



**UCSAL**  
UNIVERSIDADE  
CATÓLICA  
DO SALVADOR

**Antonio Alves da Cunha Junior**

**ESTUDO SOBRE A DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.**

Salvador  
2021



**Antonio Alves da Cunha Junior**

## **ESTUDO SOBRE A DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.**

Artigo apresentado pelo discente Antonio Alves da Cunha Junior como Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira. Orientador: Wagner Almeida Mônaco Conceição

Salvador

2021

# ESTUDO SOBRE A DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Antonio Alves da Cunha Junior<sup>1</sup>

## Resumo

A dinâmica de fluidos computacional ou CFD, é a área que trata da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados tornando capaz de calcular as condições operacionais - temperatura, pressão e propriedades de transportes - no espaço tridimensional ou bidimensional. Desta forma, há a possibilidade de verificar problemas que uma simulação tradicional não conseguiria mapear, pois, trabalha com parâmetros médios. Este estudo visa explorar o CFD e as equações envolvidas sendo feitas demonstrações e uma comparação entre o modelo k-épsilon e o SST (turbulência transporte de tensão de cisalhamento) através da ferramenta ANSYS-CFD(FLUENT)-licença estudantil aplicado a um T de mistura onde entra um fluido (água) quente a uma temperatura de 363,15 K e uma velocidade de 3 m/s e um fluido (água) frio a uma temperatura de 283,15 K e uma velocidade de 5 m/s assim fazendo um estudo sobre o comportamento da mistura. Para avaliar a solução proposta, foi realizada uma comparação dos parâmetros de temperatura e velocidade para cada modelo e para cada mudança realizada sobre a geometria. Verificou-se que o modelo k-e e SST convergiram com um critério de  $10e-6$ , os dois modelos representam bem o fluxo da água através do T de mistura, apesar de que o modelo SST representou melhor os vetores de velocidade, apesar disso os dois modelos demonstraram confiança a variação de temperatura e o deslocamento do fluido ao longo do misturador. As mudanças feitas sobre a geometria tiveram uma resposta satisfatória, assim certificando que o *software* é uma ferramenta interessante para se realizar simulações envolvendo escoamento de fluidos.

**Palavra-Chave:** Simulação; Fluidodinâmica Computacional; ANSYS.

## Abstract

*Computational fluid dynamics, or CFD, is a field that deals with the numerical simulation of fluid flows, heat transfer and related phenomena, being able to calculate how operating conditions - temperature, pressure and transport properties - in three-dimensional or two-dimensional space. In this way, there is a possibility of verifying problems that a traditional simulation cannot map because it works with average parameters. This study aims to explore the CFD and the equations involved, with a demonstration and a comparison between the k-epsilon model and the SST (shear stress transport turbulence) using the ANSYS-CFD (FLUENT) tool - student license end to a mixing Tee where enter a hot fluid (water) at a temperature of 363.15 K and a velocity of 3 m / s and a cold fluid (water) at a temperature of 283.15 K and a velocity of 5 m / s thus doing a study on the behavior of the mixture. To evaluate the proposed solution, a comparison of temperature and velocity parameters was performed for each model and for each change made to the geometry. It was found that the k-e and SST model converged with a criterion of  $10e-6$ , the two models well represent the water flow along the mixing Tee, although the SST model better represents the velocity vectors along the pipeline, despite from this the two models demonstrated confidence in the temperature variation and the fluid displacement through the mixer. The worlds made on the geometry have a satisfactory answer, thus making sure that the software is an interesting tool to perform simulations involving fluid flow.*

**Keyword:** Simulation; Fluid Dynamics Computing; ANSYS.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização da dinâmica de fluidos computacional começou nos anos de 1960 e 1970, sendo desenvolvido a metodologia tendo como base diferenças finitas e logo após foi utilizado

---

<sup>1</sup>Graduando do curso de Engenharia Química. E-mail: antonio.junior@ucsal.edu.br

<sup>2</sup>Mestre do curso de Engenharia Química. E-mail: wagner.conceicao@pro.ucsal.br

volumes finitos para resolver CFD, a partir dos anos de 1980 as indústrias começam a investir nessa tecnologia. Com o avanço tecnológico houve os aprimoramentos dos modelos dispondo de soluções rápidas e permitindo a integração com simuladores de processo (MALISKA, 2004; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Com a intenção de se reduzir gastos e parâmetros de funcionamento, a ferramenta da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) ganha robustez em comparação aos métodos analíticos e à experimentação. A dinâmica de fluidos computacional é o âmbito da computação científica que está conectada aos métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos com ou sem troca de calor. Isso inclui tanto o movimento de fluidos ao redor do corpo, como, por exemplo, em aviões ou submarinos, ou no interior do corpo, como em tubulações, bombas, colunas de destilação (TU; YEOH; LIU, 2008). Assim, uma das funções dessa ferramenta é a redução do número de experimentos e a exploração dos fenômenos que não podem ser estudados em laboratório, uma vez que a análise CFD contribuiu sobre os testes experimentais reduzindo tempo, esforço e custo (MALISKA,2004).

A partir da modelagem, pode-se determinar quais grandezas físicas (pressões, velocidades e temperaturas na região de escoamento) atuam sobre o sistema físico e como elas o afetam, envolvendo também princípios de conservação (massa, energia e momentum) e equações referentes a fenômenos de transporte. Havendo uma aplicabilidade adequada sobre esses parâmetros pode-se empregar diversas situações para se obter uma eficácia de processo, no qual é determinado pelo operador do *software* (FARIA, 2003).

É relevante evidenciar que métodos numéricos, mecânica dos fluidos experimental e as análises teóricas são técnicas que estão conectadas durante o projeto abrangendo o escoamento de fluidos (MALISKA,2004). Por tanto, o objetivo é explorar o CFD e as equações envolvidas fazendo uma demonstração de como utilizar a ferramenta ANSYS-CFD(FLUENT)-licença estudantil aplicado a um T de mistura onde entra um fluido (água) quente a uma temperatura de 363,15 K e uma velocidade de 3 m/s e um fluido (água) frio a uma temperatura de 283,15 K e uma de velocidade 5 m/s assim fazendo um estudo sobre o comportamento da mistura.

## 2. METODOLOGIA

As equações utilizadas para representar o escoamento do fluido tem como base o conjunto de equações de Navier-Stokes, envolvendo conservação de massa, conservação da quantidade de energia e da quantidade de movimento (MALISKA, 2004).

### Método numérico

- Conservação de massa

A equação de conservação de massa, pode ser escrita da seguinte forma:

$$m1(t + \Delta t) + m2(t + \Delta t) - m1(t) + m3(t) = \Delta m|_{\text{sist}} \quad [1]$$

Onde  $m$  representa a variação de massa no sistema e  $t$  o tempo.

Dividindo tudo por  $\Delta t$ , tem-se:

$$m1(t + \Delta t) - \frac{m1(t)}{\Delta t} - \frac{m3(t)}{\Delta t} + \frac{m2(t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t}|_{\text{sist}} \quad [2]$$

Admitindo que a massa que entra e sai do volume de controle a equação [2] pode ser expressa como:

$$\dot{m}(\text{entra}) - \dot{m}(\text{esai}) + \frac{\Delta m}{\Delta t}|_{\text{sist}} = \frac{\Delta m}{\Delta t}|_{\text{vc}} \quad [3]$$

Considerando que a variação de massa é nula para o sistema,

$$\frac{\Delta m}{\Delta t}|_{\text{sist}} = 0 \quad [4]$$

Assim temos que a equação [3] pode ser escrita na sua forma integral:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \int \rho dV = - \int \rho(\mathbf{VR} \cdot \mathbf{n}) dA \quad [5]$$

Segundo MALISKA, (2004)  $\mathbf{VR}$  é definido como a velocidade relativa através das fronteiras do volume de controle, tal que empregando um teorema divergente, considerando o volume de controle fixo nono tempo e infinitesimal é definida como na forma diferencial da equação de conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x}(\rho \cdot uR) + \frac{\partial \rho}{\partial y}(\rho \cdot vR) + \frac{\partial \rho}{\partial z}(\rho \cdot wR) = 0 \quad [6]$$

Havendo um volume de controle fixo no espaço, a velocidade relativa assemelha-se a velocidade do escoamento, logo a equação de conservação da massa é escrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot V) = 0 \quad [7]$$

Onde  $t$  (s) é o tempo,  $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) é a densidade,  $u_R, v_R, w_R$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) é a velocidade relativa nas direções  $x, y, z$ .

- Conservação da quantidade de movimento

A equação de quantidade de movimento segue o mesmo raciocínio da equação de conservação de massa, a única diferença é a variação da quantidade de movimento.

Aplicando a 2ª Lei de Newton, assim temos que:

$$\frac{\Delta}{\Delta t}(mV) = \sum F \quad [8]$$

Sendo explicitada para um volume de controle:

$$\dot{m}V|_{entra} - \dot{m}V|_{sai} + \sum F = \frac{\Delta}{\Delta t}(mV)_{vc} \quad [9]$$

Observa-se que a vazão mássica ( $\dot{m}$ ) que percorre as fronteiras do volume de controle conduz, por advecção (transmissão do calor pelo deslocamento de massa atmosférica no sentido horizontal), a propriedade  $V$  (quantidade de movimento por unidade de massa) para o interior do volume de controle e  $\dot{m}$  é determinado pela velocidade presente no produto  $\dot{m}V$  (MALISKA, 2004), dado que o movimento é interpretado como o transportador, assim podendo transportar energia, energia cinética turbulenta, dissipação de energia cinética turbulenta e entre outros tipos. Assim pode ser apresentada pela variável genérica  $\Phi$  (unidade transportadora/unidade de massa) (MALISKA, 2004).

$$\dot{m}\Phi|_{entra} - \dot{m}\Phi|_{sai} + g^\Phi \Delta V = \frac{\Delta}{\Delta t}(m\Phi)_{vc} \quad [10]$$

O termo  $g^\Phi$  é considerado nulo para conservação de massa, devido a massa no interior de um sistema não se altera com o tempo.

Na forma integral temos que:

$$-\int V. \rho(V_R. n)dA + \sum F = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho \mathbf{V} dV \quad [11]$$

Onde  $\rho(V_R. n)dA$  é a vazão mássica  $\dot{m}$ , utilizando o teorema da divergência e considerando que é para um volume de controle de forma fixa no tempo e infinitesimal,  $dV$  é definido como volume infinitesimal, a forma diferencial é por:

$$\frac{\sum F}{dV} = \rho[\partial V / \partial t] + (\mathbf{V}_R. \nabla) \mathbf{V} \quad [12]$$

Considerando uma situação bidimensional, simplificando o balanço de forças nas direções x e y:

$$\frac{\sum F}{dV} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yx}) + \mathbf{B}_x \quad [13]$$

$$\frac{\sum F}{dV} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yy}) + \mathbf{B}_y \quad [14]$$

$\tau$  é o tensor das tensões viscosas, fazendo a relação entre o tensor tensão e a taxa de deformação, pode ser definido as equações especializadas para cada fluido ou classe de fluidos (MALISKA, 2004). Para fluidos newtonianos o tensor tensão é dado por:

$$\tau = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3\nu} \cdot \vec{v} \cdot I] \quad [15]$$

Onde  $\mu$  é a viscosidade molecular,  $I$  é o tensor unitário.

- Conservação da quantidade de energia

A equação de energia é representada através do domínio computacional, assim essa equação é mostrada abaixo:

$$\frac{\partial(\rho s \overline{hs})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho s \overline{U} s \overline{hs}) = \nabla \cdot (\lambda s \nabla T_s) - p \nabla \cdot \overline{U} + \Phi + \overline{s \epsilon} \quad [16]$$

Sendo  $h$ ,  $T$  e  $\lambda$  estão representando a entalpia estática, a temperatura e a condutividade térmica do fluido,  $\vec{s}_E$  é definido por uma fonte de fluxo de calor e  $\Phi$  é o termo de dissipação viscosa, que molda o aquecimento interno através da viscosidade no escoamento é desconsiderado na maior parte dos casos (ANSYS INC, 2016; López, 2017).

## Método

Na **Tabela 1** abaixo, é mostrada as dimensões do misturador 3D, para este exemplo foi apenas considerado o domínio fluido, o domínio sólido foi desconsiderado, pois, iria aumentar a complexidade da simulação e influenciar diretamente na criação da malha, havendo a necessidade da geração de muitos elementos, uma vez que a licença estudantil do *Ansys-CFD(Fluent)* só permite criar até 512 mil elementos de malha

**Tabela 1** – Dados da tubulação do tipo T

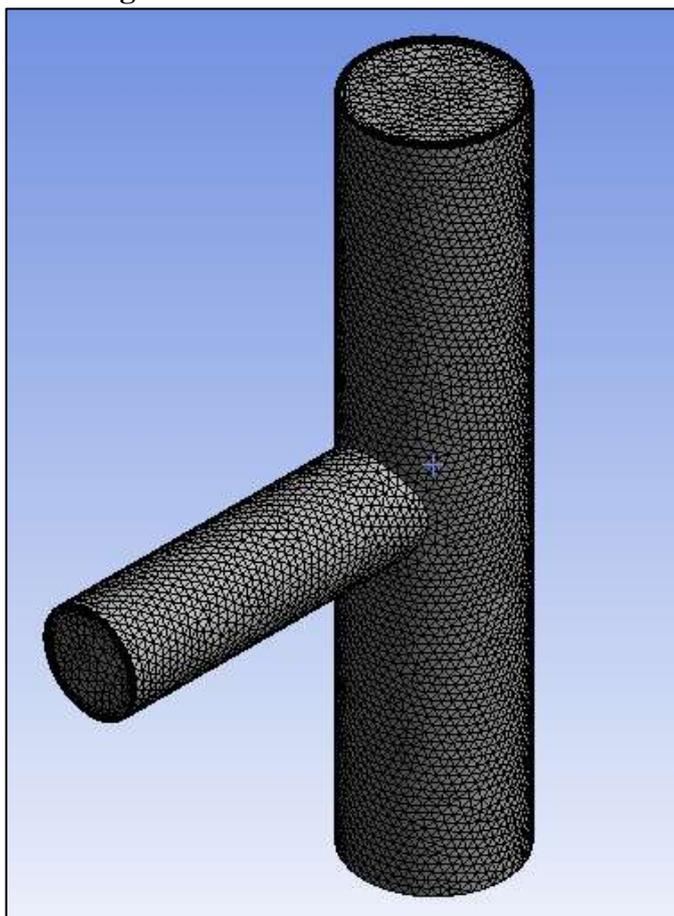
Descrição	Dimensões[mm]
Diâmetro-externo-y	120
Diâmetro-externo-x	75
Diâmetro-interno-y	118
Diâmetro-interno-x	73
Comprimento do tubo	500

Fonte: Autor, 2021.

## Geração de Malha

Para se obter melhores resultados na região da camada limite, como mostrada na **Figura 1**, foi utilizado uma transição suave entre a última camada de tetraedro e prisma e tendo um crescimento de 20% (ANSYS INC, 2016).

**Figura 1**-Vista da malha do T de mistura 3D



Fonte: Autor, 2021.

Para a geração de malha foi utilizado o programa *Ansys Meshing*, para este modelo foi empregado elementos tetraédricos e prismas com intenção de obter uma melhor ortogonalidade e a redução do esforço computacional. A quantidade de elementos da malha computacional foi próxima de 154754 mil e nós igual 59385 mil (ANSYS INC, 2016).

Após a geração da malha do T de mistura foi estabelecido as condições de contorno. A princípio, determinou-se as propriedades da água no estado líquido em condições normais de temperatura pressão, essas informações foram necessárias para os dados de entrada da simulação.

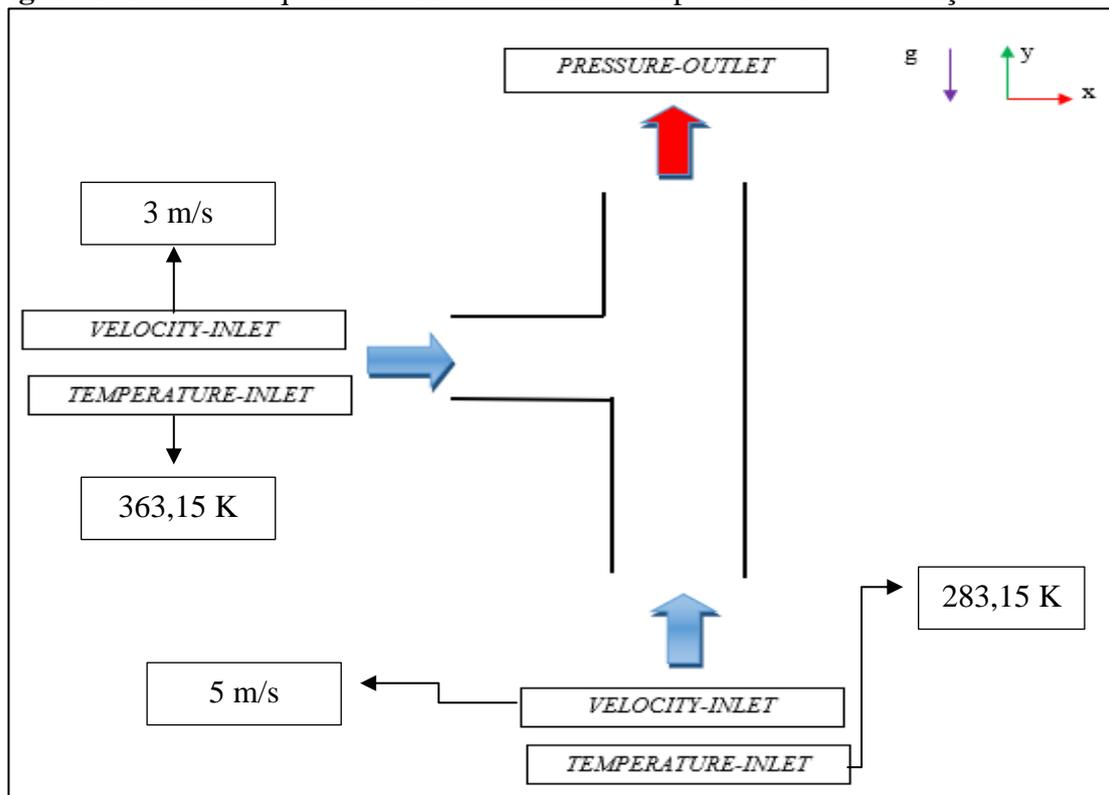
**Tabela 2-** Propriedades da água em condições normais T e P (298,15 K e 101325 Pa)

Fase	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$C_p$ (J.kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	$k$ (W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	$\mu$ (kg.m <sup>-1</sup> . s <sup>-1</sup> )
Líquido	998,2	4182	0,6	0,001003

Fonte: Adaptado do Ansys-Fluent, 2021.

O domínio computacional foi composto em um duto do tipo T vertical 3D com diâmetro interno 0,02329 m e comprimento de 3 m, velocidade da água na entrada no eixo y foi de 3 (m. s<sup>-1</sup>) e no eixo z 5 (m. s<sup>-1</sup>), a pressão foi estabelecida na saída, a pressão absoluta de 101 325 Pascal e força gravitacional direcionada para abaixo igual a -9,81 (m/s<sup>2</sup>). Além disso, temperaturas de entrada no eixo y = 283,15 K e no eixo z = 363,15 K. A simulação de estado estacionário foi realizada com um esquema por acoplamento. O uso do algoritmo acoplado é baseado em pressão onde obtém uma implementação monofásica mais robusta e eficiente para fluxos em estado estacionário (ANSYS INC, 2016), a discretização dos gradientes espaciais foi realizada com base em células de mínimos quadrados, o método *PRESTO!* foi utilizado para a discretização de pressão, quantidade de movimento e taxa de dissipação de turbulência o esquema *Upwind* de primeira ordem, energia e quantidade de movimento foram tratadas pelo método *Upwind* de Segunda Ordem (ANSYS INC, 2016). Os efeitos da turbulência foram considerados por meio do modelo turbulento k- $\epsilon$  e SST visto que, é recomendado assumir um valor de 5% para o valor da intensidade de turbulência e razão turbulência viscosidade igual 10 (ANSYS INC, 2016).

**Figura 2-** Desenho esquemático 2D do domínio computacional e as condições de contorno utilizadas



Fonte: Autor, 2021.

## 2. RESULTADOS

No presente capítulo, encontram-se as análises dos resultados alcançados através da simulação do uso de CFD, onde é abordado uma demonstração sobre o critério de convergência e uma comparação entre o modelo k- $\epsilon$  e o SST. Todas as simulações foram realizadas utilizando o software *ANSYS-CFD (FLUENT)* na versão 2021.R1.

Os resíduos são uns dos parâmetros de convergência que podem ser acompanhados durante a simulação, visto que eles relacionam diretamente se as equações foram resolvidas com precisão. Porém nem sempre os resíduos indicam que a solução convergiu, principalmente se o caso apresentar um alto grau de instabilidade como em relação à turbulência, por exemplo. Para comprovar de fato se o sistema convergiu ou não se recomenda criar monitores externos para poder observar as variações físicas do sistema como: pressão, temperatura, velocidade, entre outras, fazendo posteriormente comparações com outros resultados correlacionados ou experimentais (ANSYS INC, 2016).

**Tabela 3**-Tabela de resíduos para o modelo de turbulência K-épsilon

interação	<i>continuity</i>	<i>x-velocity</i>	<i>y-velocity</i>	<i>z-velocity</i>	<i>energy</i>	k	$\epsilon$
438	9,998e-07	2,4285e-09	3,3405e-09	2,916e-09	5,93e-08	7,09e-09	1,372e-08

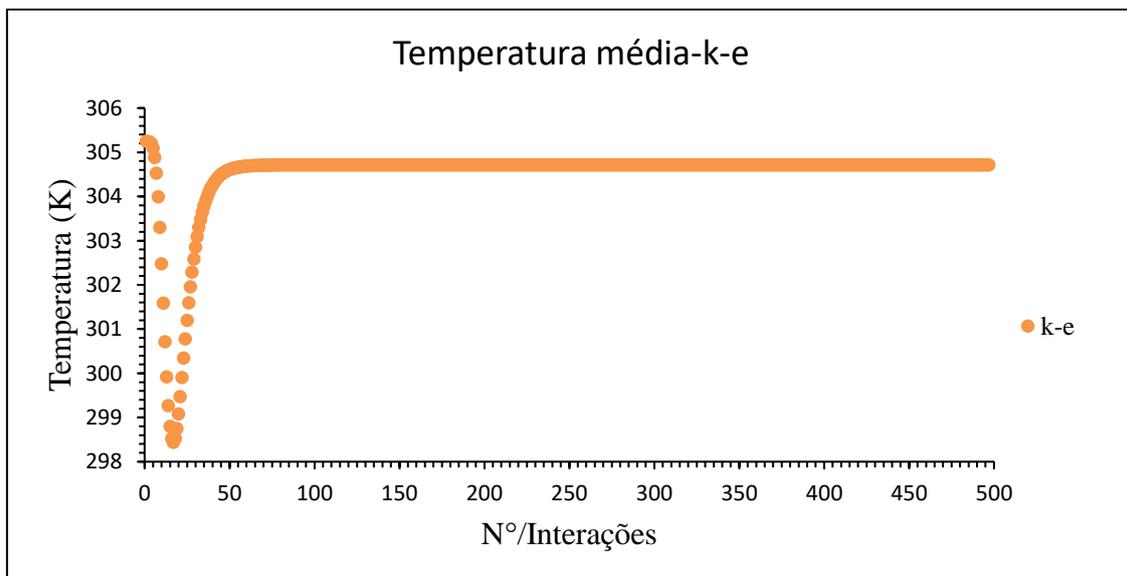
Fonte: Autor, 2021.

**Tabela 4**-Tabela de resíduos para o modelo de turbulência SST

interação	<i>continuity</i>	<i>x-velocity</i>	<i>y-velocity</i>	<i>z-velocity</i>	<i>energy</i>	k	$\omega$
884	2,5031e-06	7,5320e-09	8,1629e-09	1,007e-08	1,29e-09	3,007e-08	3,838e-08

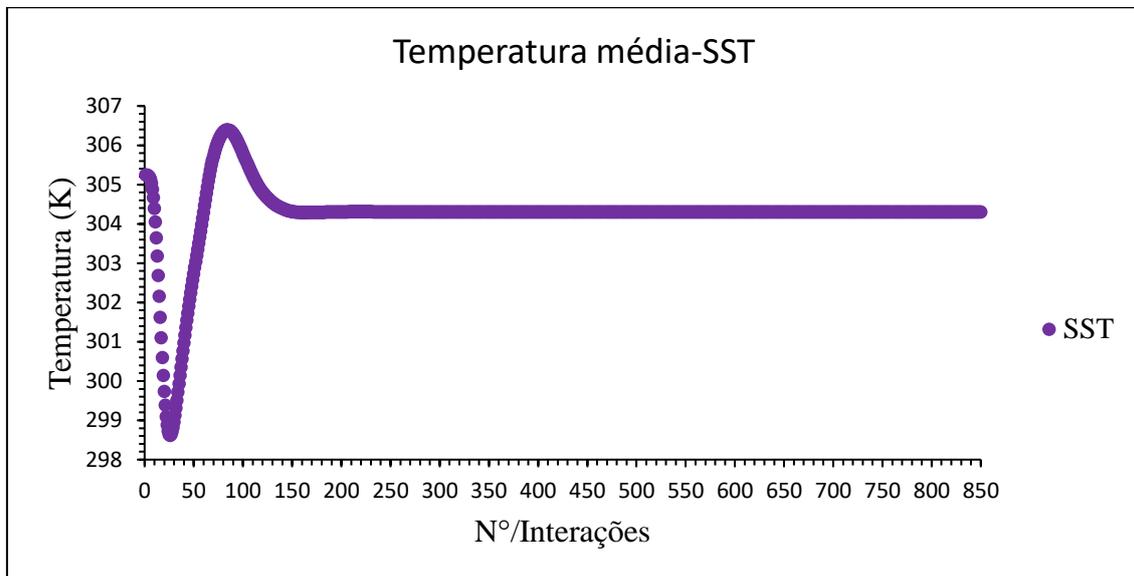
Fonte: Autor, 2021.

**Gráfico 1**- Temperatura na região de saída domínio fluido (água) do modelo k-épsilon



Fonte: Autor, 2021.

**Gráfico 2-** Temperatura na região de saída domínio fluido (água) do modelo SST

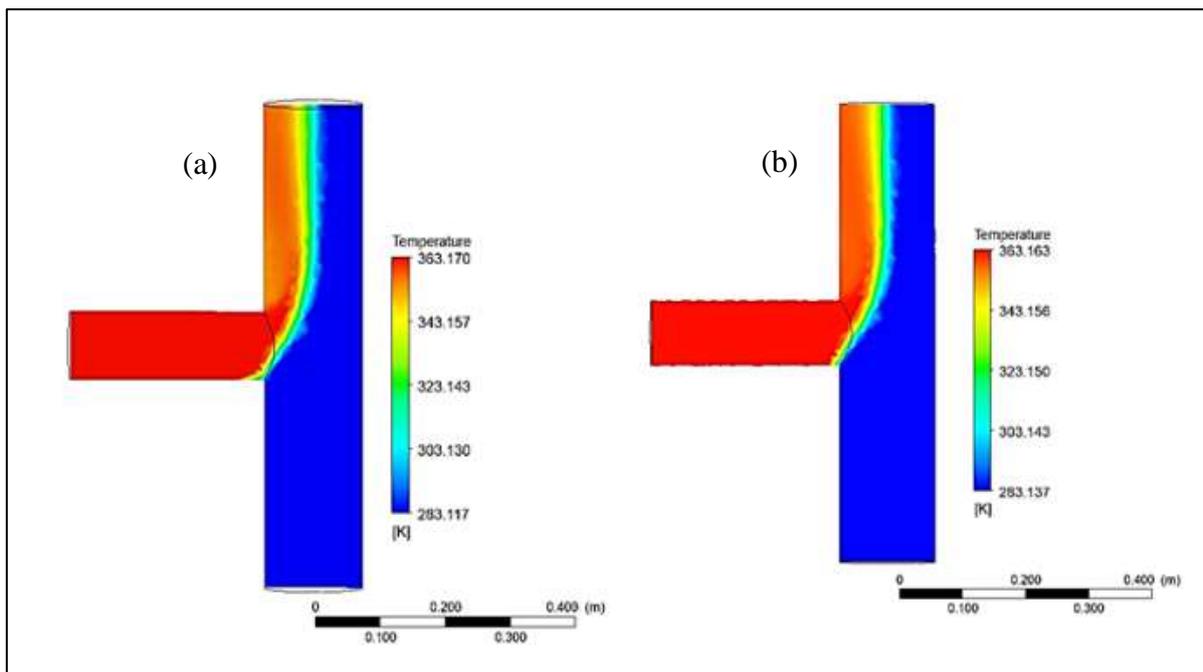


Fonte: Autor, 2021.

Foi utilizado um critério de resíduo de  $10e-6$  para todas as variáveis, dado que tanto o modelo k-épsilon como o SST alcançaram o critério desejado, porém o modelo de turbulência transporte de tensão de cisalhamento precisou de mais iterações para convergir, como é mostrado na **Tabela 4**. Isso se justifica, pois esta forma detêm uma formulação robusta e precisa na região da parede, com a independência de fluxo livre, e isso indica uma necessidade de uma malha mais refinada, logo um maior esforço computacional. Já o modelo k-e precisou de menos iterações para convergir devido a este modelo ter a característica de ser menos sensível aos valores assumidos (arbitrários) no fluxo livre, prevendo resultados bem longe dos limites de parede com gradientes de pressão adversos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). No entanto, nos dois modelos utilizados não houve variações abruptas sobre a temperatura de saída, assim se mantendo constante apresentado no **Gráfico 1 e 2**, apesar de que nas primeiras iterações percebe-se que ocorreu uma diminuição. A causa dessa diminuição foi devido à mistura da água fria que entra com uma temperatura inferior à da água quente.

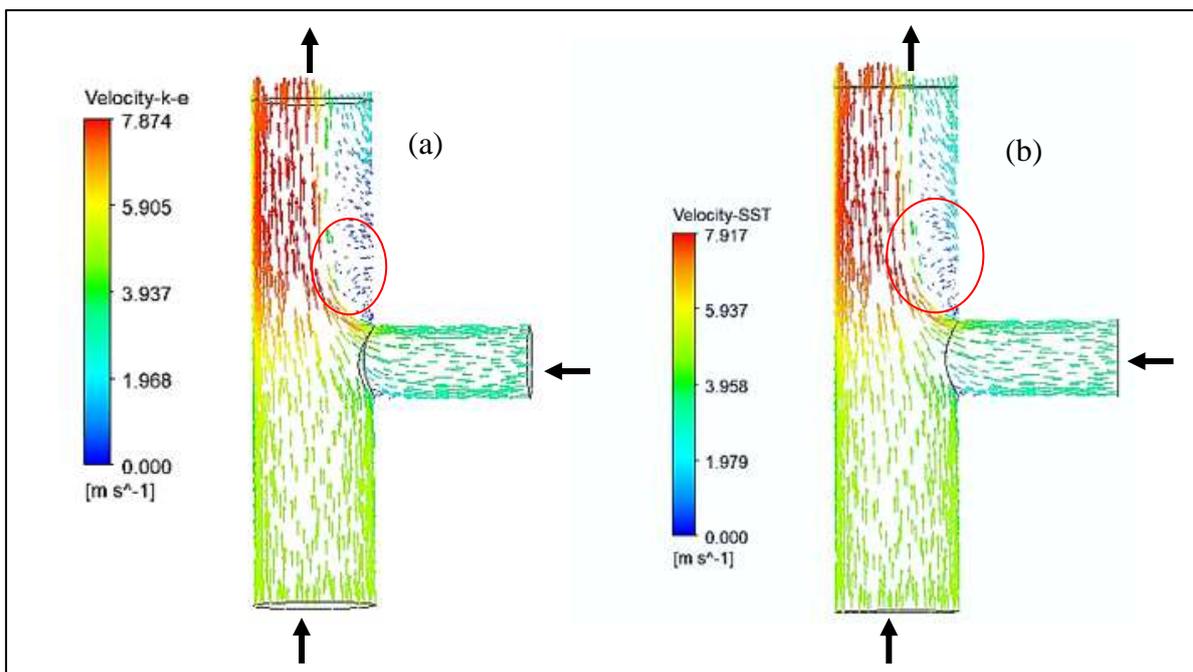
Na **Figura 3** é mostrado a variação de temperatura do T de mistura onde foi colocado um plano para melhor visualização dos gradientes. O mesmo foi feito para os vetores de velocidade na **Figura 4**, (a) modelo k-épsilon (b) modelo SST, dado que vermelho é representada como a temperatura/velocidade máxima e azul a mínima. Percebe-se que na **Figura 3** água que entra na seção vertical (corrente fria) está com uma temperatura de aproximadamente 283 K, já na seção horizontal (corrente quente) a água está entrando com uma temperatura de aproximadamente 363 K, uma vez que a mistura da corrente fria com a corrente quente ocorre exatamente na junção T evidenciando uma coloração mais próximo do verde com uma temperatura em torno de 323 K. Todavia não houve distinção entre o modelo SST e k-épsilon em questão da variação de temperatura, apesar de que o modelo SST representou melhor os vetores de velocidade exibido na **Figura 4**.

**Figura 3-** Contornos de temperatura em um corte no plano XY (Modelo *k-ε* SST)



Fonte: Autor, 2021.

**Figura 4-** Vetores de velocidade em um corte no plano XY (Modelo  $k$ - $\epsilon$  SST)

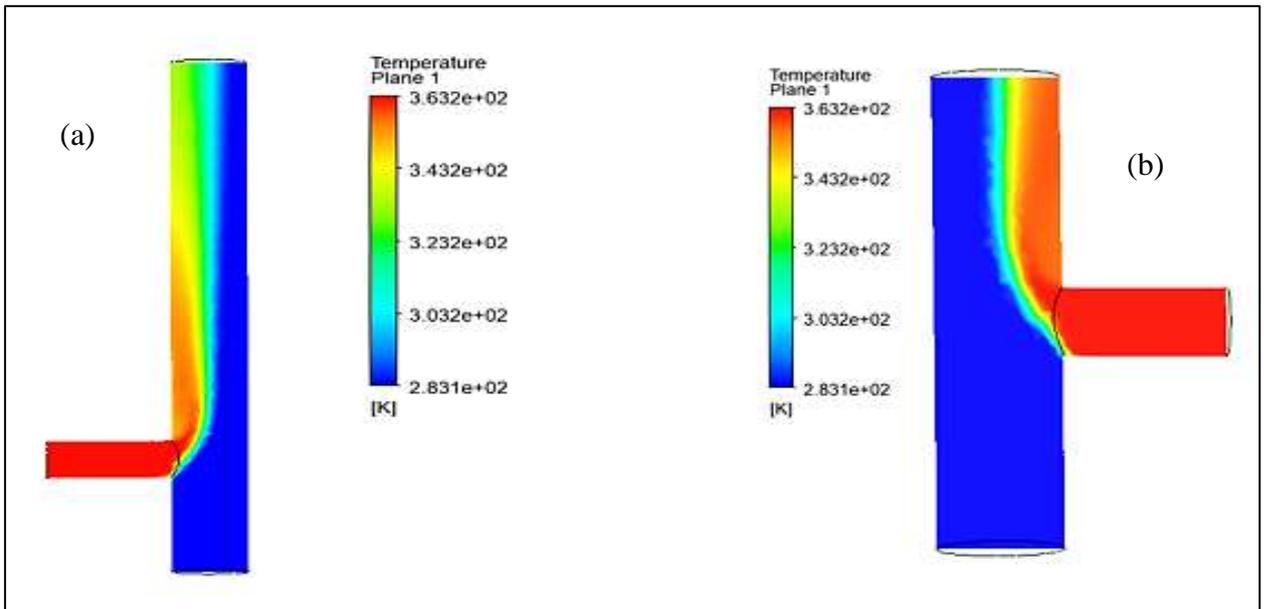


Fonte: Autor, 2021.

Nota-se que a visualização simples do padrão de fluxo mostrado na **Figura 4** nos permite realizar uma análise sobre o comportamento da velocidade do fluido no interior do duto, verifica-se que tanto a imagem **(a)** e **(b)** apresentam um fluxo de velocidade variando de 0 (m/s) a aproximadamente 8 (m/s) em que a água exibe uma maior velocidade no trecho inferior do duto vertical no momento da mistura do fluido quente (água) com fluido frio (água) na junção T, outro detalhe notável é uma região de recirculação, uma das causas para formação de recirculação é a presença de ar onde esse fator pode causar a queda da velocidade no local assim formando um redemoinho (ANSYS INC, 2016). Posto isso o exemplo demonstrado utilizando o modelo  $k$ - $\epsilon$  e turbulência transporte de tensão de cisalhamento pode caracterizar com confiança a variação de temperatura e o deslocamento da água, contudo para alguns estudos que abordam sistemas simples como escoamento monofásico o SST é o mais adequado (FONTOURA, 2014; López, 2017), mas se for para sistemas mais complexos como, por exemplo, tendo mudança de fase o mais indicado por questão de complexidade e esforço computacional é utilizar o  $k$ - $\epsilon$  (VALUS, 2018; SILVA, 2017), porém a depender da máquina que estiver utilizando pode-se utilizar modelos mais complexos para assim ter resultados mais robustos.

Na **Figura 5** apresenta os contornos de temperatura da água sendo azul representando o fluido frio e vermelho o fluido quente onde foi feita uma variação quanto ao comprimento do misturador acrescentando 500 mm na geometria **(a)** tendo como comprimento total igual a 1 m, a geometria **(b)** foi utilizada como base para ser feito a modificação.

**Figura 5-** Contornos de temperatura do T de mistura no plano XY sobre a variação do comprimento

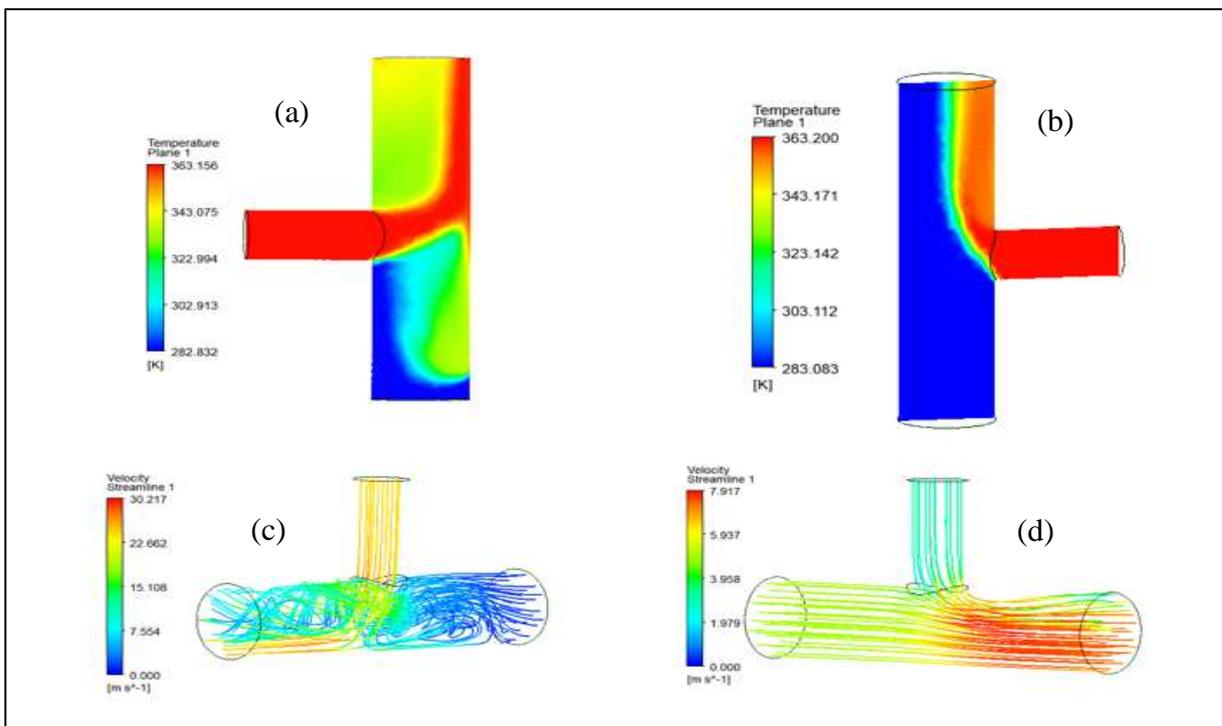


Fonte: Autor, 2021.

De acordo com os contornos de temperatura dos gráficos da **Figura 5**, é perceptível que quando se aumenta o comprimento do tubo a temperatura vai ficando mais homogênea como é exibido na geometria **(a)** e esse tempo de homogeneização está interligado com a velocidade que o fluido quente e o fluido frio que entra nos dutos consequentemente isso vai influenciar no comprimento do misturador, outro ponto que o software deixou claro é que aumentando mais ainda o comprimento da geometria **(a)** a tendência é que o fluido dominante ao decorrer do duto seja o fluido frio.

A **Figura 6** expõe os contornos de temperatura em função da variação de velocidade do fluido quente e do fluido frio e a distribuição da velocidade nas linhas de escoamento do misturador **(a)** e **(b)**. Foi realizado uma modificação sobre a velocidade do fluido quente, aumentando oito vezes e a do fluido frio, diminuindo 4 vezes, tomando como base os parâmetros de velocidade da geometria **(d)**.

**Figura 6-** Contornos de temperatura do T de mistura no plano XY sobre a variação do comprimento



Fonte: Autor, 2021.

Por tanto observa-se que nas linhas de escoamento das distribuições de velocidade da geometria **(c)** demonstra uma turbulência maior do que a geometria **(d)** e isso pode ser comprovado através do cálculo de Reynolds. O misturador **(c)** apresentou um Reynolds =  $2,87E+06$  e o **(d)** =  $4,78E+05$ , essa turbulência discrepante entre **(c)** e **(d)** também causou uma mudança nos contornos de calor de temperatura, essa mudança está relacionado diretamente com o fluido quente que entrou com uma velocidade muito maior em relação ao fluido frio, dessa maneira a transferência de calor do fluido quente para o fluido frio se propagou mais rápido por toda extensão do duto como pode ser visto na **Figura 6-(a)**. Desse modo o software provou que o consegue mudar completamente os resultados a partir das mínimas mudanças feitas pelo operador.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou uma metodologia de como se realizar uma modelagem e simulação de CFD em um misturador do tipo T utilizando os modelos k- $\epsilon$  e SST, porém este método pode ser adotado para qualquer outro sistema monofásico em regime permanente e com escoamento incompressível em escala industrial ou para escala laboratorial. Apesar das limitações da licença estudantil sobre o número de elementos de malha, não impediu que a simulação fosse concluída, visto que a maior dificuldade foi compreender como funciona a física do sistema e assim poder impor as condições termodinâmicas exatas para o *Solver*.

A captação do comportamento físico que a *interface* manifesta ao decorrer do escoamento no duto há a possibilidade de ser extremamente importante para a indústria química, pois com esta categoria de pesquisa é possível não só visualizar o escoamento do fluido, como também determinar melhores condições operacionais para seu transporte podendo ser analisada em diferentes pontos da tubulação, ou seja, acaba propiciando ter um resultado mais criterioso da previsão do comportamento dinâmico de escoamento do fluido. Por tanto para trabalhos futuros aconselha-se fazer uma comparação com uma experimentação real e assim fazer uma analogia dos resultados obtidos de modo a dar uma acuracidade maior ao estudo e determinar qual modelo de turbulência se aproxima da realidade, considerando que a simulação de CFD é uma ferramenta para solucionar um problema.

## 5. REFERÊNCIAS

ANSYS Fluent. **Theory guide** v11.0, Canonsburg, PA, USA, 2009.

ANSYS Fluent. **Theory guide** v15.0, Canonsburg, PA, USA, 2013.

CALDAS, J. N. et al. **Interno de Torres: pratos e recheios**. 2<sup>a</sup>ed., Rio de Janeiro: Interciência Petrobras. 2007. 510 p.

FARIA, S. H. B. **Estudo energético de colunas de destilação através de análise exergetica-sistemas não ideais**. 2003. 199 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, 2003.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. **Computational Methods of Fluid Dynamics**, 3<sup>a</sup> ed. Berlin: Springer Verlag, 423 p. 2002.

FONTOURA, D. V. R.; CARDENAS, S. M.; NUNHEZ J. R. **Avaliação de modelos de turbulência Rans na previsão da perda de carga em reatores de leito poroso preenchido com espuma estruturada utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD)**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), p. 1-12. 2014.

FRASS, A. P.; Ozisik, M. N.: **Heat exchanger Design**. Jhon Wiley & Sons, Inc 1965.

J. U.Brackbill; D. B. Kothe; C. Zemach, “**A Continuum Method for Modeling Surface Tension**,” J. Comput. Phys., p. 335–354, Vol. 100, no. 2 jun. 1992.

KISTER, H. Z. **Distillation design**. 1<sup>a</sup> ed., California, McGraw-Hill. p. 17. 1992.

LÓPEZ, P. P. D. **Simulação computacional de CFD de um pequeno trocador casco e tubo**. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, UNILA, Foz do Iguaçu. 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, 2a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 453 p. 2004.

SILVA, G. A. **Estudo numérico de escoamento bifásico anular utilizando a ferramenta CFD**. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de São Paulo – USP, São Paulo-SP, p.1-104. 2017.

SOARES, **Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação numérica e experimental do escoamento líquido/vapor em colunas de destilação**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, 2005.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**, 1a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008, 459 p.

VALUS G. M. **Fluidodinâmica computacional (cfd) aplicada ao escoamento bifásico líquido-gás do petróleo com base em um modelo** cinético. Tese (Doutora em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas-SP, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 2<sup>a</sup> ed. New York: Prentice Hall, 2007. 503 p.

WANKAT, P. C. **Separation process engineering**. 2 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. 738 p.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. New York: Mc Graw Hill, 2011.