

## TNR5703 – Análise Termo-Fluido-Dinâmica de Reatores Nucleares

### Transferência de Calor em Reatores Nucleares

Ref. "Introduction to Nuclear Engineering" – Lamarsh & Baratta, Cap. 8, 3<sup>rd</sup> Ed.

## 2. Geração de Calor em Reatores Nucleares

### 2.1. Introdução

O ponto de partida no projeto de um sistema de resfriamento de reator é a determinação da distribuição espacial do calor produzido dentro do reator. Este problema será discutido nesta seção [1].

Para que um reator opere em regime permanente, todo o calor liberado no sistema deve ser removido tão rapidamente quanto é produzido. Isso é feito passando um refrigerante líquido ou gasoso através do núcleo (e através de outras regiões) onde o calor é gerado. **A transferência de calor dos elementos combustíveis (ECs) para o fluido deve ser igual ou maior que a taxa de geração de calor**, ou superaquecimento de todo o sistema pode ocorrer e gerar danos aos ECs. A natureza e operação deste sistema de refrigeração é uma das considerações mais importantes no projeto de um reator nuclear.

Deve-se notar que, do ponto de vista estritamente nuclear, teoricamente não há limite superior para a potência térmica do reator, que pode ser alcançada por qualquer reator crítico com excesso de reatividade suficiente para superar suas realimentações negativas de temperatura. Em cada reator nuclear há uma proporcionalidade direta entre o fluxo de nêutrons e a potência térmica do reator. O termo energia térmica significa a taxa na qual o calor é produzido no núcleo do reator como resultado de fissões no combustível.

Em suma, quase qualquer reator é capaz de exceder a capacidade de remoção de calor de seu sistema de refrigeração. A partir desse ponto, o combustível aqueceria e poderia atingir temperaturas muito altas. Esta situação deve ser evitada pelo operador do reator e pelos sistemas de segurança do reator. É essencial que o equilíbrio da taxa de geração de calor - taxa de remoção de calor seja mantido para evitar que essas temperaturas possam resultar na falha do combustível ou de outros materiais estruturais.

**Na engenharia de reatores nucleares, a termo-hidráulica descreve os processos físicos envolvendo o acoplamento de transferência de calor e dinâmica de fluidos para atingir a taxa de remoção de calor desejada do núcleo sob condições normais de operação e acidente [2].**

A energia liberada na fissão aparece em várias formas - como energia cinética dos nêutrons de fissão, como raios- $\gamma$  de fissão imediata, como raios- $\gamma$  e raios- $\beta$  do decaimento de produtos de fissão, e na emissão de neutrinos. Com exceção dos neutrinos, praticamente toda essa energia é absorvida em algum lugar do reator. No entanto, como essas várias radiações são atenuadas de maneiras diferentes pela matéria, sua energia tende a ser depositada em locais diferentes. Na discussão a seguir sobre a deposição de energia, assume-se que o combustível do reator está na forma de varetas de combustível individuais. É o caso de praticamente todos os conceitos de reatores de potência, exceto os chamados reatores rápidos resfriados a sal fundido.

## **2.2 Geração de calor numa vareta combustível**

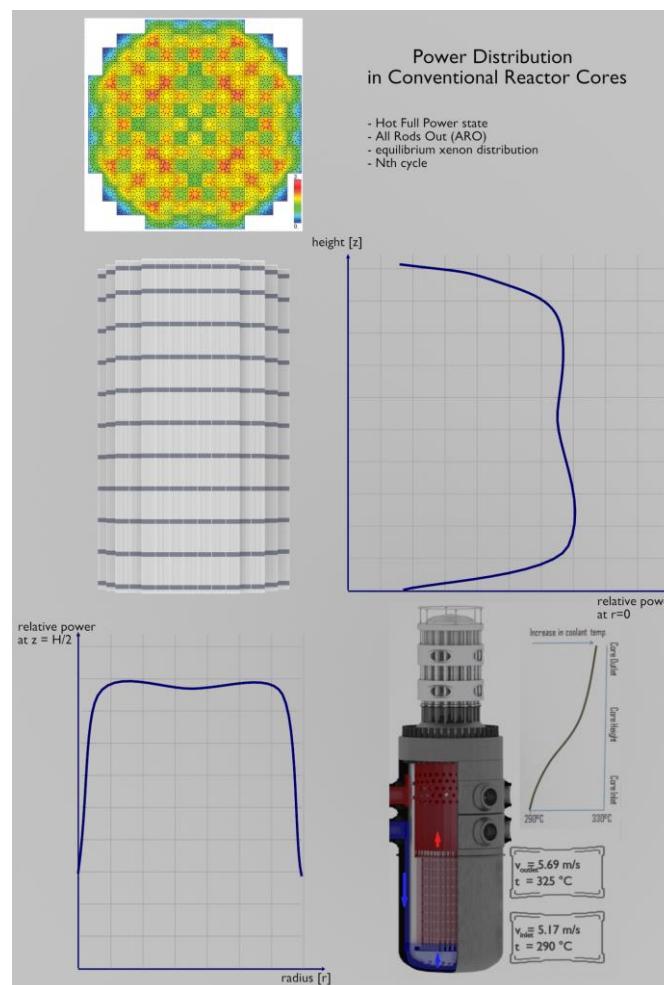
Durante o processo de fissão dos núcleos do material físsil ( $\text{UO}_2$ ), os fragmentos de fissão têm uma energia cinética de cerca de 168 MeV por fissão. Essas partículas altamente carregadas têm um alcance extremamente curto (ver Seção 3.9, Lamarsh) e, portanto, sua energia é depositada perto do local da fissão dentro do combustível. Da mesma forma, a maior parte dos 8 MeV dos raios- $\gamma$  do produto de fissão também são depositados no combustível. No entanto, muitos dos raios- $\gamma$  dos produtos de fissão em decomposição e aqueles emitidos diretamente na fissão passam para fora do combustível, uma vez que são menos fortemente atenuados do que as partículas carregadas. Alguns desses raios- $\gamma$  são absorvidos no refrigerante e/ou moderador circundante, na blindagem térmica ou na blindagem de radiação que circunda o reator. No entanto, devido à proximidade das barras de combustível na maioria dos reatores, muitos dos raios- $\gamma$  são interceptados e absorvidos nas varetas vizinhas.

Os nêutrons (*prompt*) são emitidos com uma energia cinética total de cerca de 5 MeV por fissão. Em um reator térmico, a maior parte dessa energia é depositada no moderador ( $\text{H}_2\text{O}$  no caso dos LWR e HWR) à medida que os nêutrons diminuem. Os raios- $\gamma$  de captura emitidos após a absorção desses nêutrons em reações de não fissão são, portanto, produzidos e absorvidos por todo o reator. Em um reator rápido, os nêutrons de fissão diminuem muito pouco sua energia

antes de serem absorvidos, e sua energia cinética aparece como um acréscimo à energia dos raios- $\gamma$  capturados. Os nêutrons atrasados contribuem pouco para a energia de um reator. Como já observado, nenhuma energia dos neutrinos é retida dentro de um reator.

Deve ficar claro pelas observações anteriores que a deposição espacial da energia de fissão depende dos detalhes da estrutura do reator. No entanto, para cálculos preliminares, pode-se supor que aproximadamente um terço da energia total dos raios- $\gamma$  (cerca de 5 MeV) é absorvida no combustível. Isto, junto com os 168 MeV dos fragmentos de fissão e 8 MeV dos raios- $\gamma$ , soma 181 MeV por fissão (cerca de 90% da energia de fissão recuperável), que é depositada no combustível, a maioria nas imediações do local da fissão. O restante (cerca de 20 MeV) da energia recuperável é depositado no refrigerante e/ou moderador, em diversos materiais estruturais e na manta, refletor e blindagem. Ver Fig.1.

**Figura 1.** Distribuição de potência em um reator tipo LWR convencional.



Fonte: [2].

A taxa na qual a fissão ocorre no combustível e, portanto, a taxa de produção de calor, varia de acordo com o tipo de barra de controle, e também com a sua posição dentro do núcleo. A distribuição de potência no núcleo do reator pode ser representada por uma matriz de distribuição radial de potência no núcleo [3].

Figura 2. Distribuição radial da potência típica no núcleo de um reator tipo LWR.

1.191	1.198	1.303	1.267	1.132	0.998	0.999	0.845
1.198	1.205	1.212	1.273	1.121	1.040	0.988	0.822
1.303	1.212	1.196	1.174	1.171	0.962	0.900	0.735
1.267	1.273	1.174	1.215	1.089	0.978	0.773	0.518
1.132	1.121	1.171	1.089	1.132	0.982	0.828	
1.002	1.040	0.962	0.978	0.982	1.101	0.617	
0.999	0.957	0.900	0.773	0.828	0.617		
0.845	0.840	0.743	0.518				

Fonte: [3].

Cerca de 10% da energia recuperável da fissão é absorvida fora do combustível. Em reatores térmicos, a energia cinética dos nêutrons de fissão é depositada no moderador e refrigerante circundante mais ou menos na mesma distribuição espacial das fissões das quais esses nêutrons se originam. No entanto, apenas 2% a 3% da energia de fissão aparecem nesta forma, e muitas vezes assumem-se que esta a energia cinética é depositada uniformemente em todo o núcleo.

Nos reatores nucleares há uma proporcionalidade direta entre o fluxo de nêutrons e a potência térmica do reator. Esta proporcionalidade é determinada pela taxa de reação de fissão por unidade de volume ( $RR = \Phi \cdot \Sigma_f$ ). A taxa de reação de fissão dentro de um reator nuclear é controlada por vários fatores.

Para simplificar, vamos supor que o material fissionável ( $UO_2$ ) esteja distribuído uniformemente no reator. Neste caso, as seções transversais macroscópicas são independentes da posição (o que não é verdade para os sistemas reais). Multiplicando a taxa de reação de fissão por unidade

de volume ( $RR = \Phi \cdot \Sigma_f$ ) pelo volume total do núcleo ( $V$ ) nos dá o número total de reações que ocorrem no núcleo do reator por unidade de tempo. Mas também sabemos que a quantidade de energia liberada por uma reação de fissão é de cerca de  $E_r = 200 \text{ MeV/fissão}$ .

Agora, é possível determinar a taxa de liberação de energia (potência) devido à reação de fissão, que é dada pela seguinte equação:

$$P = RRE_rV = \Phi \sum_f E_r V = \Phi N_{U_{235}} \sigma_f^{235} E_r V P$$

Onde:

$P$  – potência do reator ( $\text{MeV} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\Phi$  – fluxo de nêutrons ( $\text{nêutrons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\sigma$  - seção transversal microscópica ( $\text{cm}^2$ )

$N$  - densidade de átomos ( $\text{átomos} \cdot \text{cm}^{-3}$ )

$E_r$  – a energia média recuperável por fissão ( $\text{MeV} / \text{fissão}$ )

$V$  – volume total do núcleo ( $\text{m}^3$ )

O fator de conversão é:  $1 \text{ MeV} = 1,60218 \times 10^{-13} \text{ Joule}$ .

## Referências

[1] John LaMarsh and Anthony Baratta, Introduction to Nuclear Engineering, Pearson; 4th ed. Edição, 2017.

[2] Nuclear-power.net, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/heat-transfer/heat-generation/>, visto em 2021.

[3] Patrícia A. L. Reis, Antonella L. Costa, Claúbia Pereira, Maria Auxiliadora F. Veloso, Adolfo R. Hamers, Javier G. Mantecón, “Thermal and neutronic simulations of the Angra 2 nuclear power plant”, 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, November 07-10th, 2016, Vitória, ES, Brazil.