



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
INSTITUTO DE QUÍMICA (IQ)  
ENGENHARIA QUÍMICA

GUSTAVO HENRIQUE COSTA

**VALIDAÇÃO DO CÓDIGO LIVRE OPENFOAM ATRAVÉS DA  
OBTENÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE  
CALOR**

GOIÂNIA - GO

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFU), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFU é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### 1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Gustavo Henrique Costa

Título do trabalho: Validação do código livre OpenFOAM através da obtenção de coeficientes de transferência de calor

### 2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO<sup>1</sup>

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Dyrney Araujo Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 24/06/2026, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Henrique Costa, Discente**, em 25/06/2026, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6289223** e o código CRC **DCF4B9AD**.

---

Referência: Processo nº 23070.030882/2026-57

SEI nº 6289223

GUSTAVO HENRIQUE COSTA

# **VALIDAÇÃO DO CÓDIGO LIVRE OPENFOAM ATRAVÉS DA OBTENÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química, do Instituto de Química (IQ) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Área de concentração:

Orientador(a): Dr. Dyrney Araújo dos Santos

GOIÂNIA

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Costa, Gustavo Henrique

VALIDAÇÃO DO CÓDIGO LIVRE OPENFOAM ATRAVÉS DA  
OBTENÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR [Artigo  
Científico] / Gustavo Henrique Costa. - 2026.

8 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal  
de Goiás, Instituto de Química (IQ), Engenharia Química, Goiânia, 2026.

Bibliografia.

Inclui: símbolos, tabelas.

1. Convecção Natural. 2. Coeficiente H. 3. Openfoam. 4.  
Buoyantfoam. 5. Cilindro Horizontal.

I. Santos, Dyrney Araújo dos, orient. II. Título.

CDU 66.0



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE QUÍMICA

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e dois dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “VALIDAÇÃO DO CÓDIGO LIVRE OPENFOAM ATRAVÉS DA OBTENÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR”, de autoria de Gustavo Henrique Costa, do curso de Engenharia Química, do Instituto de Química da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos - orientador (IQ/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Rafael Macedo Dias (IQ/UFG) e Ma. Eng.<sup>a</sup> Camila Narumi Yano Lopes (PPGEQ/UFU). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do discente. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 8,8, tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Dyrney Araujo Dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 22/06/2026, às 15:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Macedo Dias, Professor do Magistério Superior**, em 22/06/2026, às 15:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Camila Narumi Yano Lopes, Usuário Externo**, em 22/06/2026, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **6281086** e o código CRC **FACDFC75**.

*ABSTRACT – The demand for increasingly complex studies on heat transfer is strengthening Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques. Among these, the OpenFOAM software stands out due to its free availability and freedom to modify the code. In this sense, there is an urgent need for increasingly rigorous validation of these tools that aim to simulate reality. The validation experiments were all conducted using powerful workstations, and within the software, the buoyantFoam solver was chosen, focused on energy transport due to natural buoyancy forces. It was decided to work with natural convection in different Rayleigh ranges for quiescent air over a horizontal cylinder heated to temperatures that would ensure both compressible systems and systems where incompressibility would be modeled using the Boussinesq approximation. The results obtained were satisfactory when compared to well-established empirical correlations, considering that, for compressible systems, the errors ranged from -0.85% to 9.14%, and for incompressible systems the errors fell between -5.90% and -0.51%.*

Free convection, h coefficient, OpenFOAM, buoyantFoam, Horizontal cylinder.

# VALIDAÇÃO DO CÓDIGO LIVRE OPENFOAM ATRAVÉS DA OBTENÇÃO DE COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A demanda por estudos cada vez mais complexos acerca da transferência de calor fortalece cada vez as técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD). Dentre essas, destaca-se o software OpenFOAM devido à sua gratuidade e liberdade em mudanças no código. Nesse sentido, urge a necessidade de validações cada vez mais rigorosas dessas ferramentas que visam simular a realidade. Os experimentos para validação foram todos conduzidos através de poderosas workstations e, dentro do software foi escolhido o solver *buoyantFoam*, voltado para o transporte de energia devido a forças naturais de empuxo. Definiu-se trabalhar com convecção natural em diferentes faixas de Rayleigh para o ar quiescente sobre um cilindro horizontal aquecido a temperaturas que assegurassem tanto sistemas compressíveis, quanto sistemas onde a incompressibilidade seria modelada através da aproximação de Boussinesq. Os resultados obtidos foram satisfatórios quando comparados a correlações empíricas já bem estabelecidas, tendo em vista que, para os sistemas compressíveis, os erros ficaram na faixa de  $-0,85\%$  e  $9,14\%$ , e para os sistemas incompressíveis os erros caíram entre  $-5,90\%$  a  $-0,51\%$ .

*Palavras-chave:* Convecção natural; Coeficiente h; OpenFOAM; buoyantFoam; Cilindro horizontal

## 1 INTRODUÇÃO

A transferência de calor é um fenômeno fundamental em diversas áreas da engenharia química, desempenhando um papel crucial no projeto e operação de equipamentos utilizados em processos industriais (SILVA & SILVA & VIEIRA, 2014). Este fenômeno, que pode ocorrer por condução, convecção e radiação, é particularmente complexo quando se trata de convecção, devido ao acoplamento entre a transferência de energia e a transferência de quantidade de movimento (INCROPERA *et al*, 2014). Além disso, a determinação do coeficiente de transferência de calor (h) apresenta desafios significativos, dada a influência de uma série de variáveis, como geometria do sistema, características dos fluidos e condições operacionais (ÇENGEL & GHAJAR, 2012).

Diante da complexidade da transferência de calor, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) emerge como uma ferramenta valiosa para estudar e compreender esse fenômeno. Por meio de simulações numéricas, o CFD permite a análise detalhada e precisa do comportamento de fluidos e trocas de calor em diferentes sistemas, oferecendo uma alternativa eficiente e econômica aos métodos experimentais tradicionais. Ao possibilitar a visualização e análise de fenômenos que muitas vezes são difíceis de serem observados experimentalmente, o CFD desempenha um papel essencial na pesquisa e desenvolvimento de processos e equipamentos térmicos.

No entanto, a aplicação do CFD requer validação e verificação adequadas para garantir sua confiabilidade e precisão. Nesse contexto, surge a necessidade de validar os códigos de CFD por meio da comparação dos resultados obtidos com valores experimentais ou dados provenientes de correlações empíricas da literatura.

Assim, este trabalho propõe a validação do código OpenFOAM por meio da obtenção de coeficientes de transferência de calor em diferentes sistemas e sua comparação com valores calculados por correlações empíricas.

Partindo-se dos estudos realizados por Maestre *et al* (2021) e Ali *et al* (2023), definiu-se que os sistemas a serem simulados consistiram em uma convecção natural e externa de ar à 300K e em repouso sobre um cilindro horizontal aquecido. Visando validar o código por completo, foram decididas duas temperaturas para o cilindro: 315K e 415K, visto que essa primeira possibilita o estudo de um sistema onde modela-se a incompressibilidade a partir da aproximação de Boussinesq, e a segunda proporciona sistemas totalmente compressíveis. Ademais, cada grupamento foi simulado nas seguintes faixas de Rayleigh:  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$  e  $10^6$ . Tais simulações seriam, finalmente, comparadas com resultados obtidos a partir de correlações empíricas já bem conhecidas e estabelecidas na literatura, sendo escolhidas para este trabalho as Correlação de Morgan e Correlação de Churchill-Chu.

Para mais, o software, também livre, Gmsh<sup>®</sup> deverá contribuir na realização deste projeto. Com suporte deste, será construída a geometria e, posteriormente, confeccionada a sua malha computacional operada nos simulacros.

Ao abordar esses pontos, este estudo visa não apenas avançar o entendimento teórico da transferência de calor, mas também fornecer uma base sólida para a aplicação prática do CFD na análise e otimização de processos térmicos, contribuindo para o desenvolvimento contínuo da engenharia química e de processos.

## 2 METODOLOGIA

### Equipamentos

As simulações foram todas rodadas utilizando as workstations de alto desempenho do Laboratório de Sistemas Particulados e Termodinâmica Computacional (SisParTec), pertencente ao Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás.



Figura 1. Workstations de alto desempenho do SisParTec.

As configurações de cada workstation estão representadas abaixo, na Tabela 1:

Tabela 1. Configurações das workstations.

	<b>Processador</b>	<b>Núcleos</b>	<b>Threads</b>	<b>RAM</b>
<b>Workstation 1</b>	Intel 7 12700K	12	20	32 GB
<b>Workstations 2 e 3</b>	AMD Ryzen 9 5900Z	12	24	32 GB

## Geometria e Malha

A geometria utilizada na realização desse estudo foi a de um cilindro horizontal com 1 metro de diâmetro e 1 metro de comprimento. Ao redor deste cilindro foi construída uma malha com distâncias de 10 vezes o seu diâmetro para as regiões de entrada, face superior e face inferior e uma distância de 40 vezes o seu diâmetro para a região de saída.

Essas distâncias foram consideradas a fim de evitar efeitos de parede não existentes, assim como possibilitar um bom espaço para desenvolvimento e observação da pluma formada acima do cilindro.

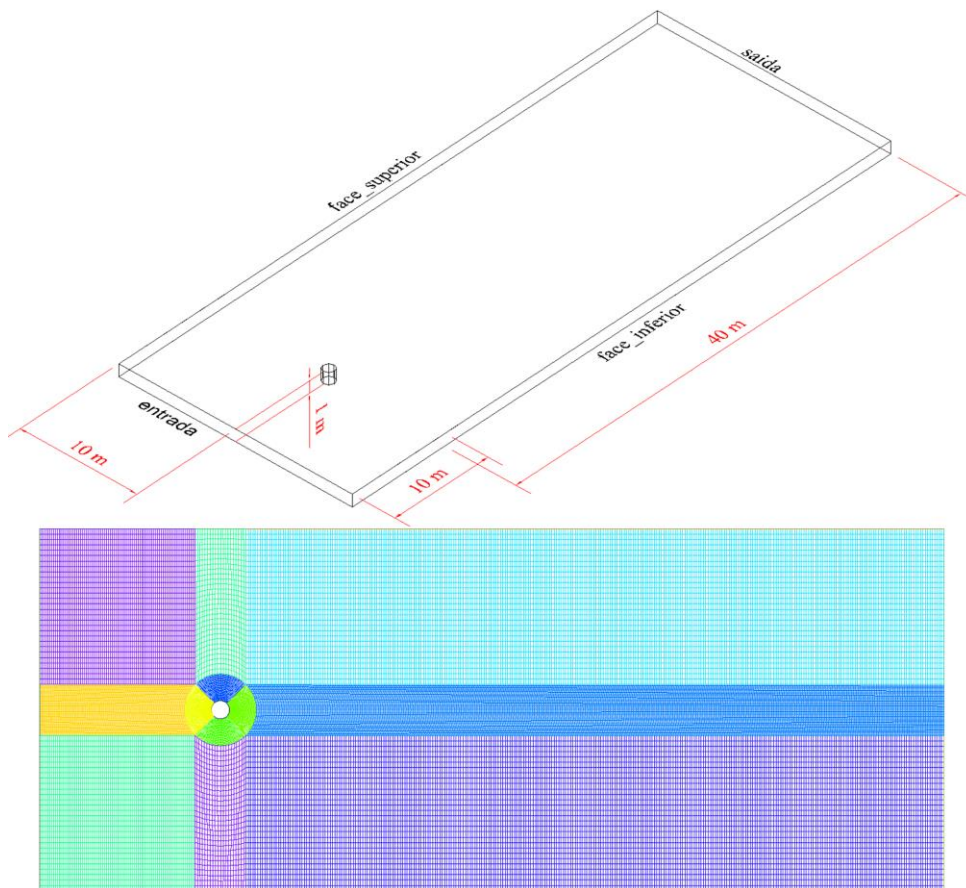


Figura 2. Representações da geometria e malha utilizadas. Fonte: Autoria própria.

Ambas geometria e malha foram construídas através do Gmsh ® e, posteriormente, foi conduzido um teste de independência pelo OpenFOAM. Tal teste consta na construção de malhas com diferentes níveis de refino para a mesma geometria, rotação de simulações básicas em condições iguais para todas as malhas e comparação dos resultados obtidos, visando estudar uma relação de custo computacional por acurácia. Em resumo, malhas mais refinadas

produzirão resultados melhores, mas, à um custo computacional muito maior e o teste de independência existe para encontrar a malha que equilibra ambos os pontos.

Ao final do teste, definiu-se que a malha a ser usada foi a mais refinada, visto que o custo computacional dela com a pior não foi muito maior, enquanto seus resultados foram consideravelmente mais precisos.

### Simulação e equacionamento

O solver escolhido para a realização deste projeto foi o *buoyantFoam*: um solver novo focado na transferência de energia devido às forças puramente convectivas, que possibilita trabalhar tanto com a aproximação de Boussinesq para modelar a incompressibilidade ou com fluidos totalmente compressíveis e resolve sistemas transientes/estacionários. Após testes iniciais observou-se que as simulações entravam em estado estacionário entre 10 e 20 segundos e, desse modo, foi definido um tempo final de simulação de 35 segundos para todos os casos.

As condições de fronteira iniciais (HERMOSILLA, 2016) estão dispostas conforme a Tabela 2 abaixo, sendo que para os arquivos de  $p$  e  $p\_rgh$  o valor do campo interno é de 101325 e para o arquivo de  $U$  o valor é uniforme de  $(0\ 0\ 0)$ , indicando que o fluido ao redor do cilindro está em repouso inicialmente em todas as coordenadas. Ademais, foi incluso uma função de pós-processamento chamada *wallHeatFlux*, a partir de qual foi possível tirar os valores da Taxa de Calor em toda a região de *parede\_cilindro* no tempo final.

Tabela 2. Condições de fronteira definidas.

Região	U	p_rgh	p	T
entrada	<i>pressureInletOutlet Velocity</i>	<i>totalPressure</i>	<i>calculated</i>	<i>inletOutlet</i>
saida	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>calculated</i>	<i>inletOutlet</i>
face_superior	<i>pressureInletOutlet Velocity</i>	<i>totalPressure</i>	<i>calculated</i>	<i>inletOutlet</i>
face_inferior	<i>pressureInletOutlet Velocity</i>	<i>totalPressure</i>	<i>calculated</i>	<i>inletOutlet</i>
parede_cilindro	<i>noSlip</i>	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>calculated</i>	<i>fixedValue</i>
frente_traseira	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>

Para os cálculos dos coeficientes de transferência de calor por convecção empregou-se a Equação 1. Para adequar-se aos valores de Rayleigh propostos, foi necessário calcular as viscosidades dinâmicas conforme a Equação 2 e, a partir da Equação 3, obteve-se também os valores da condutividade térmica utilizado no cálculo final do Nusselt simulado, de acordo com a Equação 4. Por fim, as demais propriedades termo físicas do fluido foram todas obtidas através de tabelas fixas, tendo como base a temperatura do filme.

$$h = \frac{Q}{A \cdot (T_s - T_\infty)} \quad (1)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot D^3 \cdot \rho^2}{Gr}} \quad (2)$$

$$\kappa = \frac{C_p \cdot \mu}{Pr} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{\kappa} \quad (4)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de todos os casos simulados, assim como seus erros percentuais, são demonstrados na Tabela 3 para a Correlação de Morgan e na Tabela 4 para a Correlação de Churchill-Chu.

Tabela 3. Resultados em comparação com a Correlação de Morgan.

Ra	Caso	Nu empírico	Nu simulado	Erro
10 <sup>3</sup>	Boussinesq	3,11472	2,59645	-16,64%
	Compressível	3,11472	3,18092	2,13%
10 <sup>4</sup>	Boussinesq	4,80196	4,31614	-10,12%
	Compressível	4,80196	5,15614	7,38%
10 <sup>5</sup>	Boussinesq	8,53574	7,70149	-9,77%
	Compressível	8,53574	8,46341	-0,85%
10 <sup>6</sup>	Boussinesq	15,17893	13,66918	-9,95%
	Compressível	15,17893	16,56555	9,14%

Tabela 4. Resultados em comparação com a Correlação de Churchill-Chu.

Ra	Caso	Nu empírico	Nu simulado	Erro
10 <sup>3</sup>	Boussinesq	2,60989	2,59645	-0,51%
	Compressível	2,60718	3,18092	22,01%
10 <sup>4</sup>	Boussinesq	4,37050	4,31614	-1,24%
	Compressível	4,36534	5,15614	18,12%
10 <sup>5</sup>	Boussinesq	7,77218	7,70149	-0,91%
	Compressível	7,76209	8,46341	9,04%
10 <sup>6</sup>	Boussinesq	14,52633	13,66918	-5,90%
	Compressível	14,50610	16,56555	14,20%

Em uma análise geral, é notável os baixos erros percentuais, o que indica um sucesso na validação do código livre OpenFOAM. Já em uma análise mais minuciosa percebe-se que, curiosamente, os casos compressíveis se aproximaram mais dos resultados previstos pela Correlação de Morgan, com erros entre -0,85% e 9,14%. Em contraste, os casos em que a incompressibilidade foi modelada a partir da aproximação de Boussinesq apresentaram mais similaridade com os dados auferidos pela Correlação de Churchill-Chu, com erros na faixa de -5,90% a -0,51%.

#### 4 CONCLUSÕES

Em suma, foi observado que para casos compressíveis a Correlação de Morgan apresenta mais conformidade, enquanto para casos em que se faz emprego de Boussinesq a Correlação de Churchill-Chu revelou-se mais párea. De forma integral foi obtido êxito na validação do código livre OpenFOAM, o que demonstra a sua eficácia e reforça sua serventia nos crescentes estudos na área da Fluidodinâmica Computacional mundo à fora.

Por fim, deixa-se registrado que uma possível continuação para este trabalho seria, agora, a criação de uma nova Correlação Empírica por parte do autor, fazendo-se uso de ferramentas estatísticas de regressão e demais estudos matemáticos.

## 5 AGRADECIMENTOS

Deseja-se agradecer ao Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos pela orientação e motivação durante a realização do projeto, assim como aos colegas do laboratório SisParTec e do Instituto de Química - UFG.

## 6 NOMENCLATURA

$A$	Área superficial do cilindro ( $m^2$ )	$Nu$	Número de Nusselt
$C_p$	Capacidade calorífica à pressão constante ( $kJ/(kg.K)$ )	$Pr$	Número de Prandtl
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica ( $1/K$ )	$Ra$	Número de Rayleigh
$h$	Coefficiente de transferência de energia por convecção ( $W/(m^2.K)$ )	$Q$	Taxa de calor (W)
$\kappa$	Condutividade térmica ( $W/(m.K)$ )	$T_s$	Temperatura do cilindro (K)
$\rho$	Densidade ( $kg/m^3$ )	$T_\infty$	Temperatura do ambiente (K)
$D$	Diâmetro (m)	$\mu$	Viscosidade dinâmica ( $N.s/m^2$ )
$g$	Gravidade ( $m/s^2$ )		

## 7 REFERÊNCIAS

- ALI, S. et al. **Innovative algorithmic approach of determining the overall heat transfer coefficient of concentric tube heat exchangers**. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 148, p. 107077–107077, 2023.
- ÇENGEL, Y.A.; GHAJAR, A.J.; **Transferência de calor e massa**, McGraw Hill, 4<sup>a</sup> ed., 2012.
- HERMOSILLA, M. B. **Study of heat and mass transfer applications in the field of engineering by using OpenFOAM**. Bachelor's Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- INCROPERA, F.P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- MAESTRE, I.R. et al. **Performance analysis of natural convection correlations for spheres at high Rayleigh numbers**. International Journal of Thermal Sciences, v. 168, p. 107061–107061, 2021.
- SILVA, J.P.S, SILVA, D.O., VIEIRA, L.G.M., **Determinação de coeficientes convectivos de transferência de calor por meio das Técnicas de Fluidodinâmica Computacional**, Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis-SC, 2014.