



# ANÁLISE TÉRMICA DE UM REATOR DE ALTA TEMPERATURA USANDO O CÓDIGO RELAP5-3D

Modalidade Doutorado

Maria E. Scari, Antonella L. Costa, Claúbia Pereira, Maria A. F. Veloso, Clarysson A. M. Silva



Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia  
Belo Horizonte, MG, Brasil  
Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia de Reatores Nucleares Inovadores/CNPq, Brasil  
melizabethscari@yahoo.com

## Resumo

Os reatores modulares de Alta Temperatura Refrigerados a Gás (HTGR) são considerados fontes seguras e eficientes de energia nuclear para produção de eletricidade e outras aplicações industriais, como produção de hidrogênio, e vem sendo bastante estudados e testados. O HTR-10 é um reator modular de alta temperatura, tendo como combustível urânio enriquecido e distribuído no núcleo na forma de *pebble bed*. Ele é refrigerado a gás (hélio), tem potência de 10 MW e foi projetado, construído e operado na China pelo *Institute of Nuclear and New Energy Technology (INET)*. Neste trabalho, o código RELAP5-3D é utilizado para fazer a modelagem termo-hidráulica deste reator e o seu comportamento no estado estacionário é estudado. Resultados da distribuição de temperatura ao longo do núcleo, temperaturas de saída e de entrada do refrigerante, vazão do refrigerante e outros parâmetros são simulados. Estes resultados são comparados com dados disponíveis em um documento referência publicado pela *International Atomic Energy Agency (IAEA)* em 2013. Estudos iniciais demonstraram que o modelo construído no código RELAP5-3D é capaz de reproduzir o comportamento térmico do reator HTR-10.

## Introdução

O HTR-10 é um reator refrigerado a hélio que tem como combustível o Urânio enriquecido [1]. A figura 1 mostra o seu esquema. As tabelas de 1 e 3 apresentam as suas características físicas e térmicas, respectivamente. A tabela 2 e a figura 2 apresentam as características do combustível utilizado no mesmo. O HTR-10 utiliza o combustível em forma de *pebbles*, que são bolinhas formadas principalmente de urânio e grafite. Também são utilizadas as *dummy pebbles*, que são apenas de grafite.

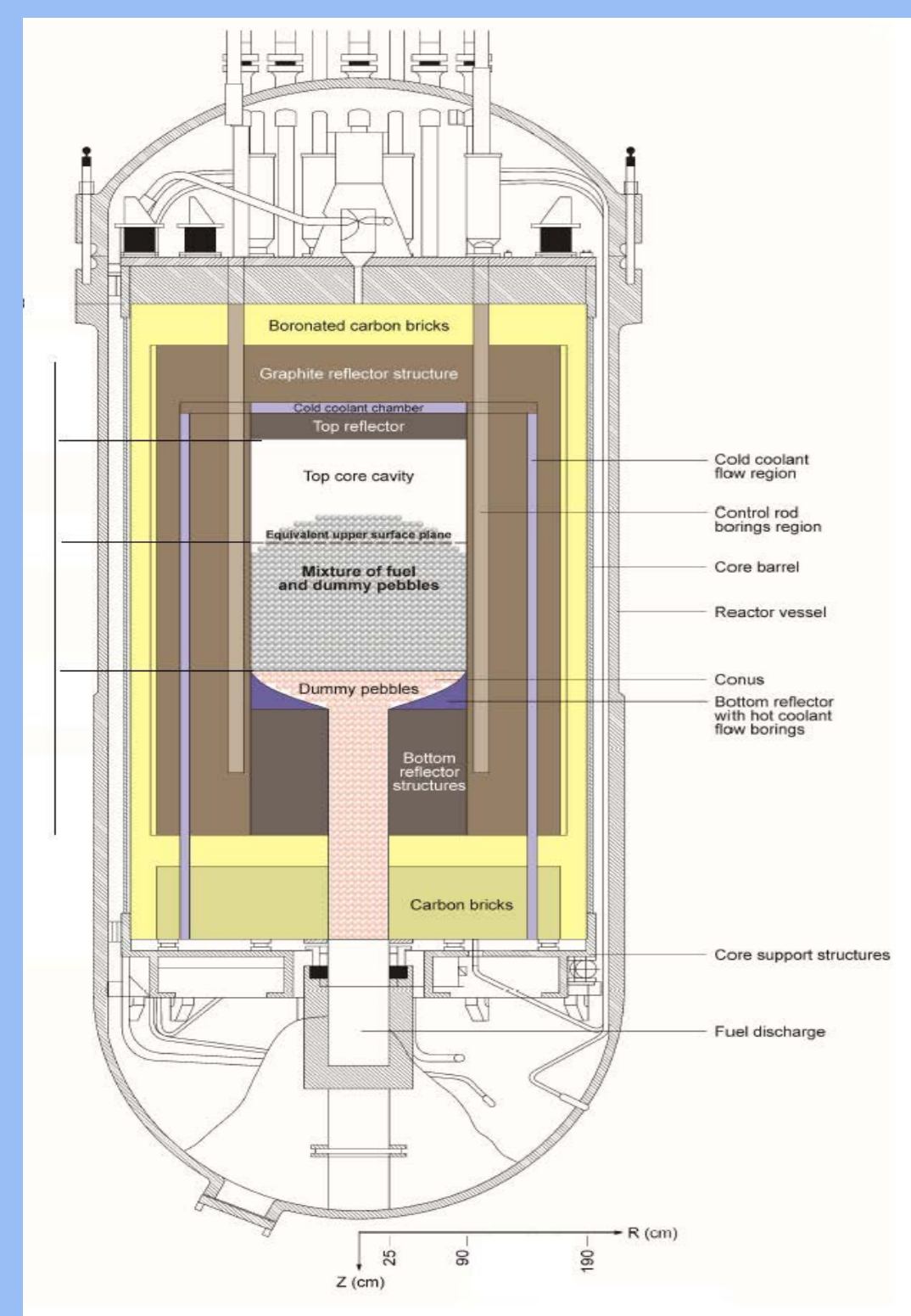


Figura 1 – Configuração do núcleo do HTR-10 [4].

Tabela 1 – Características geométricas do núcleo do reator HTR-10 [2].

Parâmetro	Valor
Diâmetro equivalente, cm	180
Comprimento médio, cm	197
Volume, m <sup>3</sup>	5
Fração volumétrica de preenchimento das <i>pebbles</i> no núcleo	0.61
Comprimento da cavidade vazia acima da <i>pebble bed</i> , cm	41.7
Diâmetro equivalente do tubo de descarregamento de combustível, cm	50

Tabela 2 – Parâmetros de projeto dos elementos combustíveis, *dummy balls* e taxa de carregamento [2]

Parâmetro	Valor
Elemento combustível	
Diâmetro da <i>pebble</i> , cm	6.0
Diâmetro da <i>pebble</i> de combustível, cm	5.0
Combustível	UO <sub>2</sub>
Enriquecimento do U-238 (peso), %	17
Carga (peso) de metal pesado (Urânio) por <i>pebble</i> , g	5.0
Densidade da matriz de grafite ao redor do envólucro, g/cm <sup>3</sup>	1.73
<i>Dummy balls</i>	
Diâmetro da bola, cm	6.0
Densidade do grafite, g/cm <sup>3</sup>	1.73
Razão de carga de bolas de combustível e <i>dummy balls</i>	57:43

Tabela 3 – Principais parâmetros térmicos do HTR-10 [2]

Parâmetro	Valor
Potência térmica do reator, MW	10
Pressão primária do hélio, MPa	3.0
Temperatura média do hélio na entrada do reator, °C	250
Temperatura média do hélio na saída do reator, °C	700
Taxa de vazão de fluxo no funcionamento total, kg/s	4.32

## Modelagem

Sete canais TH foram considerados para representar o núcleo do HTR-10 (sete *pipes* e sete estruturas de calor). A quantidade média de *pebble* de combustível em cada canal foi calculada somando-se o volume de todas as *pebbles* e encontrando-se o volume correspondente para determinado canal. Os diâmetros de cada canal estão representados na figura 3. As estruturas de calor (HS) simulam a fonte de calor de cada canal e cada uma foi axialmente dividida em volumes correspondentes aos volumes de cada canal. A figura 4 mostra o modelo do HTR-10 utilizado no RELAP5-3D. Os canais possuem comprimentos diferentes de acordo com o núcleo do reator. Para simular a passagem de hélio entre as *pebbles* no núcleo do reator, foram feitas junções simples para conectar os volumes dos canais no mesmo nível. O fluido refrigerante (hélio) circula entre estas junções. Dois volumes dependentes do tempo simulam o *inlet* e o *outlet plenum*. As HS tem 12 *meshes* diferentes, seis representando o combustível e seis representando a região de grafite.

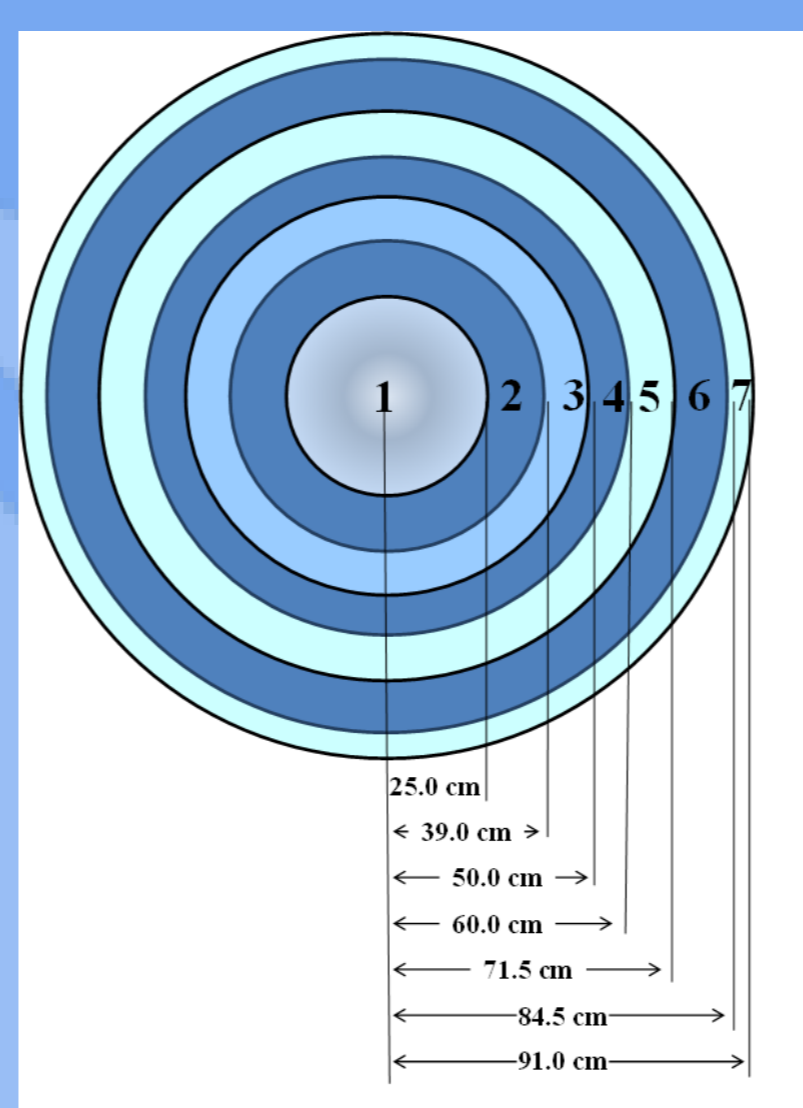


Figura 3 – Nodalização dos canais do HTR-10 no RELAP5-3D.

## Resultados

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4 e nas figuras de número 5 ao número 10. Os parâmetros analisados atingiram o estado estacionário como descrito na referência [3]. A Fig. 10 apresenta uma comparação entre dados de temperatura do combustível no centro do núcleo obtidos neste trabalho e aqueles encontrados pelos participantes do benchmark (valores máximo e mínimo) [2]. A temperatura calculada neste trabalho aumenta ao longo do núcleo com valor médio esperado seguindo aproximadamente o mesmo comportamento das curvas apresentadas no benchmark. Investigações estão sendo realizadas para encontrar as possíveis causas da discrepância na altura inicial cujo valor está subestimado em relação ao benchmark.

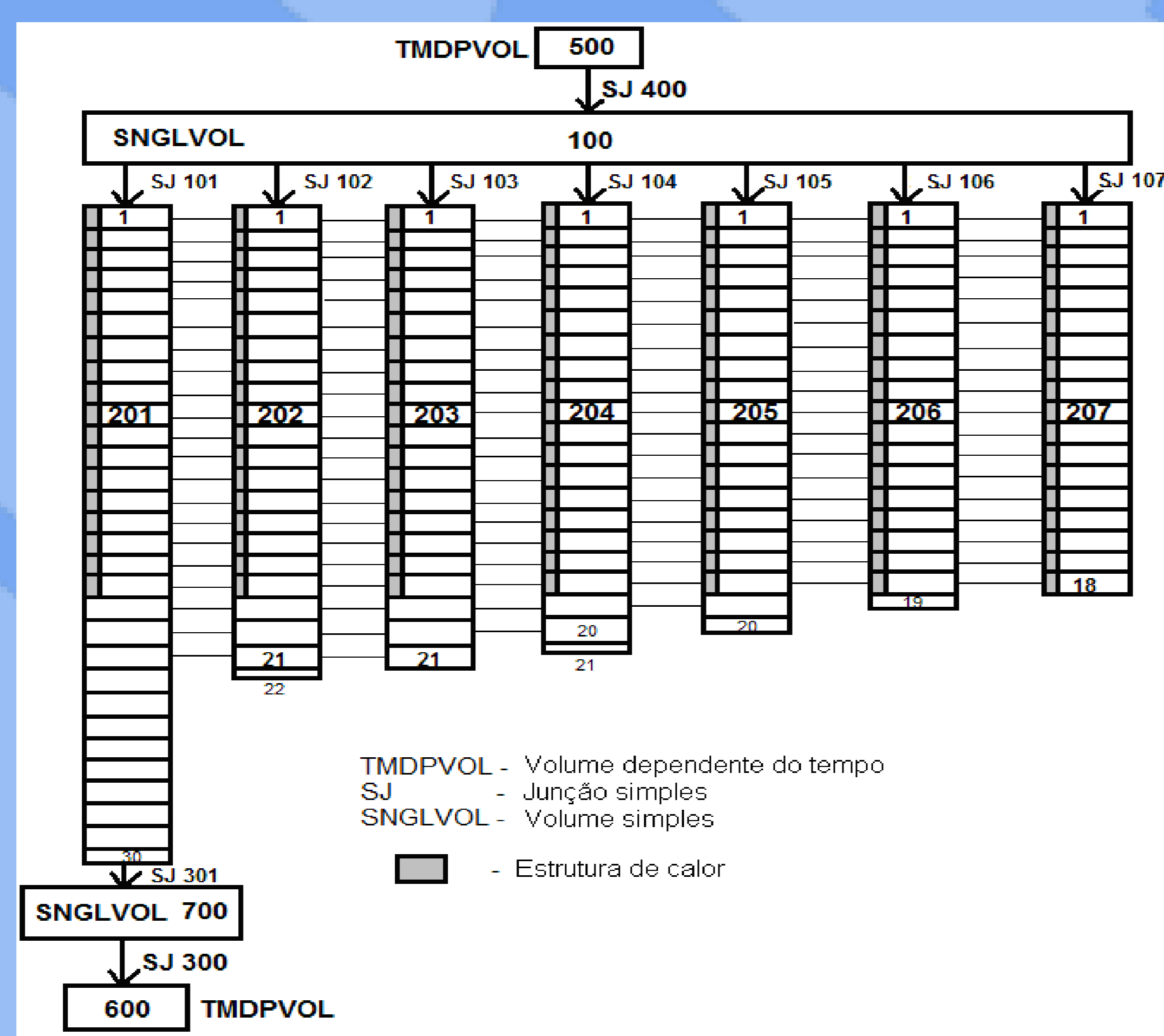


Figura 4 – Modelo do HTR-10 no RELAP5-3D.

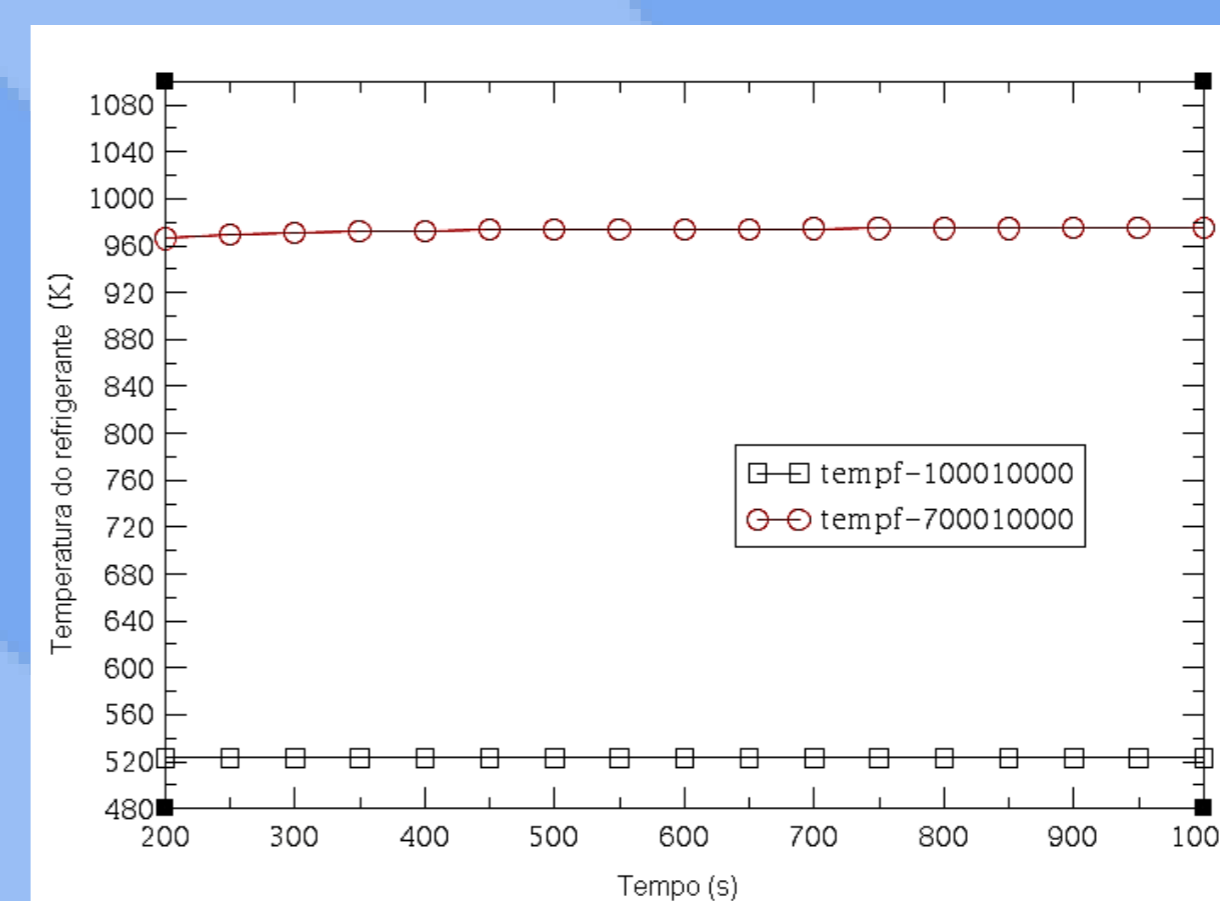


Figura 5 – Temperatura do Refrigerante.

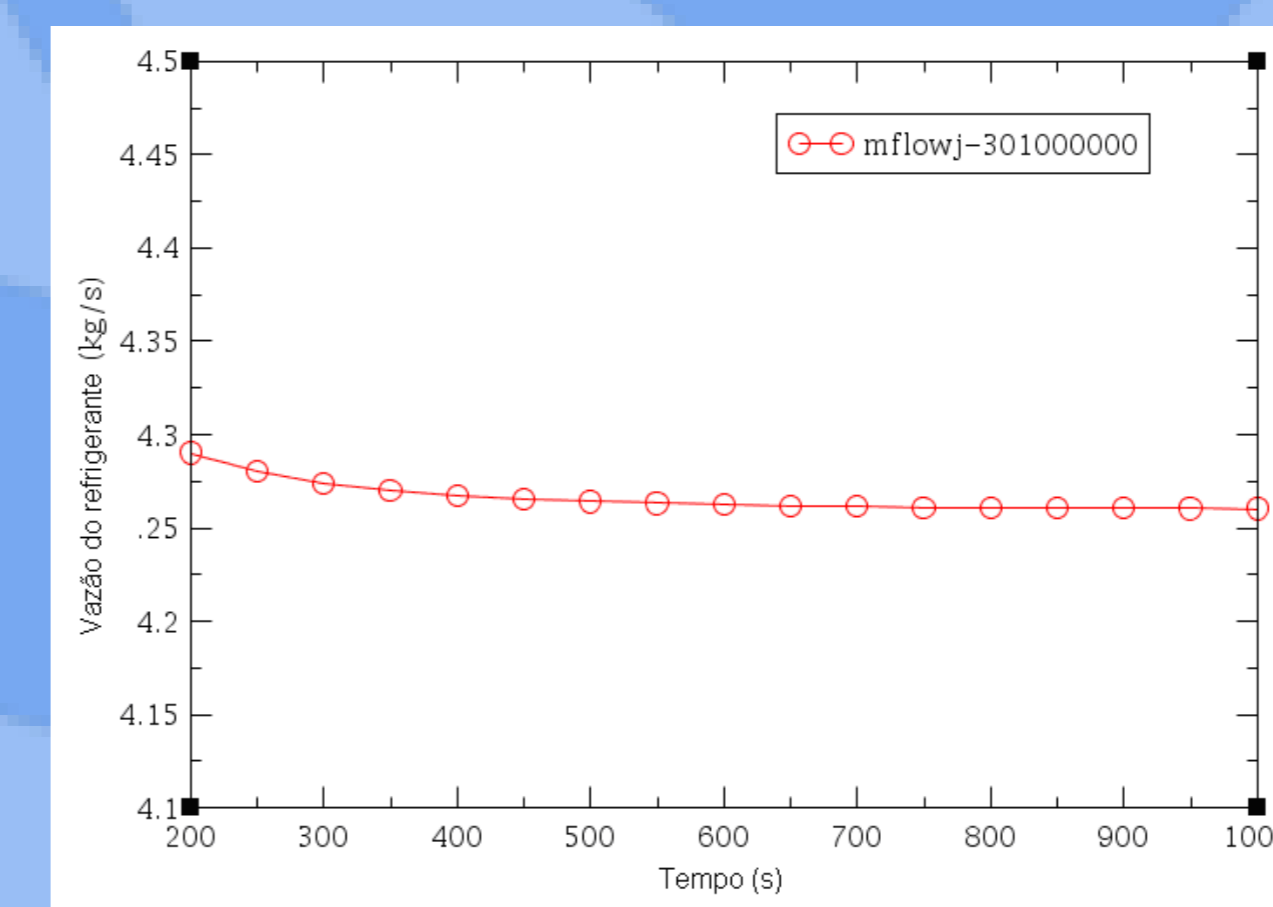


Figura 6 – Vazão do Refrigerante.

Tabela 4 - Resultados dos cálculos do estado estacionário do núcleo do HTR-10 obtidos com o RELAP5-3D comparados com a referência.

Parâmetro	Referência [3]	RELAP5-3D	Diferença (%)
Potência, MW	10,0	10,0	0
Taxa de vazão, kg/s	4,32	4,26	1,4
Pressão do hélio no núcleo, MPa	3,0	3,0	0
Aumento de temperatura ao longo do núcleo, °C	450,0	451,8	0,4

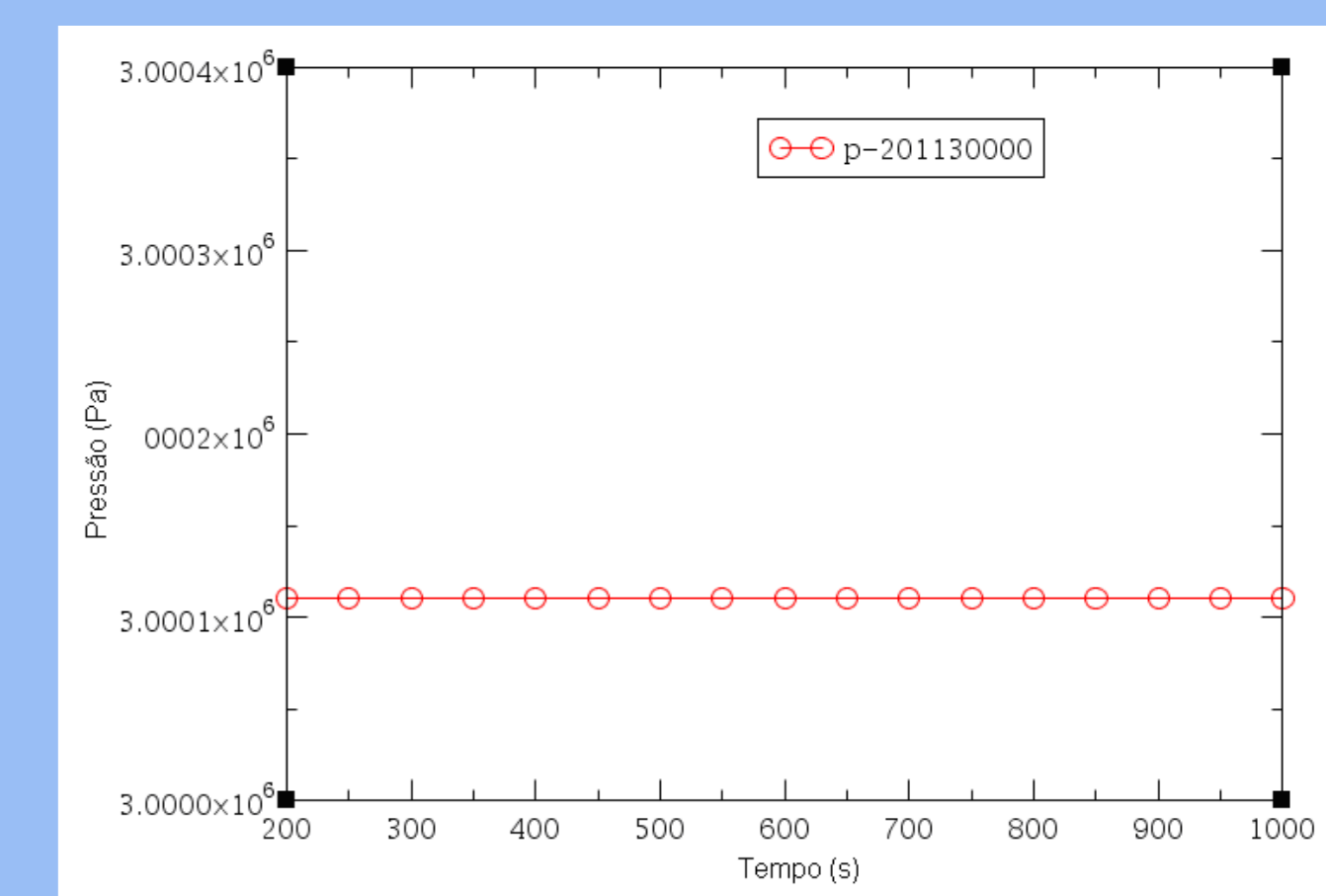


Figura 7 – Pressão do Refrigerante.

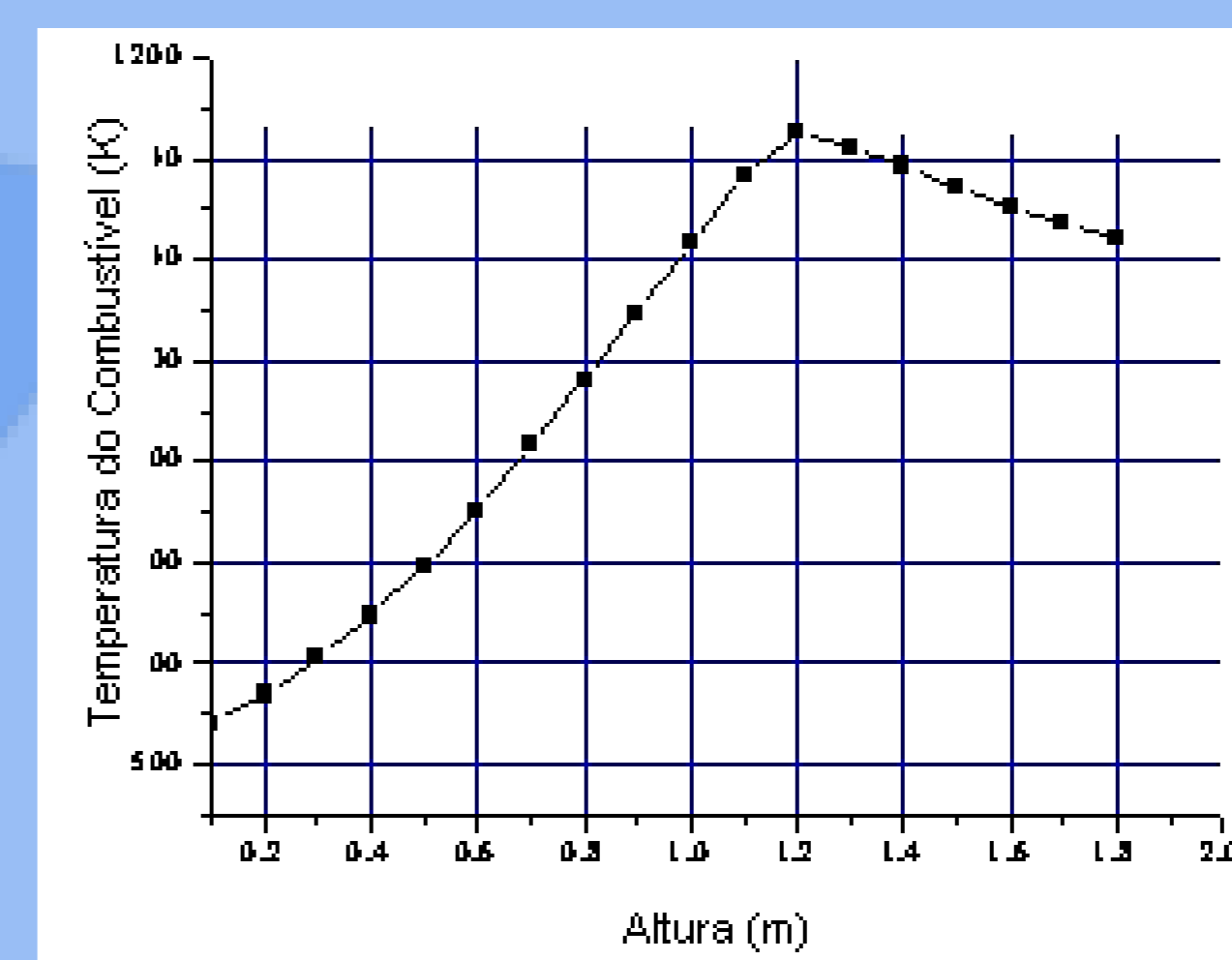


Figura 9 – Temperatura Axial Central do Combustível ao Longo do Canal 201

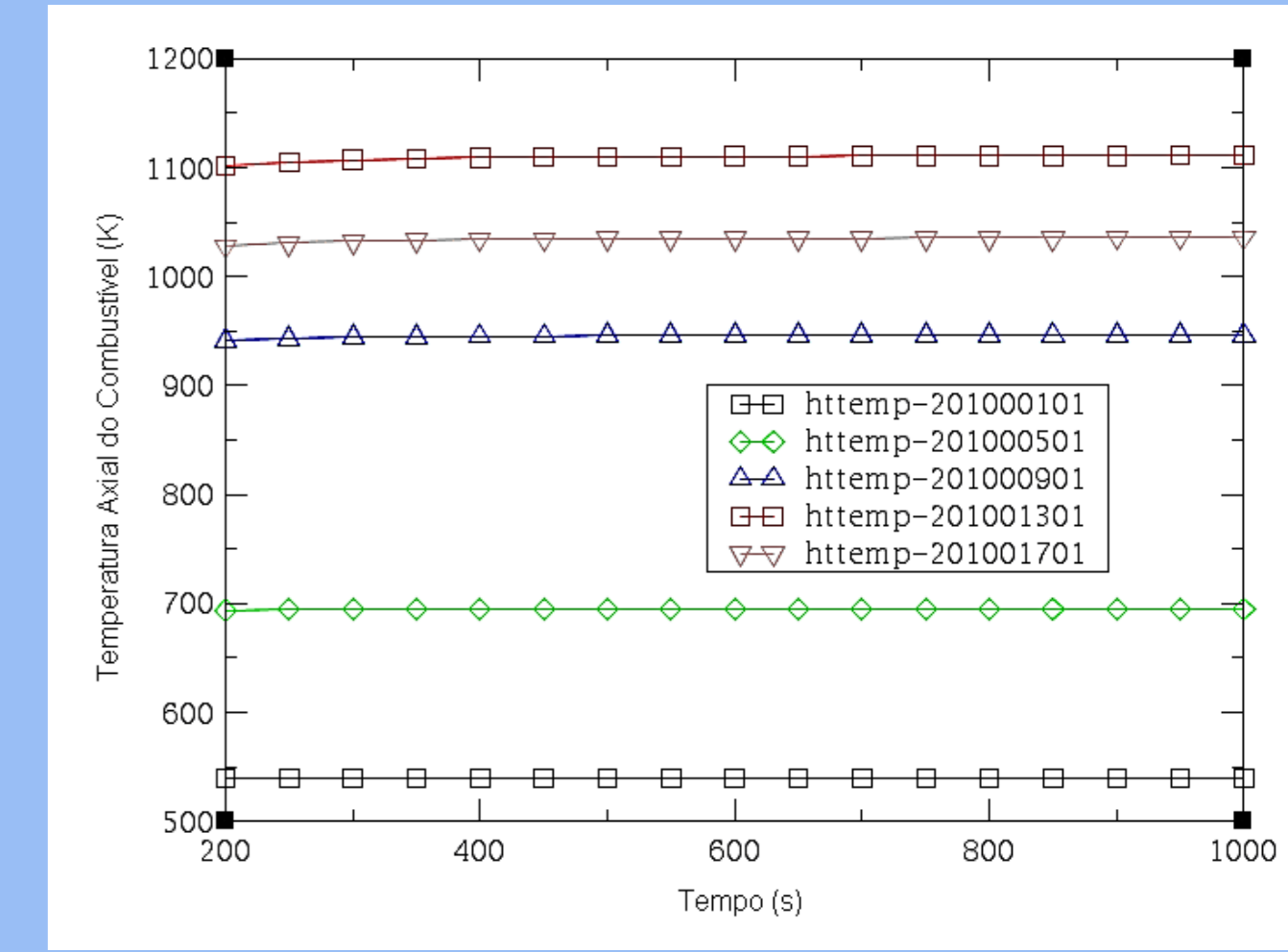


Figura 8 – Evolução da Temperatura Axial do Combustível na HS 201

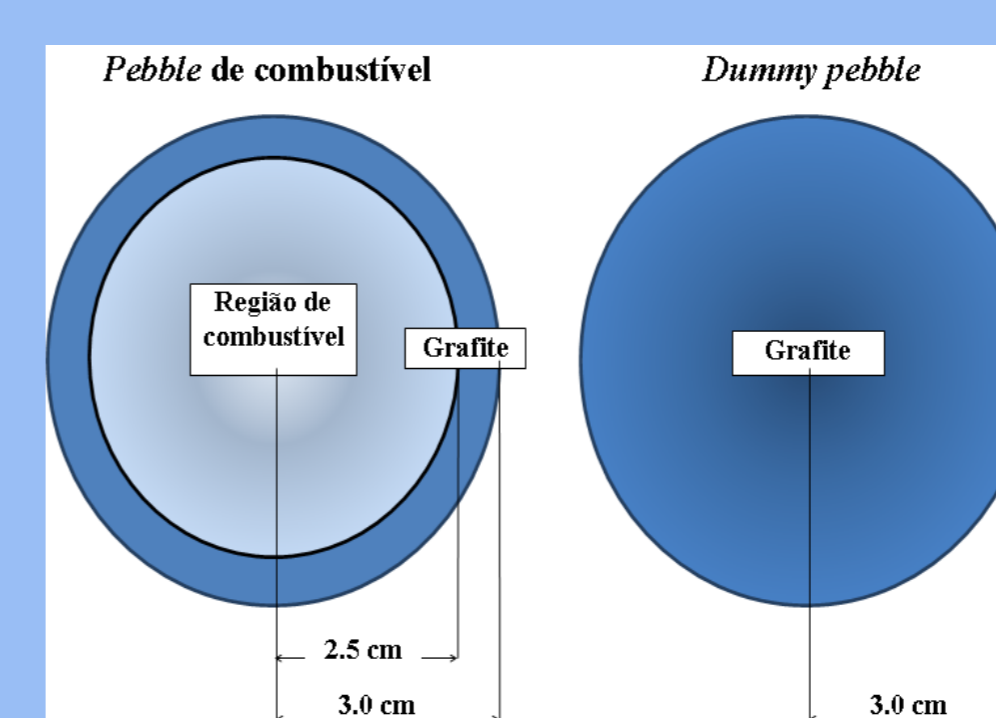


Figura 2 – Elemento Combustível e *dummy balls*.

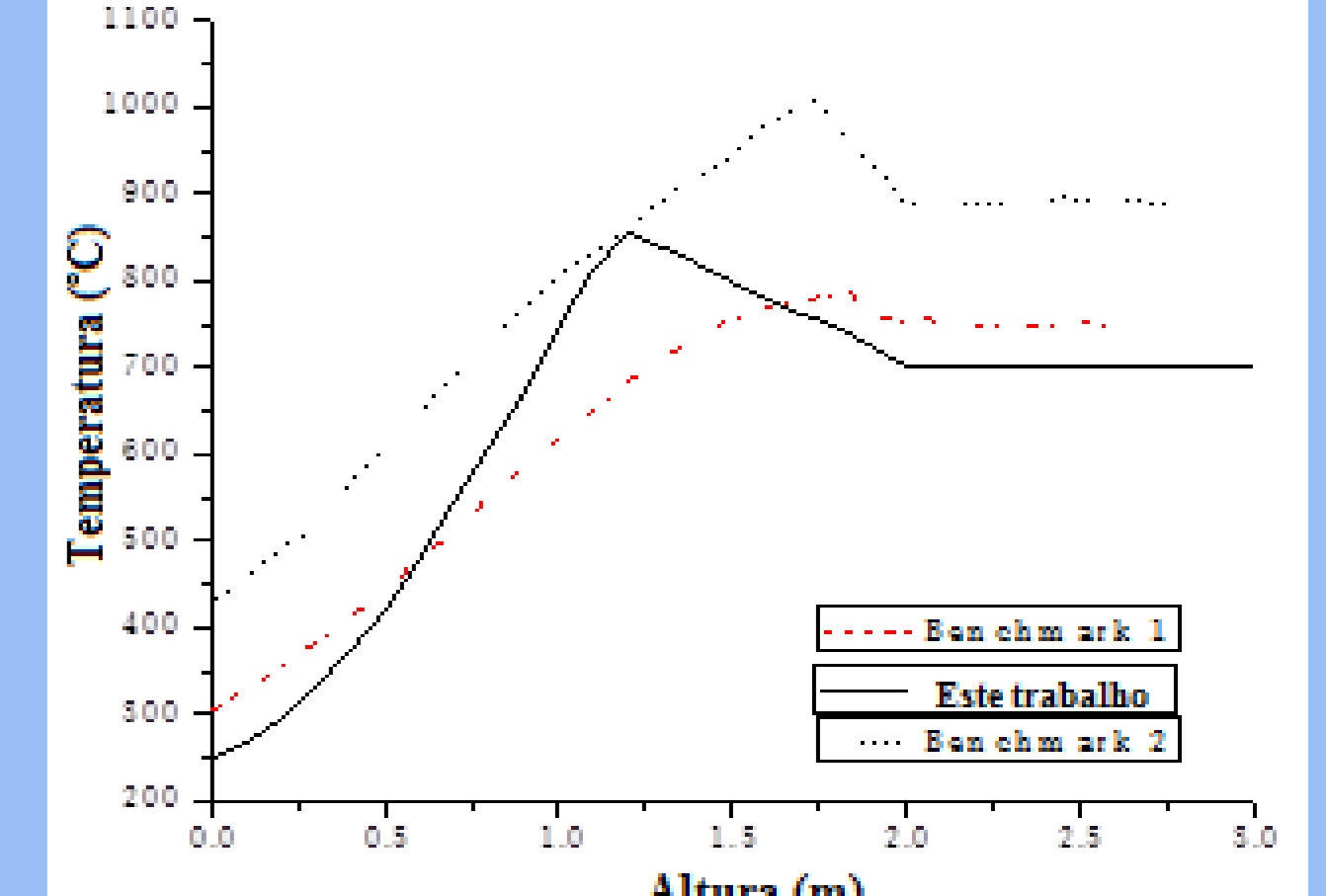


Figura 10 – Comparação dos Perfis de Temperatura Axial do Núcleo do HTR-10.

## Conclusões

Nesse estudo o núcleo do HTR-10 foi simulado utilizando-se o RELAP5-3D. Os resultados apresentaram um comportamento similar ao observado nas referências, embora, sejam necessárias investigações para encontrar as causas das diferenças de temperatura encontradas no modelo e nas *benchmarks*. As temperaturas encontradas nas simulações foram maiores. O modelo utilizado parece funcionar bem desde que a distribuição de temperatura alcance o estado estacionário como esperado. Futuramente pretende-se acrescentar mais detalhes ao modelo do núcleo do reator para simular também os estados estacionários. Resultados mais realistas serão encontrados com a representação tridimensional do núcleo. Pretende-se também incorporar parâmetros neutrônicos no modelo do RELAP5-3D para realizar uma simulação termo-cinética 3D neutrônica, com acoplamento do HTR-10.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CDTN/CNEN, à FAPEMIG e ao CNPQ pelo apoio. Também ao *Idaho National Laboratory* pela licença de utilização do RELAP5-3D.

## Bibliografia

- [1]Gougar, H. D., Davis, C. B., 2006, "Reactor Pressure Vessel Temperature Analysis for Prismatic and Pebble-Bed VHTR Designs", INEEL/EXT-6-11057, Idaho Falls, USA
- [2]International Atomic Energy Agency, 2001, "Current Status and Future Development of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor Technology, IAEA-TECDOC-1198, Vienna, Austria.
- [3]International Atomic Energy Agency, 2013, "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", IAEA-TECDOC-1694, Vienna, Austria.
- [4]Nuclear Energy Agency, 2006, "Evaluation of The Critical Configuration of The HTR-10 Pebble-Bed Reactor: Gas Cooled (Thermal) Reactor-GCR, HTR-10-GCR-RESR-001, CRIT-REAC", NEA/NSC/DOC [5]The RELAP5-3D Code Development Team, 2009, "RELAP5-3D Code Manuals", INEEL-EXT-98-00834, Idaho National Laboratory, USA.