

CÁLCULOS TERMO-HIDRAÚLICOS DO NÚCLEO DO REATOR DO TIPO LEITO DE BOLAS HTR-10 USANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Leorlen Y. R. Mazaira¹, Yaisel C. Chávez¹, Carlos R. G. Hernandez¹, Abel. G. Rodriguez¹, Dany S. Dominguez² e Carlos B. O. Lira³

¹*Instituto de Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Av. Salvador Allende esq. Luaces, CP 10600, La Habana, Cuba*

²*Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Ilhéus-Itabuna, Km 16, Bairro Salobrinho, CEP 45662-900 – Ilhéus, BA, Brasil*

³*Universidade Federal de Pernambuco, Av. Luiz Freire 1000, Cid. Universitária, CEP 50740-540, Recife, PE, Brasil*

Palavras-chave: Reator de Leito de Bolas, Fluidodinâmica computacional, HTR-10, Gás compressível.

Resumo. Neste trabalho, é apresentada a simulação termo-hidráulica do fluxo compressível no interior do núcleo do reator de tipo leito de bolas HTR-10. Existem duas abordagens principais para simulação usando fluidodinâmica computacional (CFD) da geometria de leitos empacotados: abordagem de meio poroso e abordagem realística. Na abordagem de meio poroso, um conceito de porosidade média é utilizado na modelagem da geometria do leito. Na abordagem realística, cada uma das bolas do leito empacotado é modelada de forma detalhada. Neste trabalho, inicialmente, estudamos o comportamento do fluxo de refrigerante que passa através do núcleo do reator usando uma abordagem de meio poroso. Em seguida, estudamos o fluxo de gás na superfície das bolas considerando uma célula FCC (*Face Centered Cubic*) com três camadas de bolas. Na simulação com abordagem realística analisamos a região crítica, uma seção na saída do núcleo, onde a temperatura do hélio alcança o maior valor. Os resultados apresentados mostram os perfis de velocidade, pressão e temperatura do refrigerante no núcleo, e a distribuição de temperaturas no interior das bolas na região crítica. A queda de pressão mostra boa correspondência com a calculada pelas correlações da KTA, e as temperaturas máximas nas bolas não ultrapassam o limite permitido para este tipo de combustível.

Endereços eletrônicos: leored1984@gmail.com, ycordova@instec.cu, cgh@instec.cu, agamez@instec.cu, dsdominguez@gmail.com, cabol@ufpe.br

1 INTRODUÇÃO

Os reatores nucleares têm sido desenvolvidos e operados desde o início da década de 50, atualmente está sendo desenvolvida a próxima geração de reatores, ambos fatos, comprovam a vitalidade técnica e industrial da energia nuclear. Entre os reatores de nova geração destacam-se os reatores de alta temperatura refrigerados a gás (VHTR, *Very High Temperature Reactors*). Estes reatores terão uma temperatura na saída de aproximadamente 700–8500 C, atingindo de 900–10000 C para os reatores comerciais. A finalidade destes reatores envolve a produção de energia elétrica, e processos de geração de calor, com aplicações tais como a produção de hidrogênio, contribuindo assim para ampliar a gama de aplicações da energia nuclear [12].

O reator de temperatura muito alta refrigerado a gás é um reator de espectro de nêutrons térmicos, refrigerado a hélio e moderado a grafite, que pode operar a uma pressão que varia entre 4,5 e 7 MPa, de acordo com o projeto. Este conceito foi estabelecido para sete reatores construídos que variam em tamanho, temperatura na saída e fluido primário, de acordo com o propósito.

Dois conceitos de projeto do reator VHTR estão sendo estudados: o reator prismático e o reator de leito de bolas (PBR, *Pebble Bed Reactor*). O projeto do reator de leito de bolas consiste de uma coluna anular cheia com esferas de combustível, estas esferas são inseridas no topo do reator e removidas pelo fundo. A operação com recarga contínua do combustível reduz a frequência de paradas e permite a operação com pequeno excesso de reatividade. As partículas de combustível TRISO são inseridas nas bolas para formar os elementos combustíveis que preenchem o núcleo. A coluna anular ou cilíndrica é rodeada por blocos de grafite que atuam como refletor. O hélio, utilizado como fluido refrigerante, circula através do vazio intersticial no núcleo para extrair o calor gerado nos elementos combustíveis pelas reações de fissão [3].

Os cálculos ou análises termo-hidráulicas tem desempenhado um papel essencial no projeto, a operação, o desempenho e a segurança de usinas nucleares. Atualmente os projetistas enfrentam desafios significativos em relação à modelagem termo-hidráulica associada aos conceitos de reatores avançados. Os efeitos tridimensionais locais não são reproduzidos pelos códigos de sistemas nucleares, usados atualmente no projeto e licenciamento de reatores nucleares [13]. Devido aos complexos padrões de fluxo que aparecem no interior do núcleo dos VHTR, e aos grandes progressos na capacidade computacional, intensificou-se o uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) na simulação termo-hidráulica para este e outros novos conceitos de reatores.

Existem duas abordagens principais para simulação com CFD da geometria de leitos de bolas ou leitos empacotados: abordagem de meio poroso e abordagem realística. Na abordagem de meio poroso, um conceito de porosidade média é utilizado na modelagem da geometria do leito. Na abordagem realística, cada bola do leito empacotado é modelada de forma realista. Em [19] foram feitas comparações entre as duas abordagens, e os resultados revelaram que a abordagem porosa para o leito empacotado reproduz razoavelmente as características termo-hidráulicas globais, como o aumento do gradiente de pressão e da temperatura do fluxo de gás, através das bolas. No entanto, utilizando a abordagem realística podem-se simular as características anisotrópicas do fluxo no interior dos poros, incluindo a separação do fluxo e a formação de vórtices, elementos necessários para compreender a física dos fenômenos envolvidos, e aumentar a precisão na previsão dos pontos quentes no núcleo, elemento essencial para garantir integridade do combustível. Entretanto, a grande desvantagem é que o tempo de cálculo necessário para a simulação com a abordagem realística é aproximadamente 3000 vezes maior que o tempo necessário na abordagem do meio poroso.

Neste trabalho mostramos uma análise termo-hidráulica para o reator HTR-10 utilizando técnicas de CFD. As características termo-hidráulicas globais são calculadas usando a

abordagem de meio poroso, e em seguida, usamos abordagem realística para obter parâmetros locais na região crítica (seção de maiores temperaturas) do núcleo. Na próxima seção comentamos alguns trabalhos sobre modelagem de reatores VHTR usando CFD. Na seção 3, descrevemos brevemente o núcleo do reator HTR-10. Na seção 4, descrevemos os modelos geométricos e as simulações realizadas. Os resultados das simulações são oferecidos na seção 5. Por último na seção 6, oferecemos as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE NA SIMULAÇÃO DE NÚCLEOS DO TIPO PBR

2.1 Modelo de meioroso

Um dos maiores projetos dedicados ao desenvolvimento da tecnologia VHTR, na forma do *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR), foi desenvolvido por mais de 10 anos pelo governo da África do Sul em colaboração com a *Westinghouse*, infelizmente foi interrompido em 2011 pela falta de investidores. Este projeto gerou uma grande quantidade de conhecimento sobre a tecnologia, em [6] são publicados os principais resultados da simulação termo-hidráulica integral com CFD para este projeto de reator. A simulação utilizou o modelo de meio poroso num núcleo de mais de 450000 bolas. A utilização desta abordagem permitiu simular o núcleo completo, e foram obtidos os parâmetros necessários para análises de segurança, e os exigidos para o licenciamento do reator. Entre eles, as temperaturas dos componentes do núcleo e dos caminhos do fluxo, os gradientes de temperatura através de componentes, a queda de pressão no núcleo, e outros resultados importantes. Recentemente, [11] apresentou uma avaliação da compressibilidade do gás refrigerante, determinando seu efeito sobre a queda de pressão no leito do PMBR.

Outro trabalho, onde o núcleo de um reator de leito de bolas é simulado com modelo de meio poroso foi apresentado em [4]. No mesmo, foi realizado o redesenho conceitual de um novo dispositivo com 100 MW de potência, chamado Dispositivo Avançado de Transmutação para Aplicações Sustentáveis de Energia (TADSEA). Para a nova configuração proposta foram realizados cálculos termo-hidráulicos para garantir que a temperatura a saída do núcleo seja suficientemente alta para permitir a produção eficiente de hidrogênio por métodos de alta temperatura. A distribuição de temperaturas do refrigerante é obtida a partir das distribuições de densidade de potência calculados nas direções axial e radial.

2.2 Modelo realístico

No núcleo do reator as bolas são dispostas aleatoriamente e a porosidade varia radial e axialmente, principalmente nas regiões próximas da parede do núcleo. Para simplificar a complexidade geométrica presente em estruturas aleatórias são utilizadas frequentemente às estruturas de ordenamentos regulares como: *Simple Cubic* (SC), *Body Centered Cubic* (BCC) e *Face Centered Cubic* (FCC).

O trabalho [2] aborda os efeitos de dois arranjos regulares de empacotamento, BCC e FCC, nas características termo-hidráulicas do núcleo de um PBR, incluindo a aceleração de fluxo, a formação de vórtices, a separação de fluxo nos poros; a variação anisotrópica do número Nu, e a variação de temperatura na superfície das bolas. Os resultados sugerem que, devido à estrutura de rede mais compacta, a aceleração do fluxo sobre as esferas num arranjo FCC é maior que no BCC, resultando em uma maior capacidade de transferência de calor e uma temperatura menor nas bolas. O número de Nu médio se reduz da primeira a sétima camada de bolas, o que implica na possibilidade de se alcançar uma condição térmica de fluxo totalmente desenvolvido. Estes resultados concordam qualitativamente e quantitativamente com os calculados pela correlação KTA (geralmente aceita no projeto de reatores de leito de bolas). Ademais, o modelo é avaliado

utilizando os dados experimentais medidos por [20] para um arranjo BCC, os resultados mostram uma boa concordância com os valores experimentais.

No trabalho, [8], pesquisou-se a distribuição do coeficiente de transferência de calor em múltiplas esferas em uma matriz 3D, usando medidas experimentais e previsões de CFD. Os experimentos foram conduzidos pela passagem de ar quente através de um conjunto de 12 esferas dentro de um canal de fluxo e as simulações de CFD são realizados com cinco modelos de turbulência. As comparações de distribuições medidas e previstas dos coeficientes de transferência de calor na superfície das esferas revelam que o modelo de turbulência que melhor prediz as características de transferência de calor para as esferas em diferentes regiões da matriz é o modelo v2-f. Este modelo reproduz os efeitos de turbulência nas regiões próximas da parede do núcleo, e pode prever fatores locais, como a transferência de calor e separação de fluxo com maior precisão.

Visando à validação de programas de CFD a partir dos resultados de simulações numéricas diretas (DNS), o artigo [14] apresenta uma discussão sobre os trabalhos publicados nesta linha, mostrando que o principal desafio da abordagem é considerar as limitações na modelagem da turbulência, elemento essencial para prever com precisão os detalhes do fluxo. Por isso, propõe-se que uma avaliação detalhada dos processos físicos envolvidos no escoamento de gás em leito de bolas precisa ser feita mediante DNS. A compreensão de um fluxo tão complexo é difícil de alcançar a partir de experimentos. Portanto, DNS, é considerada uma técnica de simulação avançada e precisa, sendo uma alternativa para validar os modelos de turbulência.

Em [14] visando obter um domínio computacional ótimo e bem definido que possa servir como referência nas simulações foi feita a otimização da geometria de uma célula unitária FCC, incluindo as condições de fronteira, e a geração de malhas da geometria do leito. Este trabalho foi suportado por modelagem baseada em RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes Simulation*). Em seguida, em [15] e [16] foi realizada a simulação quase-DNS da célula unitária FCC otimizada a fim de gerar um banco de dados de referência de alta qualidade. O banco de dados inclui duas secções diferentes, através do domínio para visualização qualitativa do campo de fluxo, e 43 perfis (de diferentes propriedades) em diferentes locais do domínio computacional, estes resultados permitiram comparações quantitativas.

Após este trabalho de validação, foram publicados dois estudos com diferentes níveis de modelagem de turbulência [17] e [18]. No primeiro são feitas as simulações numéricas da célula unitária FCC otimizada utilizando o modelo LES (*Large Eddy Simulation*). A partir dos resultados e extensa comparação (qualitativa e quantitativa) com os dados q-DNS disponíveis, uma diferença máxima de 6% foi encontrada, e a simulação teve um custo computacional significativamente inferior (6 vezes mais rápida). No segundo artigo, foram realizadas simulações de três alternativas diferentes de modelos DES, e os resultados também foram comparados com q-DNS. Entre eles, o modelo IDDES-SST mostrou melhor correspondência, e a simulação foi 14 vezes mais rápida do que q-DNS.

Infelizmente, a maioria destes estudos lidam com estruturas de empacotados regulares para simplificação. Em [9] foram apresentados dois modelos para a geração aleatória de leitos empacotados com pequenas quantidades de bolas, consideram menos de 50 bolas. Os modelos são comparados com os dados numéricos de referência de leitos de muitas esferas com boa concordância qualitativa e quantitativa. Por último, em [10] propõe-se um método novo para a modelagem realista, baseado numa malha adaptativa, LES e tratamento implícito das fronteiras sólidas. O modelo resultante é capaz de resolver numericamente leitos empacotados aleatoriamente, começando com malhas grossas arbitrárias.

3 DESCRIÇÃO DO NÚCLEO DO REATOR HTR-10

Atualmente, os principais avanços no desenvolvimento desta tecnologia foram feitos na

China, com um protótipo de 10 MW chamado HTR-10 (*High Temperature Reactor*). O objetivo do projeto é pesquisar a produção de energia com alta eficiência [5]. Na Fig. 1 ilustramos o sistema primário do reator e, na Tabela 1, aparecem os principais parâmetros do projeto do núcleo do HTR-10.

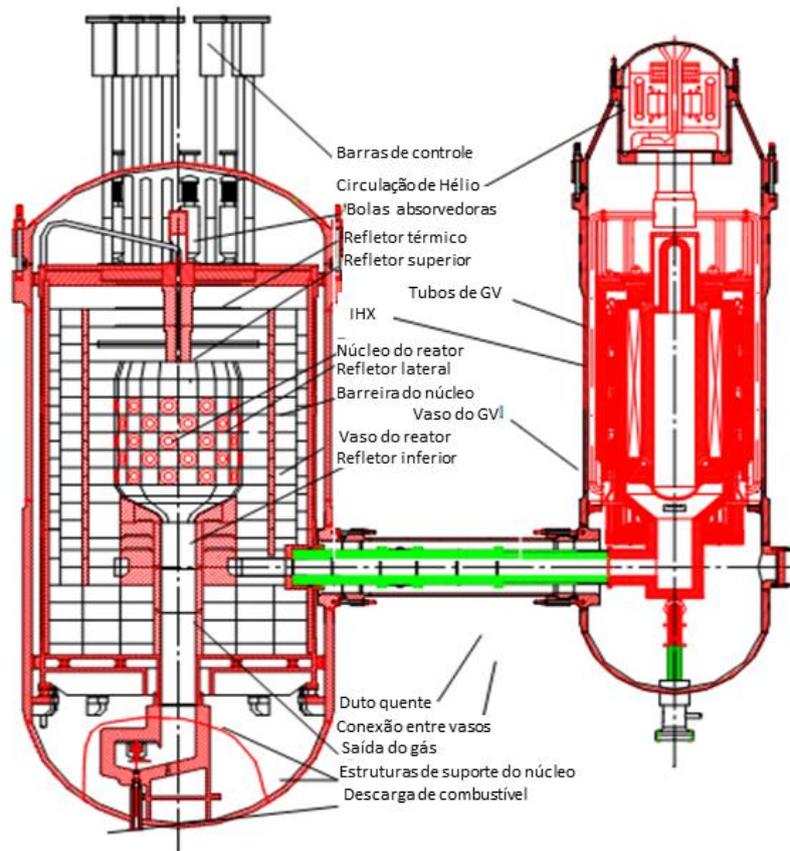


Figura 1: Sistema primário do reator HTR-10

Tabela 1: Principais parâmetros de projeto do núcleo do reator HTR-10

Parâmetro	Valor
Potência térmica do reator, MW	10
Pressão primária do hélio, MPA	3,0
Temperatura média de hélio à saída do reator, K	973
Temperatura média do hélio a entrada do reator, K	523
Fluxo de massa do hélio com potência máxima, kg/s	4,32
Energia elétrica gerada pela turbina a vapor, MW	3,0

4 ANÁLISE DO MODELO DE FLUXO E SIMULAÇÃO DO NÚCLEO

4.1 Meio poroso, porosidade e permeabilidade

Em relação a este tipo de reator, tanto geometrias como o leito de bolas ou tubos paralelos podem ser assumidas como um meio poroso. No reator HTR-10, que tem aproximadamente 16000 elementos combustíveis empacotados em um leito de bolas, sobre os quais o gás refrigerante hélio flui, assume-se o núcleo como um meio poroso. Os principais parâmetros do

meio poroso são a porosidade e a permeabilidade. A seguir mostramos como foram calculados estes parâmetros para a geometria do núcleo.

Chamamos porosidade à fração de volume ocupada pelo vazio no meio poroso. No interior do núcleo podemos considerar quatro distribuições de bolas diferentes, elas são: SC com fração de empacotado máxima de 52%, BCC com fração de empacotado máximo de 68%, FCC com fração de empacotado máxima igual a 74% e *Random Packing* (RP) com fração de empacotado entre 61 e 64%. Se considerarmos uma distribuição das bolas RP com a fração de empacotado máxima de 0,61, teremos uma porosidade do 0,39. Este valor foi determinado no benchmark [5].

A permeabilidade k caracteriza a condutividade do fluxo na matriz porosa. Existem várias teorias sobre como calcular a permeabilidade, a maioria delas utilizam as equações de Navier Stokes e a lei de Darcy. Introduzimos o conceito de diâmetro hidráulico (d_h) definido como

$$d_h = \frac{4 \cdot \varepsilon}{A_0(1-\varepsilon)}, \quad (1)$$

onde ε é a porosidade volumétrica, e A_0 é a área de superfície específica do meio poroso. O modelo proposto utiliza a tortuosidade, parâmetro que pode ser interpretado como uma correção para o gradiente de pressão, a tortuosidade é definida na forma

$$\tau = \frac{L_e}{L}, \quad (2)$$

onde L é o comprimento da linha reta entre as torneiras de pressão, e L_e é o comprimento eficaz. Finalmente, definimos a permeabilidade como

$$k = \frac{\varepsilon \cdot d_h^2}{16 \cdot k_k}, \quad (3)$$

sendo $k_k = k_0 \tau^2$, onde k_0 é o parâmetro de forma igual a 2,5 para o leito empacotado, também no leito a tortuosidade $\tau = \sqrt{2}$ [13]. Por último, obtemos

$$k = \frac{\varepsilon^3 \cdot d_h^2}{36(1-\varepsilon)^2 \cdot k_k}. \quad (4)$$

4.2 Modelo do núcleo do HTR-10

A construção do modelo do núcleo do HTR-10 foi realizada usando ANSYS CFX. Para o fenômeno de transferência de calor foi considerado o modelo de energia total, o mesmo, considera o transporte de entalpia e também os efeitos da energia cinética do fluido. Como modelo de turbulência foi escolhido o modelo *k-epsilon*.

Entre as variáveis de entrada para o ANSYS CFX temos a porosidade, com valor de 0,39, a permeabilidade com valor de 8,18E-06 m², o fluxo de massa 4,32 kg/s, a temperatura e pressão do hélio na entrada do núcleo, com valores de 523 K e 3 Mpa, respectivamente. A fonte de energia é a potência gerada no interior do núcleo, a mesma, foi definida no ANSYS CFX por valores discretos de densidade de potência para cada zona do núcleo. A Tabela 2 mostra os dados relacionados com a distribuição de energia nas diferentes zonas nas quais o núcleo é dividido [5].

Tabela2: Distribuição de energia nas diferentes zonas (axial e radial) do núcleo do reator HTR-10(W/cm³)

Z\R(cm)	6,5	13	19	25	39	50	60	70,5	83,5	90
18	1,79	1,79	1,79	1,78	1,75	1,71	1,68	1,65	1,63	1,65
36	2,12	2,11	2,10	2,08	2,06	2,01	2,46	1,89	1,86	1,89
54	2,46	2,45	2,44	2,41	2,35	2,26	2,18	2,10	2,07	2,09
72	2,61	2,60	2,58	2,56	2,49	2,43	2,33	2,27	2,22	2,22
90	2,78	2,77	2,75	2,72	2,65	2,56	2,46	2,39	2,30	2,30
108	2,84	2,84	2,82	2,79	2,71	2,55	2,45	2,33	2,26	2,26
126	2,66	2,65	2,63	2,60	2,56	2,49	2,38	2,29	2,22	2,21
144	2,49	2,49	2,47	2,44	2,37	2,29	2,19	2,08	2,01	2,00
162	2,36	2,35	2,33	2,30	2,22	2,11	2,02	1,93	1,85	1,82
180	2,33	2,32	2,29	2,25	2,16	2,02	1,93	1,83	1,73	1,66
187	1,53	1,53	1,51	1,48	1,42	1,33	1,27	1,21	1,13	0

5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

5.1 Simulação com abordagem de meio poroso

Neste trabalho estudamos, primeiramente, o comportamento do fluido refrigerante que passa através do núcleo do reator HTR-10. Começamos com a obtenção da distribuição de temperatura do refrigerante a partir dos valores de densidade de potência considerados no CFX (vide Tabela 2). A geometria do núcleo é um cilindro que está dividido em anéis (axiais e radiais) que definem as zonas de potência conforme a Fig. 2.

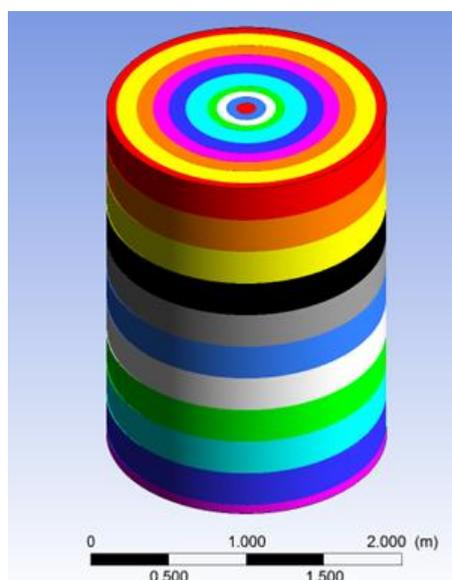


Figura 2: Geometria do núcleo do HTR-10 dividida em anéis utilizada na simulação de meio poroso

Nas Figs. 3a, 3b e 3c, mostramos as distribuições de densidade, viscosidade dinâmica e condutividade térmica do hélio no interior do núcleo. Como pode observado na Fig. 3 a densidade, a viscosidade de hélio e a condutividade térmica, são parâmetros que dependem fortemente da variação de temperatura ao longo da direção axial de todo o núcleo, o que foi implementado a partir das correlações da KTA.

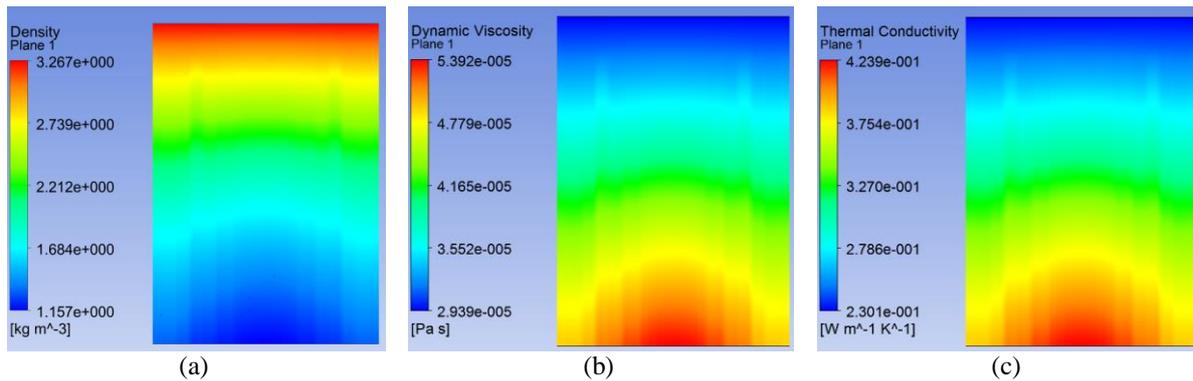


Figura 3: Perfis de (a) densidade, (b) viscosidade dinâmica, e (c) condutividade térmica do hélio no núcleo

Nas Figs. 4a e 4b são mostrados os perfis de velocidades e de pressão do hélio no núcleo do reator, respectivamente. Para o cálculo da queda de pressão do fluido refrigerante que passa através do núcleo foi implementada a correlação presente em [7]. A correlação foi usada como valor de entrada para determinar a queda de pressão no modelo *Directional Loss* para meios porosos presente no CFX. Para comparação, a queda de pressão do refrigerante obtida apenas com a correlação é de 413 kPa e a partir da simulação em CFX foi de 443 kPa. O que corresponde a um desvio relativo de aproximadamente 6,5%.

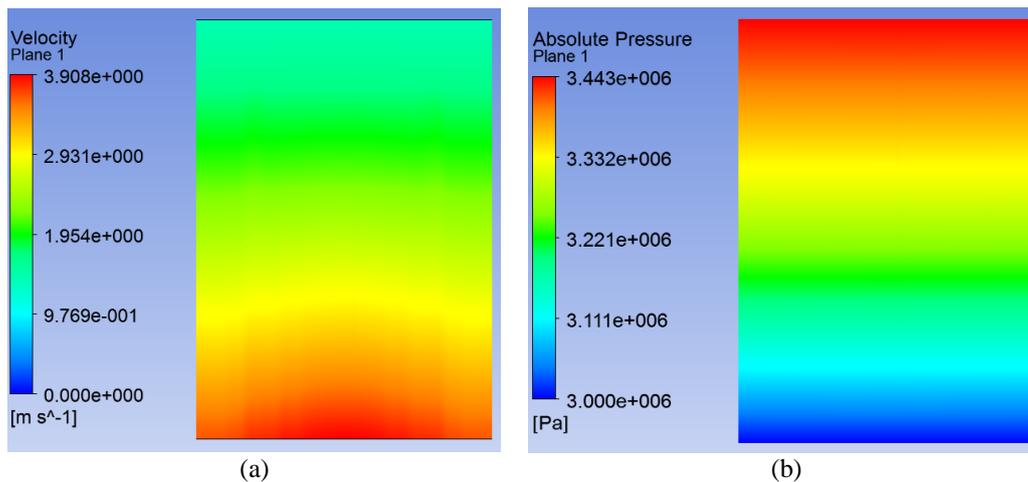


Figura 4: (a) Perfil de velocidade do refrigerante (hélio) no núcleo. (b) Perfil de pressão do refrigerante (hélio) no núcleo

A obtenção da distribuição de temperaturas do hélio no interior do núcleo é uma tarefa importante do ponto de vista da segurança do elemento combustível. Uma vez que estes perfis de temperatura mostram as zonas do núcleo onde o hélio tem maior temperatura, e conseqüentemente, onde os elementos combustíveis podem exceder o limite máximo de temperatura estabelecido pelo projeto do tipo de combustível. No caso do reator HTR-10 o limite máximo permitido para as bolas é de 1870 K.

Na Fig. 5 mostramos a distribuição de temperaturas do hélio no núcleo, podemos observar que a temperatura varia de 523 K na entrada, até 1245 K na saída, ademais a temperatura média na saída é de 1134 K.

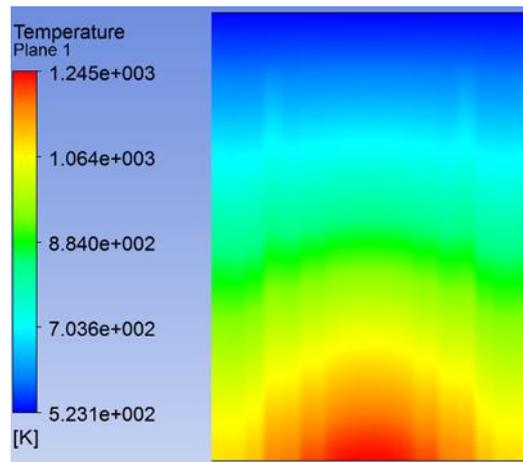


Figura 5: Distribuição de temperaturas do fluido refrigerante (hélio) no interior do núcleo

5.2 Simulação com abordagem realística

Nesta seção, simulamos o fluxo de gás sobre as bolas utilizando uma abordagem realística. Para isso, analisamos uma região na saída do reator onde a temperatura do hélio é maior, chamamos esta seção do núcleo de região crítica. A geometria consiste em uma célula FCC com três camadas de bolas com espaçamento entre elas de 2 mm. O espaçamento é utilizado para representar a porosidade de 0,39 e simplificar a construção da malha. A Fig. 6 mostra duas vistas da geometria utilizada na simulação.

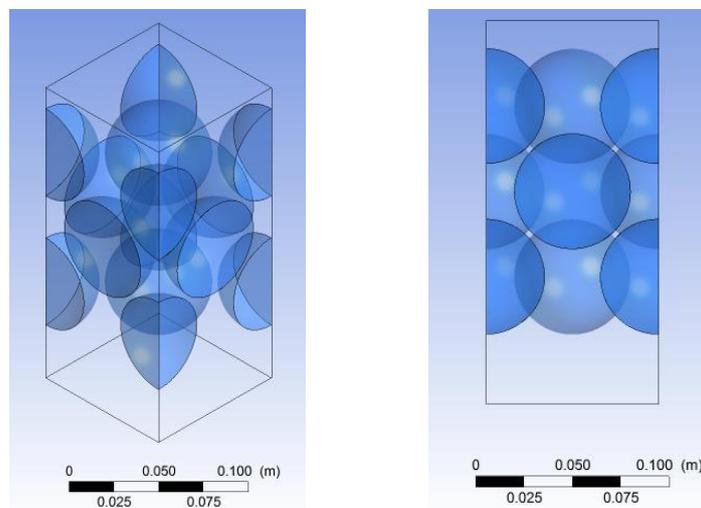


Figura 6: Vistas do modelo geométrico utilizado na simulação realística do núcleo

As principais hipóteses consideradas na simulação realística do leito de bolas foram:

1. As bolas no núcleo são estacionárias.
2. As bolas emitem um fluxo de calor volumétrico uniforme.
3. O arranjo está localizado no nível inferior do núcleo onde a temperatura de refrigerante é de aproximadamente 1245 K.
4. O hélio é compressível.

O fluxo de massa de entrada para esta simulação é calculado de forma proporcional ao fluxo de massa total de refrigerante no núcleo. Consideramos um fluxo de calor volumétrico de $1,53 \text{ MW/m}^3$, e a condição de contorno de plano de simetria é considerada nas faces laterais do domínio de simulação.

A partir deste modelo, foi possível obter a distribuição de temperaturas no interior dos elementos combustíveis, visando determinar se não é ultrapassado o limite de temperatura recomendado para manter a integridade do elemento. Na Fig. 7 mostramos a distribuição de temperaturas no plano central das bolas, o valor máximo obtido com a simulação foi de 1317 K, consideravelmente inferior ao limite de 1870 K recomendado no projeto do elemento combustível tipo TRISO.

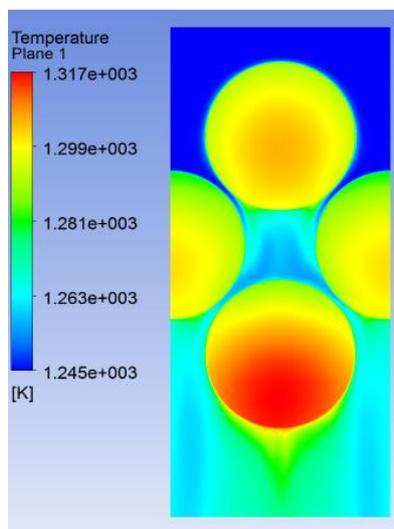


Figura 7: Distribuição de temperatura do refrigerante e das bolas (plano central). na região crítica do núcleo

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho utilizamos técnicas de CFD para calcular parâmetros termo-hidráulicos do núcleo do reator de leito de bolas HTR-10. Foram utilizados dois modelos, o primeiro para a simulação do núcleo completo usando uma abordagem de meio poroso, e o segundo para obter a temperatura máxima dos elementos combustíveis usando uma abordagem realística na região crítica do núcleo. A partir destas simulações obtivemos:

1. A queda de pressão do hélio que passa através do núcleo do HTR-10, utilizando o modelo de perda direcional para meios porosos, e também pela correlação semi-empírica do Guia de Segurança Alemão [7]. Ambos os resultados apresentam uma boa correspondência com diferenças da ordem de 6,5%.
2. A distribuição de temperaturas do refrigerante ao longo do núcleo. Foi constatado que a temperatura média de saída obtida com a simulação é superior do que a verificada no reator [5].
3. A temperatura máxima dos elementos combustíveis na região crítica do núcleo foi de 1317 K, o que não excede o limite de 1870 K para este tipo de combustível.

Os futuros desdobramentos desta pesquisa envolvem uma comparação exaustiva com os dados experimentais do reator e o ajuste se necessário dos parâmetros do meio poroso. Adicionalmente a região crítica pode ser simulada na abordagem realística com um maior número de camadas de bolas, dependendo do custo computacional associado a esta simulação.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) a través do projeto CAPES-MES-114/2011. Ademais, os autores ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) de Reatores Nucleares Inovadores do Brasil pelo suporte oferecido a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] M. J. Baker. CFD simulation of flow through packed beds using the finite volume technique. PhD thesis, University of Exeter, United Kingdom, 2011.
- [2] Y. M. Ferng e K. Y. Lin. Investigating effects of BCC and FCC arrangements on flow and heat transfer characteristics in pebbles through CFD methodology. *Nuclear Engineering and Design*, 258:66–75, 2013.
- [3] L. García. Diseño conceptual de un sistema controlado por un acelerador para transmutación de residuos nucleares y aplicaciones energéticas. Tesis de doutorado, Universidad Politécnica de Valencia, Espanha, 2012.
- [4] L. García, J. Pérez, C. García, A. Escrivá, J. Rosales e A. Abádanes. Calculation of the packing fraction in a pebble-bed ADS and redesigning of the Transmutation Advanced Device for Sustainable Energy Applications (TADSEA). *Nuclear Engineering and Design*, 253:142–152, 2012.
- [5] IAEA-TECDOC-1694. Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis Related to the PBMR-400, PBMM, GT-MHR, HTR-10 and the ASTRA Critical Facility, International Atomic Energy Agency, 2013.
- [6] J. J. VanRensburg e M. Kleingeld. An integral CFD approach for the thermal simulation of the PBMR Reactor Unit, *Nuclear Engineering and Design*, 241:3130–3141, 2011.
- [7] KTA. Safety Standards of the Nuclear Safety Standard Commission. KTA3102.3, Reactor Core Design of High-Temperature Gas-Cooled Reactors, Part 3: Loss of Pressure through Friction in Pebble Bed Cores, Nuclear Safety Standards Commission (KTA), 2013.
- [8] M. T. Kao, Y. H. Tung, Y. M. FERNG, C. C. CHIENG e M. K. CHYU. 3D measurements and numerical computations of heat transfer coefficients on spheres in an array. *International Journal of Thermal Sciences*, 68:110-118, 2013.
- [9] D. Pavlidis e D. Lathouwers. Fluid flow and heat transfer investigation of pebble bed reactors using mesh-adaptive LES. *Nuclear Engineering and Design*, 264:161– 167, 2013.
- [10] D. Pavlidis e D. Lathouwers. Realistic packed bed generation using small numbers of spheres, *Nuclear Engineering and Design*, 263:172–178, 2013.
- [11] A. F. Pilehvar, M. Aghaie, M. H. Esteki, A. Zolfaghari, A. Minucherhr e A. Daryabak, A. Safavi. Evaluation of compressible flow in spherical fueled reactors using the porous media model, *Annals of Nuclear Energy*, 57:185–194, 2013.
- [12] P. Sabharwall, S. Bragg-Sitton e C. Stoots. Challenges in the development of high temperature reactors. *Energy Conversion and Management*, 74:574–581, 2013.
- [13] P. Saha, N. Aksan, J. Andersen, J. Yan, J. P. Simoneau, L. Leung, F. Bertrand, K. Aoto e H. Kamide. Issues and future direction of thermal-hydraulics research and development in nuclear power reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 264:3-23, 2013.

- [14] A. Shams, F. Roelofs, E. M. J. Komen e E. Baglietto. Optimization of a pebble bed configuration for quasi-direct numerical simulation. *Nuclear Engineering and Design*, 242:331-340, 2012.
- [15] A. Shams, F. Roelofs, E. M. J. Komen e E. Baglietto. Large eddy simulation of a nuclear pebble bed configuration. *Nuclear Engineering and Design*, 261:10–19, 2013.
- [16] A. Shams, F. Roelofs, E. M. J. Komen e E. Baglietto. Numerical simulations of a pebble bed configuration using hybrid (RANS–LES) methods. *Nuclear Engineering and Design*, 261:201– 211, 2013.
- [17] A. Shams, F. Roelofs, E. M. J. Komen e E. Baglietto. Quasi-direct numerical simulation of a pebble bed configuration, Part-II: Temperature field analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 263:490–499, 2013.
- [18] A. Shams, F. Roelofs, E. M. J. Komen e E. Baglietto. Quasi-direct numerical simulation of a pebble bed configuration. Part I: Flow (velocity) field analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 263:473–489, 2013.
- [19] Y. C. Wu, Y. M. Ferng, C. C. Chieng e C.C. Liu. Investigating the advantages and disadvantages of realistic approach and porous approach for closely packed pebbles in CFD simulation. *Nuclear Engineering and Design*, 240:1151–1159, 2010.
- [20] J. Yang, S. Bu, M. Zeng, Q. Wang e A. Nakayama. Experimental analysis of forced convective heat transfer in novel structured packed beds of particles. *Chemical Engineering Science*, 71:126–137, 2012.