

ESTUDO DO SISTEMA PASSIVO DE REMOÇÃO DE CALOR RESIDUAL DE UM REATOR PWR PEQUENO MODULAR

Nathália N. Araujo¹, José L. H. Faccini² e Jian Su³

¹ Departamento de Engenharia Nuclear - Escola Politécnica
Universidade Federal do Rio de Janeiro
21941-909, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
nathalianunes@poli.ufrj.br

² Instituto de Engenharia Nuclear (IEN / CNEN)
21941-906, Rio de Janeiro - RJ – Brasil
faccini@ien.gov.br

³ Programa de Engenharia Nuclear, COPPE
Universidade do Federal do Rio de Janeiro
21941-972, Rio de Janeiro - RJ - Brasil
sujian@lasme.coppe.ufrj.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre o sistema passivo de remoção de calor residual (PRHRS) de um reator nuclear modular de pequeno porte (SMR) de 75MW. Reactores nucleares mais avançados, como os da geração III+ e IV, possuem sistemas de segurança passivos que entram automaticamente em ação com o intuito de impedir acidentes. O PRHRS tem como objetivo a transferência do calor de decaimento do combustível nuclear do reator, mantendo o núcleo resfriado após o desligamento da usina. Ele começa a operar caso ocorra uma queda do fornecimento de energia elétrica para a estação nuclear, ou caso ocorra uma indisponibilidade do sistema de alimentação de água dos geradores de vapor. A remoção de calor de decaimento do núcleo do reator é realizada por meio do escoamento do refrigerante primário por circulação natural através de trocadores de calor situados em uma piscina cheia de água localizada acima no núcleo. A circulação natural é causada pelo gradiente de densidade entre o núcleo do reator e a piscina. Uma análise térmica e comparativa do PRHRS foi realizada consistindo da resolução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia e usando aproximações de fluido incompressível com a aproximação de Boussinesq. Os cálculos foram realizados com o auxílio do software Mathematica. Um dimensionamento do trocador de calor e do tanque de água de resfriamento foi feito de modo que o núcleo do reator se mantenha resfriado por 72 horas utilizando somente o PRHRS.

1. INTRODUÇÃO

A energia nuclear é uma alternativa energética que implica em um baixo impacto ambiental em condições normais de operação, ocupa uma pequena área territorial, gera uma baixa quantidade de poluentes atmosféricos e é independente do clima, sendo propícia para operar na base. Proveniente da energia liberada em reações nucleares, as centrais nucleares utilizam

o calor liberado no núcleo dos reatores para transformar água em vapor, que move turbinas gerando energia elétrica.

Reatores nucleares de pequeno porte (*Small Modular Reactors, SMRs*) são reatores que possuem potência elétrica equivalente menor ou igual que 300MW(e) que fazem parte de uma nova geração de usinas nucleares em desenvolvimento para fornecer uma energia flexível e econômica. De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica [1] existem mais de 45 projetos SMR em desenvolvimento para diferentes problemas de aplicação.

Recentemente a ocorrência de alguns acidentes em usinas nucleares tem provocado um aumento na demanda de requisitos de segurança nuclear inerentes às usinas. Um dos objetivos desejados para reatores mais avançados, como os da geração III+ e IV é o de incorporar características inerentes e passivas de segurança, que reduzam os riscos de um acidente severo e atendam aos requisitos exigidos pelas autoridades licenciadoras (Botelho [2]).

Após o desligamento seguro do reator, calor continua sendo gerado no núcleo devido aos produtos de fissão, sendo assim o núcleo necessita ser resfriado continuamente. Na maioria das plantas nucleares, esse resfriamento é feito pelo sistema de água de emergência com auxílio de bombas acionadas eletricamente. Porém, na perda de energia elétrica as bombas não estão disponíveis. O sistema de remoção de calor residual (*Passive Residual Heat Removal System, PRHRS*) é um sistema passivo, que não utiliza nenhuma fonte de energia externa e funciona à base de circulação natural, removendo calor do núcleo por convecção natural no caso da não-disponibilidade do sistema normal de alimentação de água.

A circulação natural é um fenômeno causado por um gradiente de densidade e altura, sendo as diferenças de densidade no fluido criadas através de mudanças na sua temperatura. A Fig. 1 apresenta um exemplo de circulação natural em um PRHRS. Nesse processo, o fluido em contato com uma fonte de calor (núcleo do reator) é aquecido, diminuindo sua densidade nessa região. Ao entrar em contato com o trocador de calor localizado acima da fonte, o fluido é resfriado e conseqüentemente sua densidade aumenta. Quando a diferença de temperatura for grande o suficiente, as forças de empuxo do fluido superarão as forças viscosas, e junto com o gradiente de densidade, agindo por gravidade sobre a diferença de elevação entre a fonte e o trocador, geram uma circulação do fluido. A vazão de circulação forçada do fluido de resfriamento primário gerada pela bomba primária, é no sentido da perna fria para a perna quente. A vazão de circulação natural é no sentido contrário, isto é, da perna quente para a perna fria.

As equações que governam os fenômenos de transporte no reator nuclear são conhecidas como as equações de Navier-Stokes. Desenvolvidas por Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes [3] essas equações diferenciais parciais descrevem a quantidade de movimento, as transferências de massa e de calor de um fluido.

Este trabalho apresenta um estudo de um sistema passivo de remoção de calor residual (PRHRS) de um reator nuclear modular de pequeno porte de 75MW(th), de modo que o núcleo se mantenha resfriado por 72 horas sem a utilização de energia externa ou outro sistema de emergência. As distribuições de temperatura ao longo do circuito foram obtidas

resolvendo as equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis com a aproximação de Boussinesq.

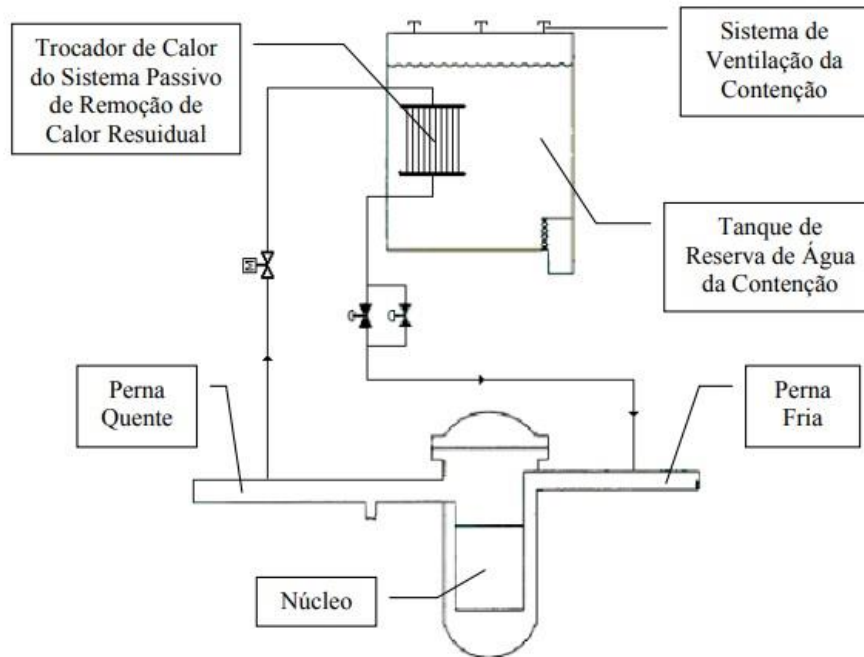


Figura 1: Esquema do sistema de circulação natural em um PRHRS (Silva [4]).

2. CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA

O sistema passivo de remoção de calor residual proposto neste trabalho, Fig. 2, é composto por dois trocadores de calor. O primeiro trocador de calor está localizado em uma região acima do núcleo do reator e conectado por tubulações na perna quente e na perna fria do vaso do reator. O segundo trocador de calor fica localizado na parte inferior da piscina, acima do primeiro trocador de calor. Ambos trocadores de calor foram considerados funcionando em contra-corrente.

O líquido refrigerante, água, é aquecido no núcleo. Devido à diferença de densidade e altura inicia-se uma circulação natural da água do núcleo para o trocador de calor. Da mesma forma a parte inferior, na qual se localiza o trocador calor, terá um gradiente de temperatura e densidade em relação a parte superior, na qual se localiza o outro trocador de calor, iniciando uma circulação da água que trocará calor com a piscina.

A piscina absorve o calor de decaimento durante horas antes que sua água alcance a temperatura de saturação, sendo necessários alguns dias para que haja uma perda significativa de água que interrompa a remoção do calor residual do combustível. O PRHRS é isolado do sistema principal de refrigeração por válvulas, normalmente fechadas, que são automaticamente abertas quando ocorre o desligamento da bomba primária de resfriamento do núcleo.

Para a estimativa de dados foi estudado o reator PWR de pequeno porte CAREM [5] , que possui características semelhantes ao sistema proposto. A Tabela 1 descreve os parâmetros do reator considerados neste trabalho.

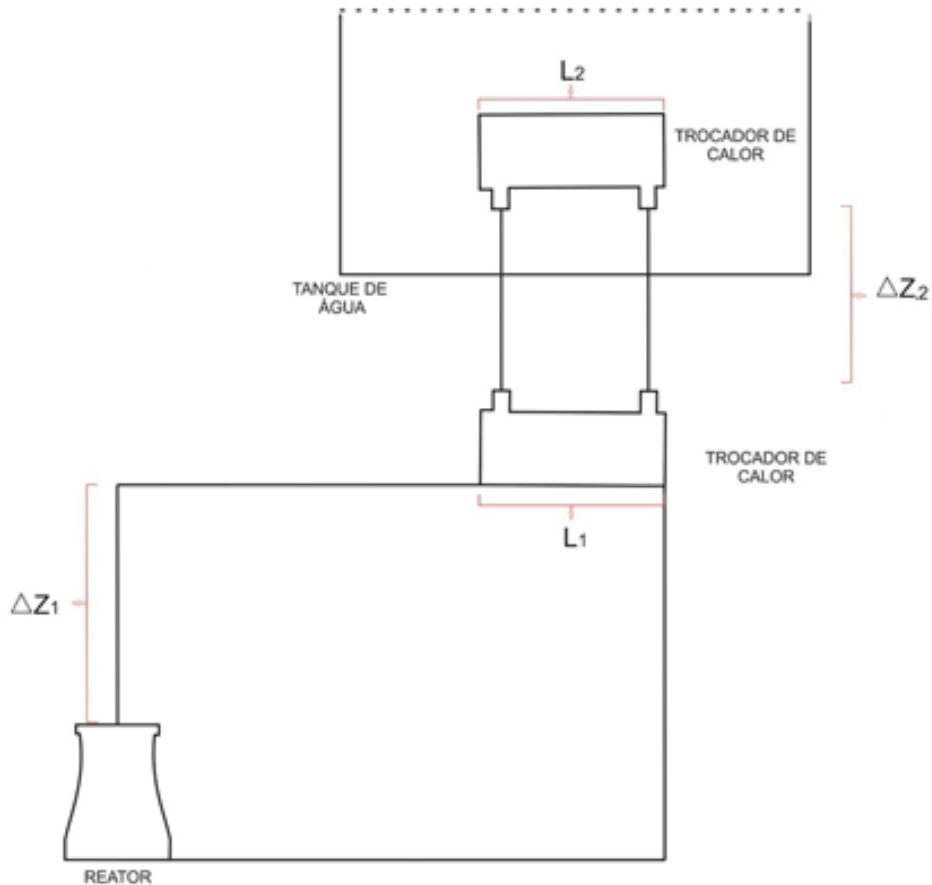


Figura 2: Sistema passivo de remoção de calor residual.

Tabela 1: Parâmetros do SMR PWR

Temperatura de entrada do vaso do reator	284° C
Temperatura de saída do vaso do reator	326° C
Pressão do vaso do reator	12.25Mpa
Altura do núcleo	1,4 m
Diâmetro do núcleo	1,3 m
Número de varetas combustíveis, N	6588
$\Delta z_1, \Delta z_2, L_1, L_2$	2,4, 2,0, 3,0, 2,5m
Diâmetro interno e externo do primeiro trocador de calor	0,014, 0,015m
Diâmetro interno do segundo trocador de calor	0,015m
Diâmetro da tubulação	0,25m
Número de tubos do primeiro trocador de calor	270
Número de tubos do segundo trocador de calor	210

3. METODOLOGIA

Considerando o fluido incompressível, as derivadas temporais da densidade são desprezadas e a aproximação de Boussineq é usada. A temperatura e velocidade são uniformes ao longo das seções transversais dos circuitos. Assim, as equações de conservação são as seguintes:

$$\frac{\partial(\dot{m}_i)}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

$$\Delta p b_i - \sum_{j=1}^{n_i} f_j \frac{L_j \dot{m}_i^2}{2Dh_j \rho_i A_j^2} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{m}_i c_p \frac{\partial T}{\partial s} = P_h q'' \quad (3)$$

Onde \dot{m}_i é a vazão mássica do fluido no circuito primário ($i=1$) ou secundário ($i=2$), ρ_i a densidade do fluido de referência no circuito i , g a aceleração da gravidade, A_j a área da seção transversal do componente j do circuito i , c_p o calor específico, e P_h o perímetro hidráulico.

Por se tratar de um circuito fechado, com pressurizador, as variações espaciais da pressão também são desprezadas. As equações são integradas ao longo de cada circuito. A aproximação de Boussineq foi utilizada ($\rho = \rho_i(1 - \beta\Delta T)$ onde β é o coeficiente de expansão térmica e ρ_i a densidade do fluido de referência no circuito i).

Supondo que o fluxo de nêutrons na barra de combustível cilíndrica é uniforme, a distribuição de energia axial pode ser aproximada por

$$q'_w(z) = q'_0 \frac{\cos(\pi z)}{L_0} \quad (4)$$

Na qual q'_0 é a taxa de calor linear no centro do núcleo e L_0 a altura do núcleo.

Utilizando a Eq 3, no estado estacionário, a temperatura T_r do refrigerante no núcleo do reator é dada por:

$$m_1 c_p \frac{\partial T_r}{\partial t} = q'_0 \cos\left(\frac{\pi z}{L_r}\right) \quad (5)$$

$$T_{r1}(z) = \frac{L_r N q'_0 + m_1 c_{p1} \pi T_{c1} + L_r N q'_0 \operatorname{sen}\left(\frac{\pi z}{L_r}\right)}{m_1 c_{p1} \pi} \quad -\frac{L_r}{2} < z < \frac{L_r}{2} \quad (6)$$

Sendo a temperatura média:

$$\overline{T_{r1}}(z) = \frac{1}{L_r} \int_{-L_r/2}^{L_r/2} T_{r1}(z) dz \quad (7)$$

Onde T_{c1} é a temperatura no downcomer do primário. As propriedades do refrigerante, Tab. 2, inicialmente são definidas utilizando as tabelas de Keenan et al.[6] de água a temperatura de 305°C.

Tabela 2: Propriedades do refrigerante, Keenan et al. [6].

Calor específico do refrigerante, c_{p1}	5600 J/Kg °C
Viscosidade, μ_1	0,000092 Kg/ms
Coeficiente de Expansão, β	0,00332 °C ⁻¹
Densidade, ρ_1	703,18 Kg/m ³

Considerando a tubulação adiabática, a temperatura T_m do sistema primário na região do trocador de calor consiste em:

$$m_1 c_{p1} \frac{\partial T_m}{\partial t} = -h\pi d_1 (T_m^{(s)} - T_2^{(s)}) \quad 0 < s < L_1 \quad (8)$$

E a temperatura da água no segundo circuito, T_g , é dada por

$$m_2 c_{p2} \frac{\partial T_{g1}}{\partial t} = h_1 \pi d_1 (T_m^{(s)} - T_{g1}^{(s)}) \quad 0 < s < L_1 \quad (9)$$

$$m_2 c_{p2} \frac{\partial T_{g2}}{\partial t} = -h_2 \pi d_2 (T_{g2}^{(s)} - T_p^{(s)}) \quad 0 < s < L_2 \quad (10)$$

Logo a temperatura da piscina de água, T_p , é definida como:

$$m_2 c_{p2} \frac{\partial T_p}{\partial t} = h_2 \pi d_2 (T_p^{(s)} - T_{ar}) \quad 0 < s < L_2 \quad (11)$$

Sendo πd o perímetro molhado e h o coeficiente equivalente de transferência de calor dos tubos dos trocadores de calor, calculado através da proposta de Botelho [2], que utiliza a correlação de filme de transferência de calor de Dittus-Boelter [7]. Para o presente trabalho é utilizado $\pi d_1 = 52m$ e $\pi d_2 = 53m$.

Para a obtenção no riser primário, T_{h1} é calculado $T_{r1}(\frac{L_r}{2})$ na saída do núcleo do reator

$$T_{h1} = \frac{2L_r N q_0 + c_{p1} \dot{m}_1 \pi T_{c1}}{c_{p1} \dot{m}_1 \pi} \quad (12)$$

O valor de T_{c1} é obtida através do temperatura de saída do primeiro trocador de calor no lado primário, ou seja $T_m(L_1)$

$$T_{c1} = \frac{c_{p2} \dot{m}_2 h_1 \pi d_1 [T_{c2} e^{\frac{L_1 h_1 \pi d_1}{c_{p1} \dot{m}_1}} + (T_{h1} - T_{c2}) e^{\frac{L_1 h_2 \pi d_2}{c_{p2} \dot{m}_2}}] - c_{p1} \dot{m}_1 h_2 \pi d_2 T_{h1} e^{\frac{L_1 h_2 \pi d_2}{c_{p2} \dot{m}_2}}}{c_{p2} \dot{m}_2 h_1 \pi d_1 e^{\frac{L_1 h_1 \pi d_1}{c_{p1} \dot{m}_1}} - c_{p1} \dot{m}_1 h_2 \pi d_2 e^{\frac{L_1 h_2 \pi d_2}{c_{p2} \dot{m}_2}}} \quad (13)$$

Onde T_{c2} é a temperatura do downcomer do secundário. A temperatura do riser do secundário, T_{h2} , é determinada pela temperatura de saída do primeiro trocador de calor no lado secundário, Equação 8 em $T_{g1}(0)$.

$$T_{h2} = \frac{c_{p2}\dot{m}_2 h_1 \pi d_1 T_{c2} + c_{p1}\dot{m}_1 h_2 \pi d_2 (T_{h1} - T_{c2} - T_{h1} e^{-\frac{L_1 h_2 \pi d_2}{c_{p2}\dot{m}_2} - \frac{L_1 h_1 \pi d_1}{c_{p1}\dot{m}_1}})}{c_{p2}\dot{m}_2 h_1 \pi d_1 - c_{p1}\dot{m}_1 h_2 \pi d_2 e^{-\frac{L_1 h_2 \pi d_2}{c_{p2}\dot{m}_2} - \frac{L_1 h_1 \pi d_1}{c_{p1}\dot{m}_1}}} \quad (14)$$

Similarmente, T_{c2} é determinada pela temperatura de saída do segundo trocador de calor no lado secundário,

$$T_{c2} = (T_{h2} - T_a + T_a e^{-\frac{L_2 h_2 \pi d_2}{c_{p2}\dot{m}_2}}) e^{-\frac{L_2 h_2 \pi d_2}{c_{p2}\dot{m}_2}} \quad (15)$$

As temperaturas T_{h1} , T_{c1} , T_{h2} e T_{c2} são obtidas pela solução simultânea do sistema de equações lineares 12 a 15. A temperatura do ar foi considerada como 30 °C, logo os parâmetros da água na piscina e no segundo circuito foram inicialmente obtidas para esse valor utilizando as tabelas de Keenan et al.[5], na qual $c_{p2} = 4176,3 \text{ J/kg}^\circ \text{C}$, $\mu_2 = 0.000807 \text{ Kg/ms}$ e $\rho_2 = 995.55 \text{ Kg/m}^3$.

A Eq. 2 é resolvida com auxílio das equações de temperatura. A diferença de pressão devida a diferença de altura e densidade nos circuitos é dada por:

$$\Delta p b_1 = \rho_1 g \beta (\overline{T_{r1}} L_r + T_{h1} \Delta z_1 - T_{c1} (L_r + \Delta z_1)) \quad (16)$$

$$\Delta p b_2 = \rho_1 g \beta (T_{h2} - T_{c2}) \Delta z_2 \quad (17)$$

Assim temos as equações de balanço:

$$\rho_1 g \beta (\overline{T_{r1}} L_r + T_{h1} \Delta z_1 - T_{c1} (L_r + \Delta z_1)) - f_r \frac{L_r \rho_1 u_r^2}{2 D h_r} - f_{ihx1} \frac{L_1 \rho_1 u_{ihx1}^2}{2 D h_{ihx1}} - f_{t1} \frac{L t_1 \rho_1 u_{t1}^2}{2 D h_{t1}} = 0 \quad (18)$$

$$\rho_1 g \beta (T_{h2} - T_{c2}) \Delta z_2 - f_{ihx2} \frac{L_1 \rho_1 u_{ihx2}^2}{2 D h_{ihx2}} - f_c \frac{L_2 \rho_1 u_c^2}{2 D h_c} - f_{t2} \frac{L t_2 \rho_1 u_{t2}^2}{2 D h_{t2}} = 0 \quad (19)$$

Onde u é a velocidade do escoamento da água, Dh o diâmetro hidráulico, os índices $r, ihx1, ihx2, t1, t2$ e c correspondem as propriedades no reator, no lado primário do primeiro trocador de calor, no lado secundário do primeiro trocador de calor, da tubulação do primeiro circuito, da tubulação do segundo circuito e do lado secundário do segundo trocador de calor. Para o cálculo de fator de atrito f a correlação de Colebrook [8] foi utilizada. As Eq. 18 e 19 formam duas equações não lineares para obtenção simultânea das vazões mássicas \dot{m}_1 e \dot{m}_2 em função da potência térmica do reator e da temperatura da água no tanque de resfriamento.

4. RESULTADOS

Os cálculos foram realizados com o auxílio do software comercial Mathematica. A Fig. 3 mostra o avanço da vazão mássica da água no primeiro e no segundo circuito. A vazão aumenta conforme a potência Q do reator aumenta.

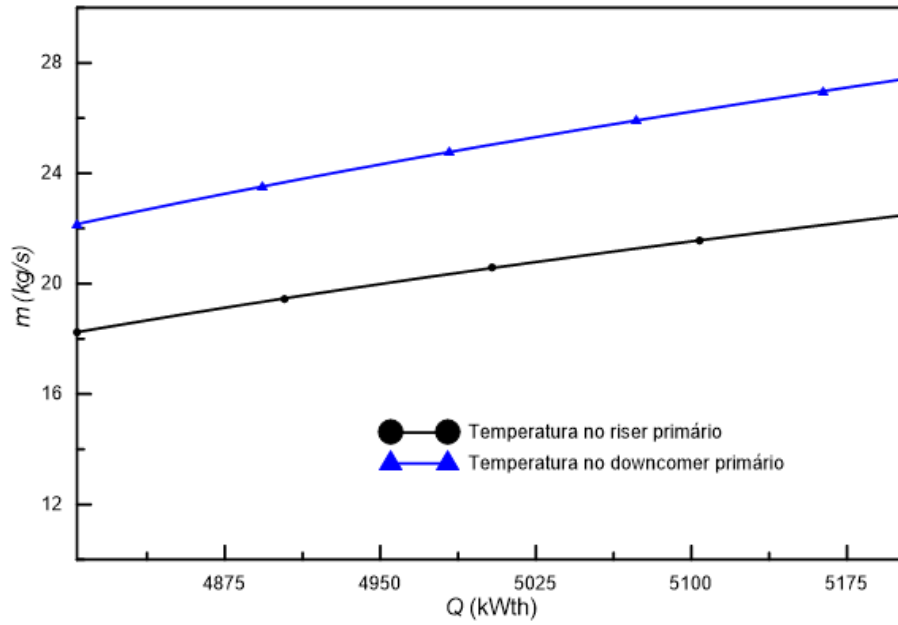


Figura 3: Vazão mássica em função da potência do reator.

A Fig. 4 apresenta a evolução das temperaturas com o aumento da potência do reator. A temperatura assim como a vazão aumenta com o aumento da potência do reator.

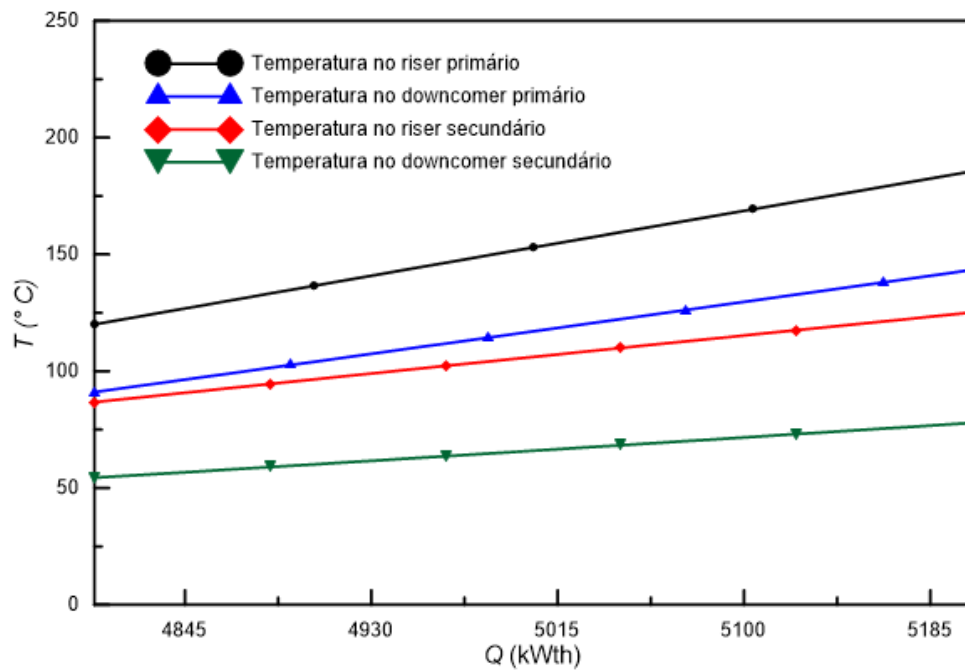


Figura 4 : Temperaturas em função da potência do reator.

5. CONCLUSÃO

O estudo da circulação natural em um sistema de remoção de calor residual de um reator PWR modular de pequeno porte apresentou resultados satisfatórios, apesar de alguns dados serem estimados. O cálculo mostrou ser possível que o sistema de remoção de calor apresentado mantenha o núcleo resfriado.

Assim sendo, essa metodologia poderá ser usada em futuros trabalhos, visto que a sua utilização é simples e rápida. Os estudos referentes à circulação natural continuarão a ser desenvolvidos buscando o cálculo de outros parâmetros de importância.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, FINEP e FAPERJ pelo suporte financeiro. Nathália N. Araújo agradece à CNEN pela bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

1. International Atomic Energy Agency, “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments”, *Advanced Reactors Information System (ARIS)*, IAEA_SMR_Booklet_2014, Vienna (2014).
2. D.V. Botelho, “Análise Simplificada de Sistemas Passivos de Remoção de Calor Residual de Reatores PWR de pequeno porte”, *Instituto de Engenharia Nuclear* (1992).
3. R. Termam, “*Navier-Stokes Equations - Theory and Numerical Analysis*”, AMS Chelsea Publishing (2001).
4. J. G. Silva, “Estudo de Confabilidade do Reator AP1000 no Cenário de um Grande LOCA no Contexto de uma APS Nível 1”, *PEN/COPPE/UFRJ* (2007).
5. H. Ninokatta, “Comparative Overview of Thermal Hydraulic Characteristics of Integrated Primary System Nuclear Reactors”, *Nuclear Engineering and Technology*, vol 38, nº 1 (2006)
6. X. Lv, M. Peng, X. Yuan, G. T. Xia, “Design and analysis of a new passive residual heat removal system”, *Nuclear Engineering and Design*, vol 303, pp 192–202 (2016).
7. H. W. Graves, *Nuclear Fuel Management*, John Wiley and Sons (1979).
8. C. Colebrook, “Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws” *Journal of the Institution of Civil Engineers* (1939).