguinte configuração:

- Geometria 17x17
- 264 varetas combustíveis
- 24 tubos guias

Para os cálculos apresentados neste trabalho foram considerados três tipos de materiais, que são: combustível UOX<sub>2</sub>, tubo-guia e veneno queimável VQ<sub>16</sub>. Foi utilizado um código em FORTRAN que resolve de forma numérica, a equação de transporte de nêutrons (que é descrita mais abaixo) em grupos de

energia, direções e regiões do espaço como ferramenta para a obtenção dos resultados que serão discutidos neste trabalho.

## 2. Metodologia

Existem inúmeros modelos e aproximações para o cálculo de nêutrons dentro de um reator nuclear. Este cálculo é de extrema importância, visto que o fluxo está diretamente relacionado com a taxa de reações que ocorrem neste mesmo núcleo. O modelo matemático a ser utilizado é mostrado com a eq.1 logo abaixo:

$$\frac{1}{9} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \psi(x, \Omega, E, t) + \sum_t(x, E, t) \psi(x, \Omega, E, t) = \int_0^{\infty} \int_{4\pi} \sum_t(x, \Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E, t) \psi(x, \Omega', E', t) d\Omega' dE' \quad (1)$$

Este é um dos modelos matemáticos mais bem aceitos e utilizados por profissionais da área e tem como objetivo, auxiliar o projeto e operação de um reator.

Vamos utilizar um código chamado de “homogeneização.exe”, em FORTRAN, e iremos colapsar os grupos de energia de um arquivo de dados nucleares e vamos homogeneizá-los. A primeira parte consiste em calcular o fluxo angular de nêutrons por meio de um outro código, também em FORTRAN, chamado de “transporte.exe”.

- **Configuração do Elemento Combustível:**

O EC estudado neste caso é mostrado na Figura 1 bem como a configurações de varetas que é ilustrada na Figura 2. No arquivo de configuração do EC utilizado como entrada do programa de Transporte, o EC é modelado em forma matricial especificando o nº de grupos de energia e zonas materiais. Também são especificados os tamanhos (cm) de cada linha e coluna da matriz representativa do EC. Para o cálculo foram considerados três tipos de células no elemento combustível: UOX-2, tubo guia e VQ<sub>16</sub>.

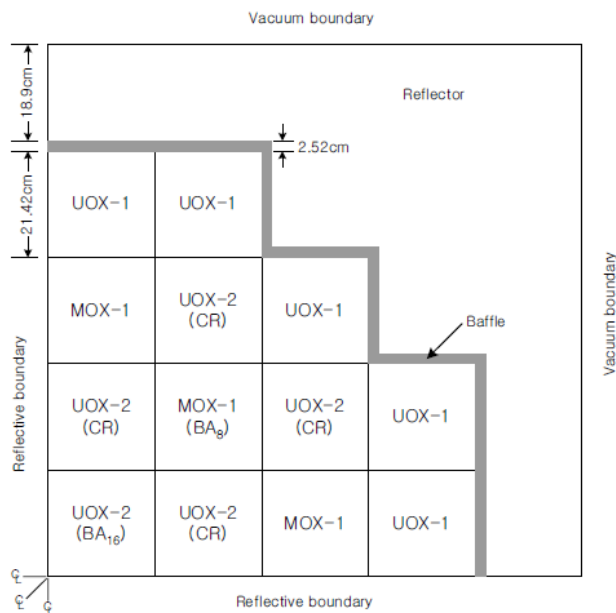


Figura 1: Representação do reator e EC

No caso estudado, como já mencionado anteriormente, foram considerados 3 materiais: combustível UOX-2 (2), tubo-guia (9) e veneno queimável VQ<sub>16</sub> (6). Foram também assumidas as seguintes condições de contorno: corrente líquida nula em contato com outros ECs (-1) e vácuo (0). Desta forma, a representação matricial do EC é apresentada abaixo pela figura 2.

0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1
-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1
-1	2	2	2	2	2	9	6	2	9	2	6	9	2	2	2	2	-1
-1	2	2	2	2	9	2	2	2	2	2	2	2	2	9	2	2	-1
-1	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	-1
-1	2	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	2	9	-1
-1	2	2	6	2	2	2	6	2	2	2	6	2	2	2	6	2	-1
-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1
-1	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	-1
-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1
-1	2	2	6	2	2	2	6	2	2	2	6	2	2	2	6	2	-1
-1	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	2	9	2	-1
-1	2	2	2	2	6	2	2	2	2	2	2	2	6	2	2	2	-1
-1	2	2	2	2	9	2	2	2	2	2	2	2	2	9	2	2	-1
-1	2	2	2	2	2	2	2	9	6	2	9	2	6	9	2	2	-1
-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1
-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-1
0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0

Figura 2: Representação Matricial do EC estudado com 3 Zonas Materiais

### • Programa de Transporte

O cálculo de transporte é realizado pela discretização da Equação 1, em 7 grupos de energia para um problema de autovalor estacionário. Utilizamos as seguintes condições para o programa: ordem de quadratura angular = 2; variável angular discretizada em direções específicas; três critérios de convergência (1E-10 em fluxo externa, 1E-05 em fluxo interna, 1E-11 em Keff). Dois arquivos de entrada foram montados para que se pudesse rodar o programa de transporte e obter os dados necessários ao programa de homogeneização sendo esses: configuração do EC e dados nucleares dos materiais que compõem o EC. Após a configuração dos arquivos de entrada, executamos o código “transporte.exe”, onde utilizamos a quadratura 2 e adotamos os seguintes parâmetros:

- Cálculo real
- Problema de Autovalor
- Cálculo para homogeneização
- Método Numérico DD
- Interrupção em fluxo para as interações externas
- Controle m fluxo para interações internas

### • Programa de Homogeneização

Uma vez com os dados de saída do programa de transporte e também dos arquivos nucleares do EC e configuração do EC, podemos executar o programa de homogeneização, que é responsável por homogeneizar os parâmetros nucleares em regiões do EC. O programa também é responsável pela colapsação dos grupos de energia de 7 para 2 grupos. Com isso, o programa gera arquivos de saída que informam os fluxos médios, correntes médias, Keff, fatores de forma e potência.

### 3. Resultados e Discussão

A tabela 1 apresenta os parâmetros de fluxos médios para ambos os grupos de energia obtidos, o grupo 1 se refere aos nêutrons rápidos com energia entre 0.6251eV e 20MeV, já o grupo 2 se refere aos nêutrons térmicos com energia entre 0 e 0.6251eV, como arquivos de saída do programa de homogeneização do elemento combustível, assim como o valor para o fator de multiplicação efetiva, o Keff. Portanto, pode-se observar que o Keff apresenta um valor um pouco acima da unidade, o que indica a super criticalidade do reator em questão. O que é esperado de um elemento combustível com 16 barras de veneno queimável e sem nenhuma barra de controle, quando se quer deixar uma margem de reatividade para manobras de potência.

Tabela 1: Representação Matricial do EC estudado com 3 Zonas Materiais

Keff	$\Phi_1$ nêutrons/cm <sup>2</sup> s	$\Phi_2$ nêutrons/cm <sup>2</sup> s
1.026479261620780E+00	2.672257098032570E+02	3.905198665219590E+01

Com base nos resultados da tabela 2, podemos concluir primeiramente, que a seção de choque de absorção para nêutrons térmicos é maior do que para nêutrons rápidos, uma vez que embora possa ocorrer para todos os níveis de energia, os processos de captura são mais comuns para nêutrons com energias mais baixas. A difusividade de nêutrons rápidos se mostrou maior do que as dos nêutrons térmicos, o que também é esperado, afinal eles possuem uma maior população em relação aos nêutrons térmicos. Já as seções de choque de espalhamento podemos ver que no caso do núcleo rápido sofrer um espalhamento e migrar para um estado térmico possui uma ordem de grandeza a mais do que o estado rápido, logo há uma maior probabilidade que um nêutron de maior energia acabe por perder-la mediante interações com a região do que um nêutrons térmico sofra um espalhamento e ganhe energia.

$\Sigma_{a1}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu\Sigma_{a1}$ (cm <sup>-1</sup> )	$D_1$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_s^{1\rightarrow 2}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\omega\Sigma_{f1}$ (cm <sup>-1</sup> )
1.004657012438537E-02	6.752965709136243E-03	1.093606487087567E+00	1.645361962950475E-02	8.740248083957935E-14
$\Sigma_{a2}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\nu\Sigma_{a2}$ (cm <sup>-1</sup> )	$D_2$ (cm <sup>-1</sup> )	$\Sigma_s^{2\rightarrow 1}$ (cm <sup>-1</sup> )	$\omega\Sigma_{f2}$ (cm <sup>-1</sup> )
1.105013736140104E-01	1.377867612894993E-01	3.199293581337621E-01	2.087781541812702E-03	1.835655923486564E-12

A figura 3. Nos mostra o perfil de potência obtido pelo programa de homogeneização. A primeira coisa a se observar é a simetria presente na distribuição de potência. Isso se deve ao fato de que o nosso elemento combustível analisado está localizado no centro do núcleo do reator. Com isso, a potência aumenta conforme nos aproximamos das extremidades do elemento combustível. Também é esperado a potência nula onde estão localizadas as barras de controle. E nos pontos onde há veneno queimável é observado uma redução brusca na potência do reator.

1.215	1.221	1.217	1.206	1.184	1.176	1.172	1.150	1.122	1.150	1.172	1.176	1.184	1.206	1.217	1.221
1.221	1.214	1.217	1.219	1.219	1.151	1.091	1.113	1.182	1.113	1.091	1.151	1.219	1.219	1.217	1.214
1.217	1.217	1.230	1.245	1.247	0	0.126	1.107	0	1.107	0.126	0	1.247	1.245	1.230	1.217
1.206	1.219	1.245	0	1.138	1.046	1.073	1.115	1.186	1.115	1.073	1.046	1.138	0	1.245	1.219
1.184	1.219	1.247	1.138	0.119	1.062	1.157	1.171	1.142	1.171	1.157	1.062	0.119	1.138	1.247	1.219
1.176	1.151	0	1.046	1.062	0	1.077	1.121	0	1.121	1.077	0	1.062	1.046	0	1.151
1.172	1.091	0.126	1.073	1.157	1.077	0.121	1.097	1.190	1.097	0.121	1.077	1.157	1.073	0.126	1.091
1.150	1.113	1.107	1.115	1.171	1.121	1.097	1.111	1.181	1.111	1.097	1.121	1.171	1.115	1.107	1.113
1.122	1.182	0	1.186	1.142	0	1.190	1.181	0	1.181	1.190	0	1.142	1.186	0	1.182
1.150	1.113	1.107	1.115	1.171	1.121	1.097	1.111	1.181	1.111	1.097	1.121	1.171	1.115	1.107	1.113
1.172	1.091	0.126	1.073	1.157	1.077	0.121	1.097	1.190	1.097	0.121	1.077	1.157	1.073	0.126	1.091
1.176	1.151	0	1.046	1.062	0	1.077	1.121	0	1.121	1.077	0	1.062	1.046	0	1.151
1.184	1.219	1.247	1.138	0.119	1.062	1.157	1.171	1.142	1.171	1.157	1.062	0.119	1.138	1.247	1.219
1.206	1.219	1.245	0	1.138	1.046	1.073	1.115	1.186	1.115	1.073	1.046	1.138	0	1.245	1.219
1.217	1.217	1.230	1.245	1.247	0	0.126	1.107	0	1.107	0.126	0	1.247	1.245	1.230	1.217
1.221	1.214	1.217	1.219	1.219	1.151	1.091	1.113	1.182	1.113	1.091	1.151	1.219	1.219	1.217	1.214
1.215	1.221	1.217	1.206	1.184	1.176	1.172	1.150	1.122	1.150	1.172	1.176	1.184	1.206	1.217	1.221

Figura 3: Perfil de Potência do EC

#### 4. Conclusão

De acordo com os resultados obtidos e apresentados anteriormente, podemos concluir que:

- Os resultados decorrentes da simulação estão de acordo com o esperado pela teoria;
- Um elemento combustível sem as barras de controle tende a ser supercrítico, ou seja  $K_{eff} > 1$ ;
- A simetria de zonas materiais com todos os venenos queimadas tendo as mesmas propriedades físicas, resulta em uma distribuição simétrica de potência/fluxo, para todos os grupos de energia;
- 
- O fluxo de nêutrons rápidos diminui na medida que se aproxima do centro do EC, uma vez que passam por inúmeras células tubo guia.

#### Reconhecimentos

The L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X format has been prepared by Professor Helio Pedro Amaral Souto, Instituto Politécnico (IPRJ), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Brasil.

#### Referências

[1] Fontes, G. S. (2014). UM MODELO BASEADO NA EQUAÇÃO DE ITÔ DA ANÁLISE DA CORROSÃO DE TUBULAÇÕES DE CENTRAIS NUCLEARES PARA A EXTENSÃO DA SUA VIDA ÚTIL QUALIFICADA (Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro).

[2] Maeda, R. D. M. (2012). Determinação experimental de parâmetros de Física de Reatores utilizando refletor de água pesada no Reator IPEN/MB-01 (Doctoral Dissertation, Universidade de São Paulo).