

Análise termofluida temporal - Uma abordagem analítica

W E Sousa^{*a}, S O Vellozo^{*b}, R G Cabral^{*c},

^{*}Seção de Engenharia Nuclear, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil,

^awalinton.evangelista@ime.eb.br, ^bvellozo@cbpf.br, ^crgcabral@ime.eb.br

RESUMO: Esse trabalho analisa dois transientes postulados do European Sodium Fast Reactor (ESFR). Tanto as equações de condução de calor da pastilha de combustível até o refrigerante, no caso, o sódio, assim como as equações da Cinética Pontual, são utilizadas para estimar a potência ou a distribuição de temperatura no canal do combustível. Dois acidentes postulados do ESFR foram utilizados como benchmark. Os maiores desvios percentuais verificados ficaram abaixo de 13%.

PALAVRAS-CHAVE: Reator Regenerador, Análise Termofluida Temporal, Cinética de reatores.

ABSTRACT: Two postulated transients of the European Sodium Fast Reactor (ESFR) are analyzed. Both the heat conduction equations from the fuel pellet to the coolant, in this case, sodium, as well as the Point Kinetics equations are used to estimate the power or temperature distribution in the fuel channel. Two postulated ESFR transients were used as a benchmark. The highest percentage deviations found were below 13%.

KEYWORDS: Regenerating Reactor, Temporal Thermo-fluid Analysis, Reactor Kinetics

1. Introdução

Para o bom funcionamento de um reator nuclear, é necessário que todo o calor gerado no núcleo seja removido na mesma taxa em que é gerado. Isso caracteriza o estado “estacionário”. O agente responsável por essa remoção de calor é o refrigerante, que pode ser líquido ou gasoso. Entretanto, durante a operação, para atender a demanda de energia diária, o nível de potência do reator pode aumentar ou diminuir, caracterizando os “transientes operacionais”. Esses transientes acontecem de forma intencional e programada, momentaneamente, quando se varia o nível de potência do reator, gerando, assim, um desequilíbrio entre as taxas de produção e remoção de calor no núcleo.

Em outras situações, esse desequilíbrio ocorre de forma não intencional ou programada e o reator deve responder, prontamente, para que o equilíbrio se restabeleça sem danificar nenhum componente. A isso chamamos de “incidente”.

Em uma situação mais extrema, esse desequilíbrio entre produção e remoção de calor pode ocasionar danos irreversíveis ao núcleo, como, por exemplo,

a ruptura do revestimento da vareta de combustível, fusão e etc. A isso denomina-se “acidente”. O Sistema de Remoção de Calor do reator tem que assegurar a proteção do reator em qualquer evento severo.

1.1 Trabalhos Relacionados

Seguindo a linha inovadora, o IME, nos últimos anos, vem desenvolvendo um projeto conceitual de um reator regenerador de espectro rápido, sem urânio enriquecido, com o intuito de viabilizar a implementação desse reator no parque nuclear brasileiro, o que tem demandado a realização de cálculos precisos para a determinação do coeficiente de reatividade de vazios para o reator de espectro rápido FBR-IME e a análise termo hidráulica do Sódio.

Num primeiro estudo, foi elaborado o projeto conceitual de um Reator Rápido Regenerador Refrigerado a Sódio Líquido, independente da tecnologia de enriquecimento. Utiliza como combustível a mistura de óxidos (MOX), sendo a parcela referente ao plutônio e proveniente dos rejeitos de Reatores Térmicos. Todo urânio utilizado, tanto no combustível quanto no envoltório fértil, possui U-235 em seu teor natural. Foi utilizado para o desenvolvimento do projeto o sistema computacional

SCALE 6, do *Oak Ridge National Laboratory*. O reator projetado possui um pequeno núcleo heterogêneo, comum sistema de remanejamento de combustível ao final de seus ciclos de 360 dias [1].

Em um segundo trabalho, realizou-se a análise global do coeficiente de reatividade de vazios para o reator de espectro rápido FBR-IME. Para isso, modelou-se o reator FBR no sistema SCALE 6.1. Com base nas pesquisas e trabalhos anteriores, determinou-se a metodologia de inserção de vazio, a reatividade de cada configuração, os coeficientes de reatividade de vazios em diferentes configurações e o patamar de segurança do projeto FBR com relação ao coeficiente de reatividade de vazio [2].

Em prosseguimento, num terceiro trabalho, realizou-se a análise preliminar termofluida do sódio do reator de espectro rápido FBR-IME [3].

2. Transferência de calor

Foram calculados os perfis de temperatura, tendo como ponto de partida o eixo central da pastilha de combustível, no qual ocorre a máxima temperatura até a superfície do revestimento. Do revestimento em diante, o calor é removido pelo processo de convecção e um conjunto de propriedades físicas, geométricas e o escoamento do fluido garantirão este processo.

A realização da análise do canal quente do núcleo do reator rápido, resfriado a sódio, não difere de um reator comum. O calor gerado pelas pastilhas de combustível chega à superfície do revestimento (*Clad*).

Nem todo calor gerado nas pastilhas de combustível consegue ser retirado totalmente pelo refrigerante. Pode haver pontos específicos onde a taxa de calor gerado seja maior que a taxa de calor retirado pelo refrigerante. As análises destes casos serão realizadas nas próximas seções.

2.1 O Balanço de energia no combustível

Nesta seção, será apresentado, de forma breve, o desenvolvimento da distribuição de temperatura no estado estacionário e transiente.

2.1.1 O estacionário

A equação de balanço estabelece que o calor que foge de um elemento de volume tem que ser igual ao que é produzido. Conforme a expressão da Equação 1:

$$FO = \sum_{i=1}^{NSites} PSI(Xd(i)=1,i), \quad (1)$$

A solução da Equação 1 é a distribuição de temperatura dentro do combustível (Equação 2):

$$\sum_{i=1}^{NSites} Xd(i) = NAAA, \quad (2)$$

Onde T_{CL} é definido como a temperatura da linha central do combustível; Q_0 é a densidade de potência naquela região; K_f é o coeficiente de condução de calor do combustível; e r é a distância da linha central.

Portanto, a distribuição de temperatura no equilíbrio é uma parábola perfeita.

2.1.2 O transiente

O desequilíbrio entre a produção de calor e a sua remoção leva à variação da temperatura nas diversas regiões do canal da célula de combustível. A equação da condução de calor no combustível se escreve como (Equação 3):

$$\rho_f c_p \left(\frac{\partial T_f(r,t)}{\partial t} \right) = K_f \nabla^2 T_f(r,t) + Q(t) \quad (3)$$

Onde ρ_f é a densidade média; c_p é o calor específico; K_f é o coeficiente de condução de calor médio no combustível; $Q(t)$ é a densidade de potência; e $T_f(r, t) = f(r) T_f(t)$ é a distribuição de temperatura no combustível.

Usando separação de variáveis para resolvermos a equação diferencial parcial (Equação 3), chegamos à solução geral final temporal, que fica da seguinte forma (Equação 4):

$$T_f(t) = e^{at} \left\{ T(0) + b \int_0^t e^{-at} Q(t') dt' \right\} \quad (4)$$

onde $T(0)=1, a = \frac{Q_0}{\rho_f c_p \langle f \rangle}; b = \frac{1}{\rho_f c_p \langle f \rangle};$

$f = T_{ci} - \frac{Q_0}{8K_f} R_f^2$; e R_f é o raio da pastilha de combustível.

A forma da taxa de geração de calor vai definir o perfil da evolução temporal da temperatura, e a Equação 4 é o cerne dessa evolução.

2.2 O Revestimento

2.2.1 O estacionário

Na ausência de fonte, a equação da condução de calor toma a seguinte forma (Equação 5):

$$K_{rv} \nabla^2 T_{rv}(r) = 0 \quad (5)$$

Resolvendo a Equação 5, e realizando algumas manipulações algébricas, chega-se à seguinte expressão para a distribuição de temperatura no revestimento, em que $T_{rv}(r)$, pode ser escrita como mostra a Equação 6:

$$T_{rv}(r) = T_0 - \frac{Q_0 R_{rv}^2}{2} \left\{ \frac{r - R_f}{R_f} \frac{1}{K_{rv}} + \frac{1}{2K_f} \right\} \quad (6)$$

Onde T_0 é a temperatura inicial, Q_0 é a densidade de potência naquela região; R_{rv} é o raio do revestimento; R_f é o raio da pastilha de combustível; K_{rv} é o coeficiente de condução de calor médio no revestimento; K_f é o coeficiente de condução de calor médio no combustível; e r é o raio.

2.2.2 O transiente

Trata-se aqui da evolução temporal da distribuição de temperatura no revestimento. A Equação 7 mostra o modelo:

$$\rho_{rv} c_{rv} \left(\frac{\partial T_{rv}(r,t)}{\partial t} \right) = K_{rv} \nabla^2 T_{rv}(r,t) \quad (7)$$

Considerando a continuidade da temperatura e do fluxo de calor em R_f , a solução da Equação 7, após simplificação, toma a seguinte forma (Equação 8):

$$T_c(r,t) = T_f(t) \left\{ f_f(R_f) + m(r - R_f) \right\} \quad (8)$$

Observando a Equação 8, vê-se que a $T_f(t)$ do combustível é que determina a evolução temporal da distribuição de temperatura no revestimento. Além disso, o coeficiente angular dessa distribuição, $m = \frac{K_f}{K_c} \frac{df_f(R_f)}{dr}$; depende da razão entre os coeficientes de condução de calor do combustível e do revestimento.

2.3 Equações de Calor para o Refrigerante

Essa seção trata da distribuição de temperatura no refrigerante e do processo de convecção e condução do calor do revestimento para o refrigerante.

A equação que descreve a distribuição de temperatura no refrigerante adquire a seguinte forma (Equação 9):

$$(\rho c_p)_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T_f \right) = K_f \nabla^2 T_f \quad (9)$$

Nessa equação, ρ representa a densidade média do fluido refrigerante, c_p é o calor específico a pressão constante; \vec{v} é a velocidade média de escoamento desse fluido; K_f é o coeficiente de condução de calor; e T_f é a distribuição de temperatura dentro do refrigerante. T_f depende das variáveis r, z e t , ou seja, $T_f = T_f(r, z, t)$.

2.3.1 O regime estacionário

Para o regime estacionário, a equação de balanço de energia é suficiente para a determinação da distribuição axial da temperatura do refrigerante. A integração no elemento de volume do refrigerante $dV = 2\pi r dr dz$ deixará a temperatura com dependência somente em z . Desse modo, escreve-se a Equação 10:

$$dz \frac{dQ}{dt} = \dot{m} c_p \frac{dT_f}{dz} = q(z) dz \quad (10)$$

onde $q(z) = q_0 \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right)$; $q_0 = Q_0 \pi (R_f)^2$; $\dot{m} = v_c A \rho_{fl}$ é a vazão mássica; ρ_{fl} é a densidade do sódio líquido refrigerante; e A é a área transversal do canal.

A integração na parte ativa do canal leva à seguinte solução (Equação 11):

$$T_{fl} = T_m - \frac{Q_0 \tilde{H}}{m c_{fl} \pi} \left\{ \text{sen} \left(\frac{\pi}{\tilde{H}} z \right) + \text{sen} \left(\frac{\pi H}{2 \tilde{H}} \right) \right\} \quad (11)$$

Onde \tilde{H} é o comprimento extrapolado da vareta H e é o comprimento real. Lembrando que, no regime estacionário, todo o calor gerado no combustível deve chegar ao refrigerante, sendo que esse calor pode ser contabilizado pela densidade linear de potência $q(z) = q_0$, onde $q_0 = Q_0 \pi (R_r)^2$.

2.3.2 O Regime transiente do Refrigerante

O estudo da evolução temporal do refrigerante é bastante simplificado devido ao fato do metal líquido possuir um coeficiente de condução de calor muito alto quando comparado com os outros materiais, como o sódio, por exemplo, cuja condutividade térmica é cerca de $76,6 \frac{W}{Km^2}$ a $400^\circ C$. Em contraste, a condutividade da água varia entre $0,6 \frac{W}{Km^2}$ a $20^\circ C$ e $0,465 \frac{W}{Km^2}$ a $350^\circ C$ (sob uma pressão de 150 bar). Já a condutividade do sódio é 100 a 150 vezes mais alta do que a pressão atmosférica [4]. Portanto, rapidamente a temperatura se equaliza no elemento de volume transversal ao eixo axial. Em consequência, considerar uma temperatura média em cada volume elementar axial é perfeitamente válido [6][7].

A transferência de calor do revestimento para o refrigerante será representada por um coeficiente de convecção $h_s \left[\frac{W}{Km^2} \right]$. O fluxo de calor por unidade de área é então determinado pelo produto entre o coeficiente de transferência de calor e a diferença entre a temperatura da parede do revestimento e a temperatura média do refrigerante (lei de resfriamento de Newton). Conforme mostra a Eq.12.

$$q'' = h_s (T_{rv} (R_{rv}) - T_{fl}) \quad (12)$$

O coeficiente de convecção é calculado por $h_s = k_s \frac{Nu}{D_h}$, onde k_s é o coeficiente de condução de calor do sódio; D_h é o diâmetro hidráulico; e Nu é o número de Nusselt para cada arranjo de montagem de combustível, cuja correlação é dada por Todreas e Kazimi, $Nu = 7 + (0,025)(Pr)(Re)$, onde Pr e Re são os números de Prandtl e Reynolds, respectivamente.

3. O reator ESFR

O ESFR [8] é um reator regenerador de espectro rápido em desenvolvimento na Europa. Ele utiliza combustível à base de óxidos de urânio e plutônio. A potência do reator é de 3600 MWth e o comprimento ativo do núcleo é de apenas 1m. As principais características deste projeto, para fins de modelagem neutrônica, podem ser encontradas na referência [9]. Os dados utilizados nas simulações encontram-se nas tabelas 01 e 02. Nela, dois acidentes importantes são analisados utilizando o código AZTH- LIM. Ele modela os processos de transferência de calor no refrigerante (metal líquido) do reator rápido ESFR, considerando os fenômenos de transferência de calor na barra de combustível e os processos de neutrônicos. O primeiro acidente trata-se da ejeção de uma barra absorvedora com a introdução de 175 pcm de reatividade. Ele é designado como *Unprotected Transiente-Over-Power* (UTOP). O segundo acidente trata-se da perda de 50% da potência de bombeamento da bomba e é designado como *Unprotected Loss-Of-Flow Termostfluid* (ULOF). Os resultados, *benchmark*, desses acidentes postulados e calculados [8] serão usados como base de comparação nas simulações analíticas do presente trabalho.

A **Tabela 1** mostra os principais parâmetros do reator Europeu adotados nas simulações.

Tab. 1 – Principais parâmetros do ESFR

Potência	3600 MWth	Raio do furo central	0,1257 cm
Altura ativa	1,00566 m	Raio do combustível	0,4742 cm
Temp. de entrada	668,15 K	Raio do revestimento	0,5419 cm
Temp. de saída	818,15 K	Passo	1,1897 cm
Temp. média do comb.	818,15 K	Células por EC	271un
Vazão mássica	19000 kg/s	Número de EC	453un

A **Tabela 2** resume as propriedades do combustível.

Tab. 2 – Propriedades do combustível do EFSR

Propriedades	Correlação
Densidade (kg/m ³)	$\rho_f = \frac{11043,5}{(0,99672 + 1,179 \times 10^{-3}T - 2,428 \times 10^{-9}T^2 - 1,219 \times 10^{-9}T^3)^3}$
Calor específico (J/kg K)	$C_f = 0,85 \times \left(\frac{0,998 \times 10^6 A}{(A-1)T^2} + 1,6926 \times 10^{-2}T + \frac{1,620 \times 10^{12}}{T^2} \right) + 0,15 \times \left(\frac{111,275 \times 10^{12} B}{(B-1)T^2} + 2,9358 \times 10^{-2}T \right)$
Coef. Transf. de calor (W/m K)	$K_f = 1,158 \times \left(\frac{1}{0,1205 + 2,6455 \times 10^{-2}T} + \frac{6400e^{-\frac{16,35}{T}}}{\tau^{\frac{5}{2}}} \right)$ $A = e^{\frac{548,68}{T}} ; B = e^{\frac{-18541,7}{T}} ; \tau = \frac{T}{1000}$

4. Simulações analíticas

Nas simulações analíticas, a Equação 4 desempenha um papel fundamental na descrição da evolução temporal. Os dois transientes serão investigados e comparados com os resultados do EFSR tomados como referência, *benchmark*.

4.1 Inserção de 175 pcm devido à ejeção de barra

A função T (t), Equação 4, que descreve a evolução temporal, deve ser calculada com base na forma de Q(t). Essa última é obtida pelo ajuste à curva de potência do EFSR. Seguindo essa direção, a função ajustada tem o seguinte aspecto:

$$\frac{Q(t)}{Q_0} = 1,26 + 0,49e^{-0,3t^2} \quad (13)$$

A comparação entre o ajuste e o *benchmark* pode ser apreciada na **Figura 1**, a seguir:

A temperatura média do combustível, calculada no EFSR, pode ser vista na **Figura 2**, (curva em vermelho). Note que o transiente inicia-se em aproximadamente 5s e a temperatura atinge um máximo de aproximadamente 1700 K, estabilizando pouco abaixo desse valor.

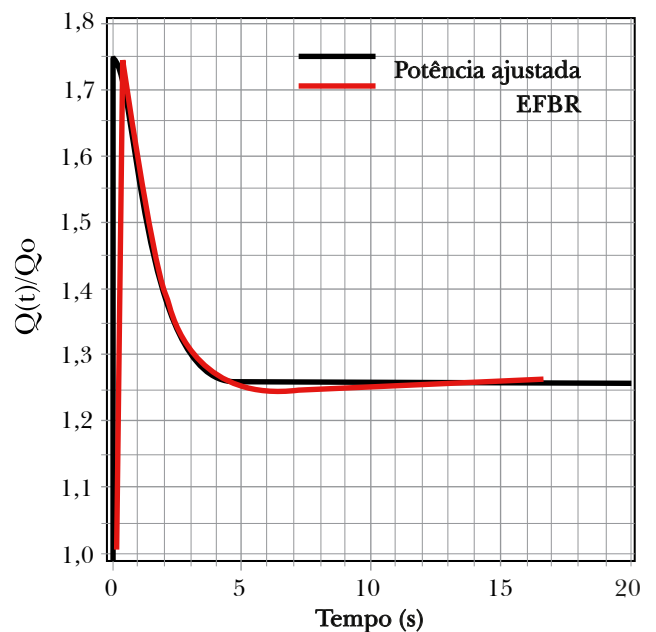


Fig. 1 – Perfil da potência normalizada ajustada para uma inserção de reatividade de 175 pcm.

Na **Figura 2**, pode-se observar que o modelo analítico se mostra conservador, excedendo em pouco mais de 100 K o valor máximo da temperatura média do combustível, e estabilizando pouco acima de 1800 K, (curva em preto). Isso representa uma

diferença aproximada de 6% em relação ao resultado do ESFR com *benchmark*, se toda a amplitude de temperatura for considerada.

É interessante ressaltar que o modelo analítico representou, qualitativamente, com razoável fidelidade, a inércia da temperatura média caracterizada pelo pico inicial da curva.

A **Figura 2** mostra as temperaturas médias do combustível, simuladas com o modelo analítico proposto e com os dados do ESFR.

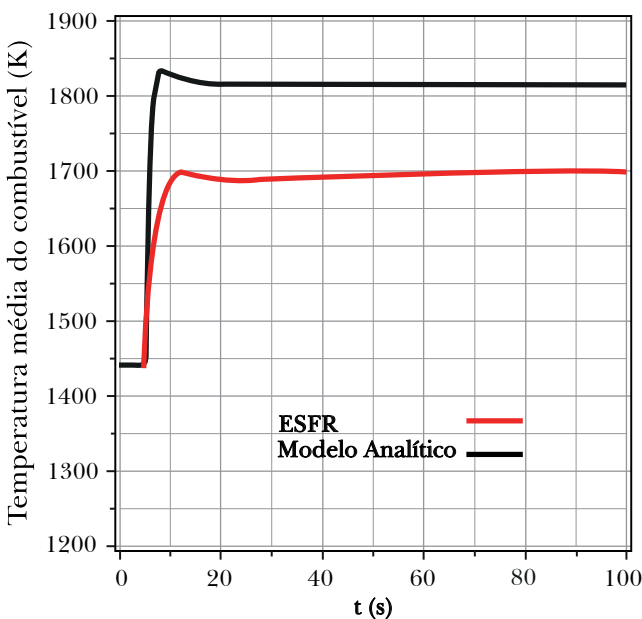


Fig. 2 – Temperatura média do combustível.

4.2 Perda de 50% da vazão

O segundo transiente estudado refere-se à perda de vazão no canal de combustível. A **Figura 3** exibe as curvas da distribuição axial de temperatura no sódio na situação de vazão normal e com uma perda de

50% para o ESFR, calculada pelo código AZTHLIM. A temperatura na ponta do canal chega a 881,35 K.

O modelo analítico mantém a tendência conservadora. A **Figura 3** mostra, também, o comportamento da distribuição de temperatura nos casos de vazão normal e com uma perda de 50% de vazão. A temperatura na ponta do canal chegou a pouco mais de 950 K. Isso representa uma diferença de aproximadamente 13% em relação ao ESFR.

A **Figura 3** mostra a temperatura axial do sódio para uma perda de 50% de vazão.

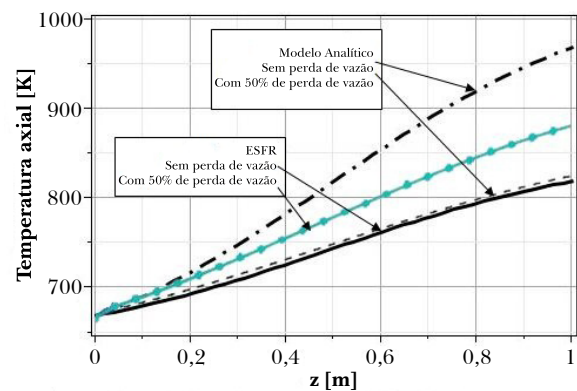


Fig. 3 - Temperatura axial do sódio para uma perda de 50% de vazão estimada pelo modelo analítico e pelo código AZTHLIM.

5 Conclusão

Embora os resultados analisados apresentem desvios menores do que 13% em relação ao reator europeu ESFR, usado como benchmark, o modelo analítico é limitado. Sabendo disso, é possível fazer análises rápidas quando o objetivo maior é conhecer os limitantes superiores para um transiente. Posteriormente, uma análise conduzida por um modelo detalhado e resolvido numericamente vai estabelecer os valores confiáveis, trazendo economia ao projeto.

Referências

- [1] OLIVEIRA, Aline Alves. **Reator rápido regenerador independente de urânio enriquecido**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- [2] LIMA, Fabiano Petruceli Coelho. **Análise global do coeficiente de reatividade de vazios para o reator de espectro rápido FBR-IME**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.
- [3] VELOSO, Marta Jan. **Análise termofluida preliminar do reator de espectro rápido FBR-IME**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018

- [4] BALDEV Raj, et al. **Sodium Fast Reactors with Closed Fuel Cycles**, CRC Press. Florida: Taylor and Francis-Group, 2015.
- [5] BERTHOUD, et al., **Sodium-cooled nuclear reactors**. France: Editions Le Moniteur, 2014.
- [6] WALTAR, A.E. et al. **Fast Spectrum Reactors**. 1ªEd. Richland: Springer, 2012.
- [7] TODREAS, N., Kazimi, M. **Nuclear Systems: Thermal Hydraulic Fundamentals**. Nuclear Systems. Hemisphere Pub. Corp. 1990.
- [8] FACCHINI, A., GIUSTI, V., CIOLINI R., TUCEK, K., THOMAS, D., D'AGATA, E. Detailed neutronic study of the power evolution for the European Sodium Fast Reactor during a positive insertion of reactivity. **Nuclear Engineering and Design**, 313, 2017, pp.1-9.
- [9] VALSECA, A. D. P., PAREDES, G. E., RODRÍGUEZ, A. V. Analysis of a Sodium Cooled Fast Reactor during ULOP and UTOP Transients Using AZTHLIM Code. **XXIX Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana**, 2018.