



**Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Energia Nuclear**

**JOAO HENRIQUE LEMOS DOS SANTOS**

**ANÁLISE PARAMÉTRICA SIMPLIFICADA DAS  
CONDIÇÕES TERMOIDRÁULICAS EM UM CANAL DO  
REATOR NUCLEAR VHTGR**

**RECIFE**

**2017**

JOAO HENRIQUE LEMOS DOS SANTOS

**ANÁLISE PARAMÉTRICA SIMPLIFICADA DAS  
CONDIÇÕES TERMOIDRÁULICAS EM UM CANAL DO  
REATOR NUCLEAR VHTGR**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal  
de Pernambuco, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Energia.

Orientador: Professor Mário Augusto  
Bezerra da Silva

RECIFE

2017

S237a Santos, Joao Henrique Lemos dos.  
Análise paramétrica simplificada das condições termoidráulicas em um canal do reator nuclear VHTGR / Joao Henrique Lemos dos Santos. - 2017.  
20 folhas, il., tabs.

Orientador: Professor Mário Augusto Bezerra da Silva  
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Energia Nuclear, 2017.  
Inclui Referências e anexo.

1. Energia Nuclear. 2. Regime estacionário. 3. Análise paramétrica simplificada.  
4. Vazão mássica. 5. Limites de temperatura. 6. VHTGR. I. Silva, Mário Augusto Bezerra da (Orientador). II. Título.

UFPE

621.48 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-200

---

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Energia Nuclear



---

Curso de Graduação:  
Engenharia de Energia

Disciplina:  
EN248 Projeto de Graduação (TCC)

Responsável pela Disciplina:  
Prof. Alexandre Costa

Período:  
2016.2

Local e Data:  
Recife, 04 de Janeiro de 2017

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

---

**TÍTULO: Análise paramétrica simplificada das condições termoidráulicas em um canal do reator nuclear VHTGR**

---

**Aluno: JOAO HENRIQUE LEMOS DOS SANTOS; Matrícula: 076.268.594-80**

---

**Orientador: MÁRIO AUGUSTO BEZERRA DA SILVA (DEN, CTG, UFPE)**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por toda bênção, proteção e iluminação que recebi durante toda minha caminhada;

À minha esposa, Aline Maciel, e ao meu filho, Vinícius, por todo amor, carinho e companheirismo;

Aos meus pais (Gerivaldo e Vânia) e irmãos (Bruno, Renato e Erika) pela paciência e compreensão;

Ao meu orientador, Mário Bezerra, pelo comprometimento e dedicação em me ajudar durante todo esse percurso.

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo avaliar a transferência de calor no interior de um canal em um reator nuclear, em regime estacionário, através de uma análise paramétrica simplificada da vazão mássica do fluido refrigerante, da taxa de calor gerado e do coeficiente de transferência de calor por convecção. À medida que o núcleo de um reator deixa de ser adequadamente resfriado devido à diminuição da vazão mássica do fluido refrigerante, o sistema começa a funcionar fora dos limites de temperatura para o qual foi projetado. Com a perda da capacidade de trocar calor devido à menor quantidade de massa por unidade de tempo do gás refrigerante, o reator começa a operar fora dos limites de segurança, uma vez que haverá maior concentração de calor gerado no interior do núcleo desse reator. De modo mais concreto, a temperatura do fluido será avaliada ao longo do canal para três valores distintos de vazão mássica e três valores distintos de taxa de geração de calor volumétrica a partir dos respectivos valores de referência. Já a temperatura da parede do canal será avaliada para três valores diferentes do coeficiente de transferência de calor por convecção. De modo a validar os valores escolhidos para os coeficientes de transferência de calor por convecção calcula-se, através do número de Nusselt, Prandtl e Reynolds, um valor para esse parâmetro de acordo com o sistema analisado neste trabalho. Esses parâmetros foram analisados em um Reator Refrigerado a Gás de Muito Alta Temperatura (VHTGR), simulando um possível acidente nuclear quando a vazão mássica do fluido refrigerante (no caso desse trabalho, gás hélio) diminui, respectivamente, de 10%, 20% e 30% do valor nominal, e a geração de calor no centro do canal de um reator nuclear, abastecido com urânio natural, aumenta, respectivamente, em 10%, 20% e 30%. Os resultados obtidos mostram o porquê este trabalho fez uma análise sobre a vazão mássica do fluido refrigerante, o calor gerado no interior do canal e o coeficiente de transferência de calor por convecção. Pois, se houver algum entupimento na tubulação ou vazamento do fluido refrigerante esses parâmetros serão fortemente alterados e, conseqüentemente, a temperatura do sistema será elevada. O aumento dessa temperatura poderá provocar um acidente nuclear caso os materiais usados na construção do reator nuclear não suportarem determinadas temperaturas atingida pelo sistema devido às falhas mencionadas acima.

Palavras chaves: Regime estacionário. Análise paramétrica simplificada. Vazão mássica. Limites de temperatura. VHTGR.

## LISTA DE FIGURAS

1. Very High Temperature Gas-cooled Reactor, VHTGR.....	11
2. Canal de um reator nuclear.....	14
3. Temperatura do fluido em função da posição axial no canal para diferentes valores de vazão mássica.....	19
4. Temperatura do fluido versus comprimento do canal para cada calor gerado.....	20
5. Temperatura externa da parede do canal versus altura do canal para diferentes valores de h.....	20

## LISTA DE TABELAS

1. Temperatura final do fluido em função da vazão mássica..... 18
2. Temperatura final do fluido para cada calor gerado no interior do canal..... 19
3. Temperatura máxima para cada valor de  $h$ ..... 21

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Letras Latinas</b>		<b>Unidade</b>
$h$	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$\frac{w}{m^2 \cdot k}$
$A$	Área em que o calor é transferido	$m^2$
$\Delta T$	Diferença de temperatura entre combustível e o refrigerante	K
$U$	Coeficiente de transferência global	$\frac{w}{m^2 \cdot k}$
$\phi_y$	Fluxo de nêutrons em um ponto qualquer	(nêutrons/cm <sup>2</sup> .s)
$\phi_c$	Fluxo de nêutrons no centro do elemento combustível	(nêutrons/cm <sup>2</sup> .s)
$q_y'''$	Taxa de geração térmica volumétrica	$w/m^3$
$q_c'''$	Taxa de geração térmica volumétrica no centro do elemento combustível	$w/m^3$
$\dot{m}$	Vazão mássica do refrigerante	kg/s
$c_p$	Calor específico, a pressão constante, do fluido	$\left(\frac{J}{Kg \cdot K}\right)$
$y$	Valor genérico atribuído a uma cota no canal	m
$d_{Tf}$	Aumento da temperatura do fluido entre “ y ” e “ y+dy ”	K
$A_c$	Seção transversal de um elemento combustível	$m^2$
$T_i$	Temperatura do refrigerante no início do canal	K
$T_f$	Temperatura do refrigerante no final do canal	K
$H$	comprimento do canal	m
$T_R$	Temperatura externa da parede do canal	K
$C$	Perímetro circunferencial do canal	m

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>CONCEITOS PRELIMINARES</b> .....	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO NÚCLEO</b> .....	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>14</b>
4.1	Análise da temperatura do fluido.....	15
4.2	Análise da temperatura da parede do canal de um reator nuclear.....	16
4.3	Validação dos valores escolhidos para os coeficientes de transferência de calor por convecção.....	17
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>18</b>
5.1	Avaliação da temperatura do fluido.....	18
5.2	Avaliação da temperatura externa axial do canal de um reator nuclear.....	20
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>21</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>22</b>
	<b>ANEXO</b> .....	<b>23</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A intensa exploração de recursos energéticos limitados, chamados combustíveis fósseis, levou os estudiosos a procurarem formas de energia oriundas de fontes naturais com capacidade de regeneração muito maior que o nosso consumo. Ou seja, existe uma necessidade de reduzir a dependência em relação ao petróleo, ao carvão mineral e ao gás natural, uma vez que esses combustíveis fósseis produzem altas taxas de emissões de gases, como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $NO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), dentre outras substâncias, que são agravantes do efeito estufa. Além disso, estão cada vez mais difíceis de serem encontrados, pois a taxa de reposição com que a natureza fornece ao ser humano é bem inferior à taxa de consumo atual.

Há várias formas de gerar energia acarretando mínimos impactos ambientais. Dentre essas, pode-se citar a energia nuclear, que durante todo o ciclo de geração, em um reator, não emite gases poluentes. Logo, sua utilização não agrava o efeito estufa nem a chuva ácida, e o combustível que alimenta as usinas nucleares, geralmente o urânio, é uma fonte abundante, com alta concentração de energia, facilmente transportável e tem um custo baixo comparado com outras fontes. Portanto, diversificar a matriz energética com o aumento da participação de fontes limpa é fundamental.

Nesse contexto, o presente trabalho de conclusão de curso tem o objetivo de abordar um tipo de reator nuclear, o Reator Refrigerado a Gás de Muito Alta Temperatura (VHTGR, acrônimo do inglês *Very High Temperature Gas Cooled Reactor*). Esse reator pertence a uma nova geração de reatores nucleares conhecida como Geração IV, que buscam desenvolver meios mais seguros e sustentáveis de gerar energia em grande escala. Para que essa energia seja utilizada em larga escala, o Fórum Internacional da IV Geração - cooperação de 10 países para desenvolver a Geração IV de reatores nucleares – selecionou seis modelos de reatores que operem de uma maneira especial em termos de sustentabilidade, economia e segurança.

Assim, avaliar-se-ão alguns parâmetros de escoamento em um canal do VHTGR. Esses parâmetros têm uma relação muito importante com a temperatura do núcleo de um reator nuclear (BEJAN, 1995). Em seguida, será feita uma análise simplificada da transferência de calor nesse canal, avaliando a temperatura em alguns locais cruciais para o bom funcionamento do sistema, como as temperaturas da parede externa do canal e do fluido refrigerante. Dessa forma, conclui-se que o desenvolvimento de um projeto de reator nuclear envolve muitos parâmetros conflitantes entre si, cabendo aos projetistas da área a função de ponderá-los para obter o mais eficiente sistema possível.

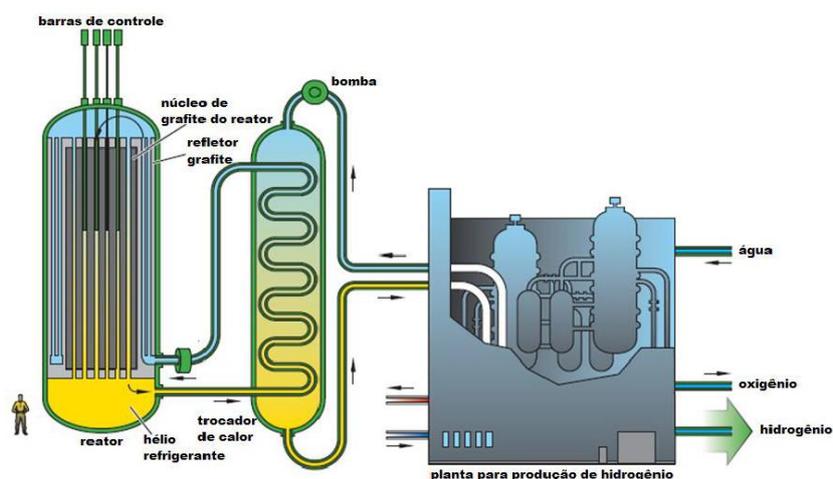
## 2 CONCEITOS PRELIMINARES

O princípio básico de funcionamento dos reatores nucleares é a fissão do núcleo de certos isótopos, como o urânio, através de nêutrons com energias estabelecidas, gerando, em cada fissão, uma grande quantidade de energia, nêutrons com altas energias e produtos de fissão radioativos. Com a fissão de vários núcleos e, conseqüentemente, a emissão de nêutrons, é iniciada uma reação em cadeia, que, quando de forma controlada, pode ser utilizada para diversos fins. Dentre esses, pode-se gerar: potência, materiais transurânicos e nêutrons para ativação de materiais. Os reatores nucleares podem ser classificados de acordo com a energia dos nêutrons utilizados na fissão, quanto ao objetivo de funcionamento e quanto ao tipo de combustível, refrigerante e moderador utilizado.

O VHTGR usa o urânio natural ou levemente enriquecido como combustível, gás hélio (He) como refrigerante e que não reage quimicamente com o elemento combustível, tem seção de choque de absorção pequena, alta condutividade térmica e um calor específico maior do que o da água, causando uma maior resistência a mudanças de temperatura para refrigerar o sistema, e utiliza o grafite como moderador dos nêutrons rápidos.

A operação de reatores que trabalham a altas temperaturas, como o VHTGR, resume-se no deslocamento de um gás de arrefecimento pelo núcleo - conjunto de todos os materiais, componentes e estruturas onde é gerada a reação em cadeia da fissão nuclear dentro do reator, recebendo calor do canal nuclear. Após receber a energia térmica proveniente desse canal, o gás segue por um trocador de calor e será usado como fonte de calor para um segundo fluido a ser direcionado a uma turbina a gás de alta temperatura, onde haverá geração de eletricidade ou produção de hidrogênio, conforme mostrado na Figura 1.

**Figura 1 – Very High Temperature Gas-cooled Reactor, VHTGR (ROCHA, 2016)**



De acordo com o conceito de sustentabilidade, o VHTGR deve gerar energia elétrica de forma durável, sem poluir o meio ambiente, a partir do uso otimizado dos combustíveis nucleares disponíveis, com o cuidado em gerir e minimizar os rejeitos nucleares. A elevada temperatura de funcionamento desses reatores proporciona a geração de hidrogênio, que, ao se associar com o oxigênio presente no ar, promove a formação de água com liberação de energia, podendo ser utilizada pela população. Outra característica proporcionada pela alta temperatura é o estudo da reciclagem dos rejeitos nucleares de forma a poder reinseri-los no reator como combustível.

### 3 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO NÚCLEO

Para os materiais que irão compor a estrutura de um reator nuclear, algumas propriedades são imprescindíveis como, por exemplo, alta resistência mecânica, alta ductilidade, alta estabilidade térmica, bons parâmetros de transferência de calor e alta resistência à corrosão (CHARLES, 1997). Já o refrigerante tem a função de remover o calor gerado no reator e, para tal, precisa ter ótima eficiência térmica, baixo ponto de fusão, alto ponto de ebulição, baixa ação corrosiva, dentre outras características.

Sob diversas formas de compostos, os combustíveis nucleares são formados por elementos físeis (materiais capazes de manter uma reação de fissão em cadeia) e férteis (materiais que podem ser transformados em um material físsil) como urânio (U) e plutônio (Pu), com as seguintes características: resistência à fadiga, facilidade de fabricação, longo tempo de operação no reator, alta queima e baixo custo. É indispensável para a eficiência do sistema como um todo a compatibilidade entre o combustível escolhido e o refrigerante, bem como entre o moderador e o material que compõe o canal.

A segurança de qualquer reator nuclear está relacionada com os limites térmicos do sistema, que podem influenciar na quantidade de energia gerada nesse reator. Logo, o núcleo de um reator deve ser operado a um nível de potência de maneira que ocorra a melhor eficiência possível de transferência de calor para que as temperaturas do combustível e do canal, ao longo do núcleo, não ultrapassem os limites de segurança. Para um reator refrigerado a gás, problemas como esses citados acima, podem ocorrer para valores baixos do coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$  (INCROPERA, 2008).

A intensidade na qual o calor é removido do núcleo de um reator nuclear é diretamente proporcional à área em que esse calor é transferido,  $A$ , e à diferença de temperatura entre o combustível e o refrigerante,  $\Delta T$  (EL-WAKIL, 1971). A intensidade da energia térmica gerada no núcleo de um reator pode ser obtida por meio do coeficiente global de transferência de calor,  $U$ , que é uma combinação entre a transferência de calor por condução através da estrutura física do núcleo e a transferência de calor por convecção da superfície da parede do canal para o fluido refrigerante. Assim, quanto maiores os valores de  $A$ ,  $\Delta T$  e  $U$ , maior será a capacidade desse reator transferir calor num certo intervalo de tempo, conforme mostrado na Equação (1).

$$Q = UA\Delta T \quad (1)$$

A parede do canal deve apresentar uma resistência mínima à condução de calor (elevada condutividade térmica), baixa seção de choque de absorção de nêutrons, alta resistência à corrosão, alta estabilidade térmica, alta resistência mecânica e alta estabilidade à irradiação. Há muitos materiais que apresentam certas características de interesse, mas falham em outras, gerando-se conflito no momento da escolha do material adequado. Por exemplo, o cobre tem alta condutividade térmica, mas apresenta alta seção de choque de absorção de nêutrons. Portanto, convém substituir esse material por ligas de zircônio, alumínio, magnésio e berílio. Com o mesmo objetivo de aumentar a transferência de calor, a espessura da parede do canal será reduzida ao mínimo, dentro dos limites, para diminuir a resistência à condução.

O coeficiente transferência de calor por convecção depende de parâmetros fluidodinâmicos e geométricos (BEJAN, 1995). Assim, foi constatado que, para valores elevados da velocidade do fluido refrigerante, o coeficiente convectivo de transferência de calor,  $h$ , também aumenta, melhorando a eficiência da troca de calor do sistema.

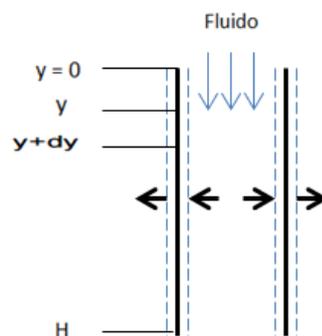
Em geral, os gases possuem pequenos valores de coeficiente de transferência de calor por convecção. Logo, os reatores que usam gases para refrigerar o sistema, como o VHTGR, têm uma estrutura física maior e, assim, conseguem compensar o baixo coeficiente convectivo de transferência de calor, uma vez que existe um maior número de elementos combustíveis, tendo, como consequência, uma maior área para a troca de calor.

Para maximizar a transferência de calor, a temperatura do fluido refrigerante pode ser reduzida para que a diferença de temperatura entre o combustível e o refrigerante aumente. Entretanto, há um conflito com as leis da termodinâmica, uma vez que uma boa eficiência térmica depende de temperaturas elevadas do fluido refrigerante. Assim, para deixar a temperatura do fluido a mais alta possível e ainda conseguir uma boa troca de calor, o elemento combustível precisa trabalhar a temperaturas elevadas (EL-WAKIL, 1971).

## 4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho está baseada em relações simplificadas de balanço de energia, que obtêm as temperaturas do fluido de refrigeração e da parede externa do canal. A figura 2 a seguir ilustra o volume de controle em um canal do reator nuclear, a entrada do refrigerante pela parte superior do canal, sendo este aquecido ao entrar em contato físico com o canal, e a transferência do calor gerado do interior para fora do canal através do volume de controle. A seguir, serão deduzidas as equações que expressam a temperatura do refrigerante e da parede externa do canal em função da posição.

**Figura 2 – Canal de um reator nuclear**



(Próprio autor, 2016).

Abordando um canal do reator, a variação axial do fluxo de nêutrons ao longo deste é governada conforme a equação (2):

$$\phi_y = \phi_c * \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) \quad (2)$$

Em que  $\phi_y$  e  $\phi_c$  são os fluxos de nêutrons em um ponto qualquer e no centro do elemento combustível, respectivamente.  $H$  e  $y$  representam o comprimento do canal e uma posição axial no interior do canal, respectivamente.

Para prosseguir com a análise, deve-se verificar se os fluxos neutrônicos na entrada e saída são nulos. Logo, substituindo-se os valores "0" e "H" na equação (2), encontra-se:

$$y = 0 \rightarrow \phi(0) = 0$$

$$y = H \rightarrow \phi(H) = 0$$

#### 4.1 Análise da temperatura do fluido

Uma vez que cada elemento combustível apresenta as mesmas dimensões e o mesmo tipo de combustível, conclui-se que a taxa volumétrica de calor gerado será proporcional ao fluxo de nêutrons, de acordo com a equação (3) abaixo:

$$q_y''' = q_c''' \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) \quad (3)$$

Em que  $q_y'''$  e  $q_c'''$  são as taxas de geração volumétrica de energia em qualquer ponto ao longo do canal e no centro do elemento combustível, respectivamente.

Fazendo-se um balanço de energia, conclui-se que a energia gerada em um elemento de volume deve ser igual à que é transmitida ao fluido, de acordo com a expressão a seguir:

$$\dot{m}c_p d_{Tf} = q''' A_c dy \quad (4)$$

Em que:  $\dot{m}$  = vazão mássica do refrigerante (kg/s);

$c_p$  = calor específico, a pressão constante, do fluido  $\left(\frac{J}{Kg.K}\right)$ ;

$d_{Tf}$  = aumento da temperatura do fluido, entre “y” e “y+dy”, (K);

$A_c = \pi r^2$  = seção transversal de um elemento combustível ( $m^2$ ).

Combinando-se as equações (3), (4) e integrando-se o termo diferencial de cada lado da equação, encontra-se a seguinte expressão:

$$\dot{m}c_p \int_{T_i}^{T_f} dTf = q_c''' A_c \int_0^y \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) dy \quad (5)$$

Em que  $T_i$  e  $T_f$  são as temperaturas do refrigerante, no início e em uma posição “y” do canal, respectivamente.

Resolvendo-se a integração, obtém-se:

$$T_f(y) = T_{f_i} + \frac{q_c''' A_c H}{\dot{m}c_p \pi} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right)\right] \quad (6)$$

A equação (6) fornece a temperatura do fluido refrigerante em função de um ponto qualquer ao longo do canal. Assim, a temperatura final do fluido pode ser obtida para “y=H”. Logo, a equação (6) ficará representada conforme a equação (7):

$$T_f(y = H) = T_{f_i} + \frac{2q_c''' A_c H}{\dot{m}c_p \pi} \quad (7)$$

#### 4.2 Análise da temperatura da parede do canal de um reator nuclear

Nesse tópico, será feita uma análise da temperatura na superfície externa da parede do canal do reator nuclear,  $T_R$ . A troca de calor entre a parede do canal e o refrigerante, em qualquer ponto ao longo do canal, por unidade de área, é dada conforme a equação (8):

$$q = h(T_R - T_f) \quad (8)$$

Em que:  $q$  = taxa de transferência de calor por unidade de área ( $W/m^2$ );

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\frac{W}{m^2K}$ );

$(T_R - T_f)$  = diferença entre as temperaturas externa da parede do canal e do fluido (K).

Considerando o coeficiente de transferência de calor por convecção constante, a diferença de temperatura entre a parede do canal e o fluido,  $(T_R - T_f)$ , será diretamente proporcional à taxa de geração volumétrica de calor,  $q'''$ . Já foi visto nesse trabalho que a taxa de transferência de calor varia em função da posição axial no canal do núcleo através de uma função seno. Logo, a diferença de temperatura,  $(T_R - T_f)$ , também apresentará a mesma variação, de acordo com a equação (9):

$$T_R - T_f = (T_R - T_f)_c \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) \quad (9)$$

Igualando-se o calor gerado num elemento diferencial com o calor que é transmitido por convecção, obtém-se:

$$q_c''' A_c dy = hC dy (T_R - T_f)_c \quad (10)$$

Da equação 10, obtém-se:

$$(T_R - T_f)_c = q_c''' A_c / hC \quad (11)$$

Em que:  $C$  = perímetro circunferencial do canal (m);

$(T_R - T_f)_c$  = diferença de temperatura absoluta (K) entre a superfície externa da parede do canal e do fluido no ponto central do comprimento do canal.

As equações (8), (9) e (10) foram manipuladas para se obter uma expressão que avalie a temperatura axial externa da parede do canal, ou seja, variando em função da posição axial no canal, de maneira que a expressão encontrada está representada pela equação (12):

$$T_R = T_{fi} + q_c''' A_c \left[ \frac{H}{(\dot{m} c_p \pi)} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi y}{H}\right) \right] + (1/(hC)) \sin(\pi y/H) \right] \quad (12)$$

#### 4.3 Validação dos valores escolhidos para os coeficientes de transferência de calor por convecção

Será calculado um valor para o coeficiente de transferência de calor por convecção em função do número de Nusselt, Prandtl e Reynolds com o objetivo de validar os valores utilizados neste trabalho, de acordo com a expressão seguinte. O número de Nusselt representa o aumento da transferência de calor através da camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução. O número de Prandtl é a relação entre a difusidade molecular de quantidade de movimento e a difusidade molecular térmica. E o número de Reynolds é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas do fluido.

$$Nu = \frac{h \times L_c}{K} = 0.332 \times P_r^{\left(\frac{1}{3}\right)} \times R_e^{\left(\frac{1}{2}\right)} \quad (13)$$

Em que:  $Nu$  = Número de Nusselt (adimensional);

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção  $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ ;

$L_c$  = comprimento característico do canal = 5.22 (m);

$K$  = condutividade térmica do gás hélio = 0.378  $\left(\frac{W}{m \times K}\right)$ ;

$P_r$  = Número de Prandtl = 0.654 (adimensional);

$R_e$  = Número de Reynolds =  $5 \times 10^9$  (adimensional).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Avaliação da temperatura do fluido

Diante da importância das condições térmicas de um reator VHTGR, foram definidas as temperaturas de entrada e de saída do fluido refrigerante (ROCHA, 2016). Para a temperatura inicial ou de entrada, o gás refrigerante tem 668,15 K. A temperatura final ou de saída do gás hélio tem um valor previamente conhecido, mas através de uma expressão que envolve a temperatura inicial, a taxa de geração volumétrica de calor, a área de seção transversal, o comprimento total do canal, a vazão mássica e o calor específico do refrigerante, essa temperatura será calculada com o objetivo de se compararem os valores escolhidos para alguns parâmetros. Primeiramente, encontra-se um valor constante para a taxa de geração volumétrica de calor no centro do canal, por meio da equação (14), obtendo-se um valor igual a  $1,5663 \times 10^8 W/m^3$ .

$$q_c''' = (\dot{m}c_p\Delta T\pi)/(2A_cH) \quad (14)$$

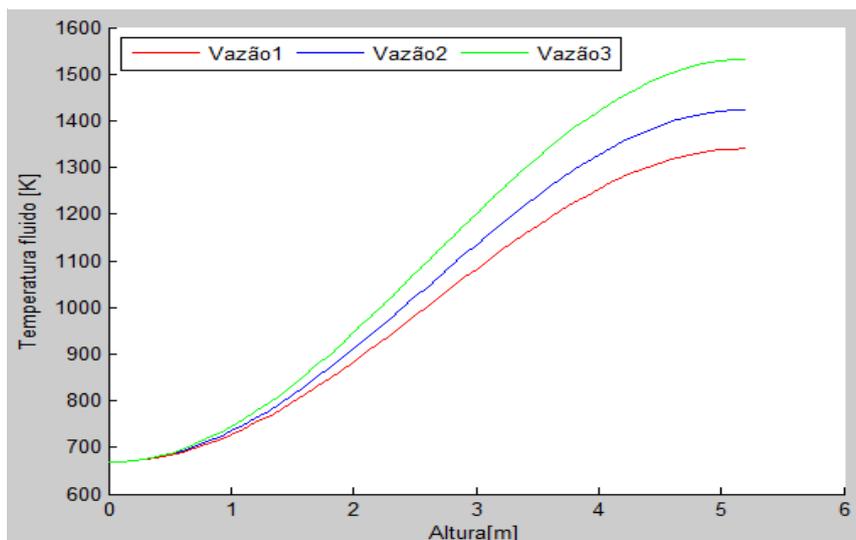
Com o objetivo de simular um possível superaquecimento acima daquele que está dentro da faixa de segurança, que afeta a integridade do reator nuclear, foram atribuídos valores de vazão mássica abaixo do valor referencial (ROCHA, 2016), para esse trabalho. Quando acontece, por exemplo, um bloqueio no canal devido a alguma peça que está obstruindo a passagem do fluido ou quando ocorre algum vazamento no núcleo, há um aumento na temperatura do fluido refrigerante, gás hélio. A tabela 1 apresenta os valores atribuídos à vazão mássica, que resultará na variação da temperatura final do fluido.

**Tabela 1 - Temperatura final do fluido em função da vazão mássica**

Vazão mássica (kg/s)	Temperatura final do fluido (K)
valor de referência: 0,013	1.273,2
vazão 1: 0,0117	1.340,4
vazão 2: 0,0104	1.424,4
vazão 3: 0,0091	1.532,4

O primeiro valor apresentado na tabela (1) é a vazão de referência para o presente trabalho, que corresponde a uma temperatura, também, já definida no início deste tópico. Para fazer uma análise mais exata do comportamento da temperatura do fluido em função da vazão mássica, fez-se uso do MATLAB, uma linguagem de programação, cujos resultados são mostrados na figura (3) a seguir.

**Figura 3 – Temperatura do fluido em função da posição axial no canal para**



A figura 3 mostra o comportamento da curva para três valores diferentes de vazão mássica e o quanto a temperatura do fluido é sensível a essa variação. Diminuir a vazão mássica em 10, 20 e 30%, a partir do valor de referência, provocou um incremento na temperatura, de acordo com a tabela 1, fora dos limites de segurança.

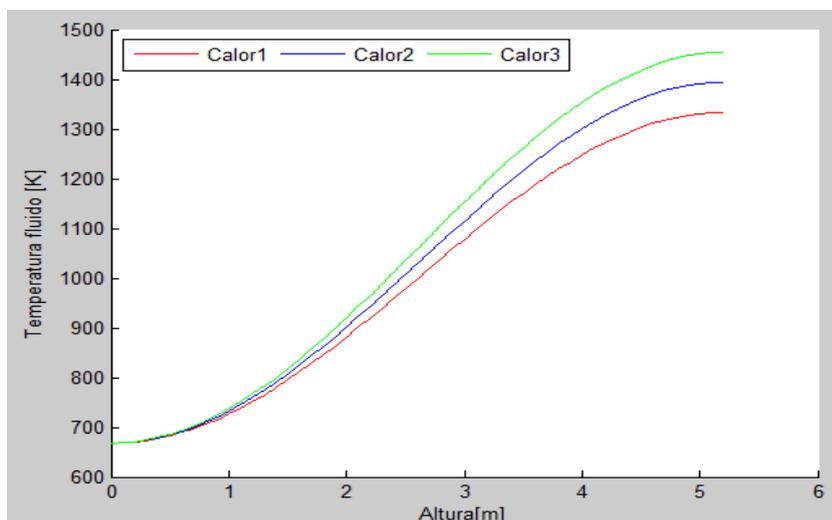
Quando ocorre algum problema de aumento de reatividade no sistema (aumento nas taxas de fissões) sem que haja uma refrigeração adequada, provoca-se um aumento na temperatura dentro do canal e, conseqüentemente, no refrigerante. Assim, atribuíram-se alguns valores para o calor gerado no centro do canal a partir do valor de referência, calculado no início desse tópico, com o objetivo de analisar a temperatura final do fluido. Segundo a tabela 2, cada valor de calor gerado corresponde a uma determinada temperatura final do fluido.

**Tabela 2 – Temperatura final do fluido para cada calor gerado no interior do canal**

Calor gerado no centro do canal ( $W/m^3$ )	Temperatura final do fluido (K)
valor de referência: $1,5663 \times 10^8$	1.273,2
calor 1: $1,7229 \times 10^8$	1.333,7
calor 2: $1,8795 \times 10^8$	1.394,2
calor 3: $2,0361 \times 10^8$	1.454,7

O comportamento da temperatura do fluido de acordo com o calor gerado no centro do canal será exibido semelhantemente ao caso anterior, conforme a figura 4. Para essa figura e para a tabela 2, provocaram-se aumentos no calor gerado em 10, 20 e 30%, respectivamente.

**Figura 4 – Temperatura do fluido versus comprimento do canal para cada calor gerado**



## 5.2 Avaliação da temperatura externa axial do canal de um reator nuclear

Para avaliar a temperatura externa ao longo do canal, foi feita uma variação do coeficiente de transferência de calor por convecção. Atribuíram-se três valores distintos para os coeficientes convectivos, dentre valores aceitáveis para convecção forçada, com o objetivo de avaliar o comportamento da temperatura externa da parede do núcleo do reator, através da equação (12) mencionada nesse trabalho, conforme apresentado na figura 5. Os valores dos coeficientes de convecção e as temperaturas máximas encontrada nos gráficos estão apresentados na tabela 3.

**Figura 5 – Temperatura externa da parede do canal versus altura do canal para diferentes valores de h**

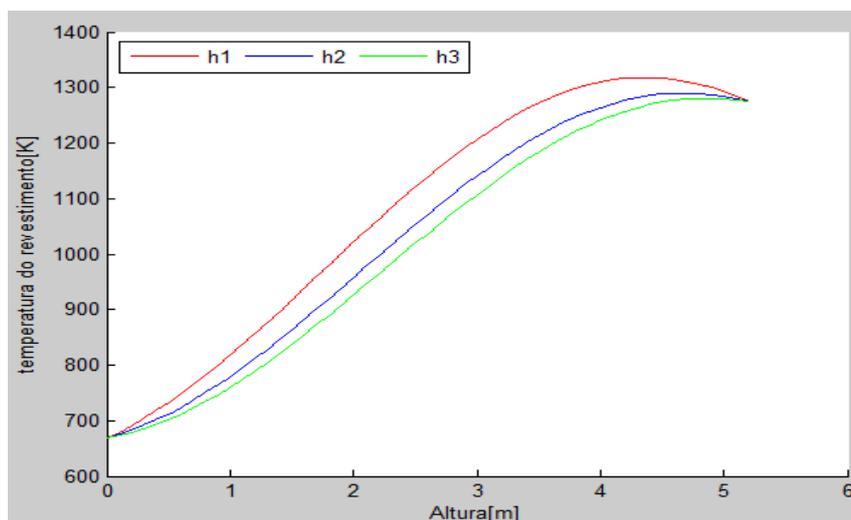


Tabela 3 – Temperatura máxima para cada valor de h

Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\frac{W}{m^2K}$ )	Temperatura máxima (K) (Tmax)
600	1300<Tmax<1400
1000	1250<Tmax<1300
1500	1200<Tmax<1250

Os valores dos coeficientes de transferência de calor por convecção estão dentro da faixa que é definida para os gases numa convecção forçada (ÇENGEL, 2012) e em concordância com o valor, igual  $1382 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$ , obtido pela expressão (13).

## 6 CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma análise paramétrica do comportamento da temperatura do fluido refrigerante, ao escoar em um canal de um reator nuclear, e da temperatura do canal desse mesmo reator, em um Reator Refrigerado a Gás de Muito Alta Temperatura (VHTGR). Para atingir esse objetivo, foi realizado um estudo sobre alguns parâmetros que fazem parte do sistema como, por exemplo, a vazão mássica, a taxa de calor volumétrica e o coeficiente de transferência de calor por convecção. Os resultados obtidos mostram a importância do controle sobre a temperatura de um reator nuclear. Na primeira análise, percebeu-se que uma redução na vazão mássica do refrigerante provoca um aquecimento excessivo na temperatura de saída deste. Verificou-se também que, qualquer aumento na taxa de geração volumétrica, sem a devida refrigeração, causa uma excessiva temperatura de saída do refrigerante; a temperatura externa do canal é, também, fortemente dependente do coeficiente de transferência de calor por convecção. Com o auxílio dos engenheiros de materiais pode-se estimar os danos que podem ser causados a depender dos materiais que compõe a estrutura física do reator nuclear.

## REFERÊNCIAS

BEJAN, Adrian. et al. **Convection heat transfer**. 2 ed. New York: John Wiley e Sons, 1995.

CHARLES, J. A.; CRANE, F. A. A.; FURNESS, J. A. G. **Selection and Use of Engineering Materials**. Oxford: ButterworthHeinemann, 1997.

EL-WAKIL, Mohamed Mohamed. **Nuclear heat transport**. New York: International Textbook, 1971.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7 ed. Jefferson City: John Wiley e Sons, 2008.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa**. 4 ed. São Paulo: Ltda, 2012.

ROCHA, J. S. **Técnicas Numéricas para a aplicação em projetos termofluidodinâmicos de reatores VHTGR**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Tese de Doutorado, DEN-UFPE, Recife-PE, 2016.

## ANEXO

### Programa desenvolvido para análises termofluidodinâmicas

```

closeall, clc , clearall

%Dados do problema

Cp=5195; % J/Kg*K
Tfi=668.15; % K
mp=0.013; % Kg/s
Ac=0.0000785; % m^2;Ac=pi*r^2
Tff=1273.15; % K
DT=(Tff-Tfi); % K
H=5.22; % m
y=2; % m
yv=0:0.1:H;
h1=600; % W/(m^2*K)
h2=1000; % W/(m^2*K)
h3=1500; % W/(m^2*K)
R=0.013; % m
c=0.12; % m, c=2*pi*(R+cr);

% mp reduzindo em 5,10,15,20,25 e 30 (%)

mp1=mp-(0.05*mp);
mp2=mp-(0.1*mp);
mp3=mp-(0.15*mp);
mp4=mp-(0.2*mp);
mp5=mp-(0.25*mp);
mp6=mp-(0.3*mp);

%q0 aumentando na msm proporção de mp

q0=(DT*mp*Cp*pi)/(2*Ac*H);

q1=q0+(0.05*q0);
q2=q0+(0.1*q0);
q3=q0+(0.15*q0);
q4=q0+(0.2*q0);
q5=q0+(0.25*q0);
q6=q0+(0.3*q0);

% temperatura do fluido em função de y para mp2,mp4 e mp6
Tm2=Tfi+((q0*Ac)/(mp2*Cp))*(H/pi)*(1-cos((pi*yv)/H));
Tm4=Tfi+((q0*Ac)/(mp4*Cp))*(H/pi)*(1-cos((pi*yv)/H));
Tm6=Tfi+((q0*Ac)/(mp6*Cp))*(H/pi)*(1-cos((pi*yv)/H));

% temperatura final que o fluido terá para os valores de mp
Tf= Tfi+((2*q0*Ac*H)/(mp*Cp*pi));
% para mp2 mp4 mp6
Tf2= Tfi+((2*q0*Ac*H)/(mp2*Cp*pi));
Tf4= Tfi+((2*q0*Ac*H)/(mp4*Cp*pi));
Tf6= Tfi+((2*q0*Ac*H)/(mp6*Cp*pi));

% temp final para cada valor q'''

```

```

Tfq2= Tfi+((2*q2*Ac*H)/(mp*Cp*pi));
Tfq4= Tfi+((2*q4*Ac*H)/(mp*Cp*pi));
Tfq6= Tfi+((2*q6*Ac*H)/(mp*Cp*pi));

% temp do fluido em função de y para os q''
Tq2=Tfi+((q2*Ac)/(mp*Cp))* (H/pi) * (1-cos((pi*yv)/H));
Tq4=Tfi+((q4*Ac)/(mp*Cp))* (H/pi) * (1-cos((pi*yv)/H));
Tq6=Tfi+((q6*Ac)/(mp*Cp))* (H/pi) * (1-cos((pi*yv)/H));

% Avaliação da temperatura axial da parede do canal em função de h

TR1=Tfi + q0*Ac*((H/(mp*Cp*pi))*(1-cos((pi*yv)/H))+
(1/(h1*c))*sin((pi*yv)/H));
TR2=Tfi + q0*Ac*((H/(mp*Cp*pi))*(1-cos((pi*yv)/H))+
(1/(h2*c))*sin((pi*yv)/H));
TR3=Tfi + q0*Ac*((H/(mp*Cp*pi))*(1-cos((pi*yv)/H))+
(1/(h3*c))*sin((pi*yv)/H));
holdon
plot(Tm2,'color','red');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'Temperatura fluido [K]'});

plot(Tm4,'color','blue');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'Temperatura fluido [K]'});

plot(Tm6,'color','green');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'Temperatura fluido [K]'});
figure,holdon

plot(Tq2,'color','red');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'Temperatura fluido [K]'});

plot(Tq4,'color','blue');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'Temperatura fluido [K]'});

plot(Tq6,'color','green');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'Temperatura fluido [K]'});
figure, hold on

plot(TR1,'color','red')
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'temperatura da parede do canal[K]'});

plot(TR2,'color','blue');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'temperatura da parede do canal[K]'});

plot(TR3,'color','green');
xlabel({'Altura[m]'});
ylabel({'temperatura da parede do canal[K]'});

```