



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (DCT) - CARAÚBAS  
CURSO DE INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

JOSEMAR GONÇALVES MARTINS DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM MISTURADORES  
ESTÁTICOS**

CARAÚBAS

2022

JOSEMAR GONÇALVES MARTINS DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM MISTURADORES  
ESTÁTICOS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Diego David Silva Diniz, Prof. Dr.

CARAÚBAS

2022

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semiárido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

S586a Silva, Josemar Gonçalves Martins.  
Análise do comportamento fluidodinâmico em  
misturadores estáticos / Josemar Gonçalves Martins  
Silva. - 2022.  
54 f. : il.

Orientadora: Diego David Silva Diniz.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2022.

1. Misturador estático. 2. Processo de  
mistura. 3. Fluido. 4. Simulação numérica. I.  
Diniz, Diego David Silva, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Biblioteca Campus Caraúbas  
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues  
CRB: 15/700

JOSEMAR GONÇALVES MARTINS DA SILVA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM MISTURADORES  
ESTÁTICOS**

Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semiárido como requisito  
para obtenção do título de Bacharel  
Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 28 / novembro / 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

**DIEGO DAVID  
SILVA DINIZ:**

Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA  
DINIZ: [REDACTED]  
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ:  
[REDACTED], OU=UFERSA - Universidade  
Federal Rural Do Semi-Arido, O=ICPEdu, C=BR  
Razão: Eu estou aprovando este documento  
Localização: sua localização de assinatura aqui  
Data: 2022.11.28 17:37:23-03'00'  
Foxit PhantomPDF Versão: 10.1.4

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz (UFERSA)  
Presidente

**ROSILDA SOUSA  
SANTOS:**

Assinado de forma digital por ROSILDA  
SOUSA SANTOS [REDACTED]  
Dados: 2022.11.28 20:24:08 -03'00'

Profa. Dra. Rosilda Sousa Santos (UFERSA)  
Membro Examinador

**Rudson de  
Souza Lima**

Assinado de forma digital por  
Rudson de Souza Lima  
Dados: 2022.11.28 21:32:21  
-03'00'

Prof. Dr. Rudson de Souza Lima  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço e dedico este trabalho a minha mãe Hilda Gonçalves Martins da Silva e ao meu pai e melhor amigo Inacio Moreira da Silva.

Agradeço a Banca Examinadora pela disposição e atenção.

Por fim, só me resta deixar, os meus mais profundos agradecimentos por todos que, de alguma forma, colaboraram com a minha chegada até aqui e me ensinaram a ser quem sou.

A todos, gratidão.

“Não importa o que aconteça, continue a nadar”  
(WALTERS, GRAHAM; PROCURANDO NEMO, 2003)

## RESUMO

Atualmente os processos de mistura em grandes empresas, são comumente realizados por meio de tanques com agitadores ou rotores, resultando no alto consumo de energia, na manutenção recorrente, no alto custo de aquisição e na necessidade de mão de obra altamente qualificada. Com isso, uma das alternativas para substituição dos tanques com agitadores é o uso dos misturadores estáticos, que podem ser compostos em uma forma tubular com geometrias internas variadas, cujo seu objetivo principal é promover a mistura de diferentes tipos de fluídos com baixo custo de produção e manutenção. Entretanto, não há uma variedade de estudos que colabore na busca de geometrias que possa otimizar o processo de mistura e assim aumentar a eficiência dos misturadores estáticos, que, quando comparados com os agitadores, é tido como componente de baixa eficiência de processo. No presente trabalho são desenvolvidos misturadores estáticos com geometrias internas diferentes afim de definir o misturador com maior efetividade no que tange o final da mistura, dessa forma, para obtenção de resultados numéricos e predição dos fenômenos presentes no processo, foi utilizado o software ANSYS FLUENT. A análise numérica computacional fez-se necessária para a obtenção de dados precisos sobre a viabilidade de execução do projeto. Dessa forma, com o auxílio do software é possível determinar a geometria de um misturador que apresente a maior eficiência dentre as geometrias estudadas.

**Palavras-chave:** Misturador estático. Processo de mistura. Fluido. Simulação numérica.

## ABSTRACT

Currently the mixing processes in large companies, are commonly performed by tanks with agitators or rotors, resulting in high energy consumption, recurrent maintenance, high cost of acquisition and the need for highly skilled labor. With this, one of the alternatives to replace tanks with agitators is the use of static mixers, which can be composed in a tubular form with varied internal geometries, whose main objective is to promote the mixing of different types of fluids with low production and maintenance costs. However, there are not a variety of studies that collaborate in the search for geometries that can optimize the mixing process and thus increase the efficiency of static mixers, which, when compared to agitators, is considered a component of low process efficiency. In the present work, static mixers with different internal geometries are developed in order to define the mixer with the greatest effectiveness in terms of the end of the mixture. In this way, to obtain numerical results and predict the phenomena present in the process, the ANSYS FLUENT software was used. The computational numerical analysis was necessary to obtain accurate data about the feasibility of the project execution. Thus, with the help of the software it is possible to determine the geometry of a mixer that presents the highest efficiency among the geometries studied.

**Keywords:** Static mixer. Mixing process. Fluid. Numerical simulation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Misturador dinâmico MR series .....                                                         | 17 |
| Figura 2 - Tanque com agitador (modelo 1).....                                                         | 18 |
| Figura 3 - Tanque com agitador (modelo 2).....                                                         | 18 |
| Figura 4 - Misturador Kenics KM .....                                                                  | 19 |
| Figura 5 - Misturador estático helicoidal .....                                                        | 20 |
| Figura 6 - Misturador estático dentro de um tubo com defletores.....                                   | 21 |
| Figura 7 – Representação do funcionamento Interno do Misturador Estático .....                         | 22 |
| Figura 8 - Funcionamento do misturador estático. ....                                                  | 23 |
| Figura 9 - Misturador S cruzado (a), misturador S triplo cruzado (b). ....                             | 24 |
| Figura 10 - Misturador a jato.....                                                                     | 25 |
| Figura 11 - Principais aplicações dos misturadores estáticos.....                                      | 26 |
| Figura 12 - Fluxograma com as etapas necessárias para uso do CFD .....                                 | 27 |
| Figura 13 – Resultado da simulação de um simulador estático do tipo Kenics. ....                       | 28 |
| Figura 14 - Etapas do estudo .....                                                                     | 30 |
| Figura 15 - Dimensões das geometrias dos espaçadores em milímetros .....                               | 30 |
| Figura 16 - Geometria base para análise (sem misturador) com dimensões em milímetros....               | 31 |
| Figura 17 - Modelo de geometria 1 .....                                                                | 31 |
| Figura 18 - Modelo de geometria 2 .....                                                                | 31 |
| Figura 19 - Modelo de geometria 3 .....                                                                | 31 |
| Figura 20 - Malha da geometria base.....                                                               | 32 |
| Figura 21 - Malha do modelo de geometria 1 .....                                                       | 33 |
| Figura 22 - Malha do modelo de geometria 2 .....                                                       | 33 |
| Figura 23 - Malha do modelo de geometria 3 .....                                                       | 34 |
| Figura 24 - Desenho esquemático 2D do domínio computacional e as condições de contorno utilizadas..... | 36 |
| Figura 25 - Análise de pressão sem misturador.....                                                     | 38 |
| Figura 26 - Análise de temperatura sem misturador.....                                                 | 39 |
| Figura 27 - Análise de velocidade sem misturador.....                                                  | 39 |
| Figura 28 – Análise dos vetores sem misturador.....                                                    | 40 |
| Figura 29 – Análise dos vetores com o misturador 1.....                                                | 41 |
| Figura 30 - Análise de pressão com o misturador 1 .....                                                | 41 |
| Figura 31 - Análise de temperatura com o misturador 1.....                                             | 42 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32 - Análise de velocidade com o misturador 1 ..... | 42 |
| Figura 33 – Análise dos vetores com o misturador 2.....    | 43 |
| Figura 34 - Análise de pressão com o misturador 2 .....    | 43 |
| Figura 35 - Análise de temperatura com o misturador 2..... | 44 |
| Figura 36 - Análise de velocidade com o misturador 2 ..... | 44 |
| Figura 37 - Análise dos vetores com o misturador 3 .....   | 45 |
| Figura 38 - Análise de pressão com o misturador 3 .....    | 45 |
| Figura 39 - Análise de temperatura com o misturador 3..... | 46 |
| Figura 40 - Análise de velocidade com o misturador 3 ..... | 46 |

## **LISTA DE GRÁFICOS**

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Estabilização da temperatura final da mistura ..... | 47 |
| Gráfico 2 - Perda de pressão.....                               | 48 |
| Gráfico 3 - Fator de performance do misturador .....            | 49 |

## **LISTA DE QUADROS**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Métodos de discretização utilizados na solução numérica ..... | 37 |
|--------------------------------------------------------------------------|----|

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Descrição dos principais tipos de misturadores estáticos.....               | 21 |
| Tabela 2 - Propriedades da água em condições normais T e P (298,15 K e 101325 Pa)..... | 36 |
| Tabela 3 – Condições iniciais empregadas nas simulações .....                          | 37 |

## SUMÁRIO

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                     | <b>15</b> |
| <b>2 OBJETIVOS.....</b>                                      | <b>16</b> |
| 2.1 Objetivos Geral.....                                     | 16        |
| 2.2 Objetivos Específicos.....                               | 16        |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                           | <b>17</b> |
| 3.1 Misturadores .....                                       | 17        |
| 3.2 Modelos de misturadores estáticos .....                  | 20        |
| 3.3 Funcionamento dos misturadores estáticos.....            | 21        |
| 3.4 Estudos desenvolvidos sobre misturadores estáticos ..... | 23        |
| 3.5 Principais aplicações dos Misturadores Estáticos.....    | 26        |
| 3.6 Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) .....            | 26        |
| <b>4 METODOLOGIA .....</b>                                   | <b>29</b> |
| 4.1 Metodologia numérica aplicada.....                       | 29        |
| 4.2 Geometria do domínio computacional .....                 | 30        |
| 4.3 Malhas numéricas utilizadas.....                         | 32        |
| 4.4 Equações governantes .....                               | 34        |
| 4.5 Condições de contorno .....                              | 35        |
| 4.6 Propriedades do fluido água .....                        | 36        |
| 4.7 Solução numérica .....                                   | 36        |
| <b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>                         | <b>38</b> |
| 5.1 Analise do modelo de geometria 1 .....                   | 40        |
| 5.2 Analise do modelo de geometria 2 .....                   | 43        |
| 5.3 Analise do modelo de geometria 3 .....                   | 45        |
| 5.4 Comparação entre as geometrias estudadas .....           | 47        |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>                                    | <b>50</b> |
| <b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>              | <b>51</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                      | <b>52</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os misturadores estáticos surgiram no final da década de 1950 e vêm se tornando uma opção para substituir os misturadores dinâmicos, visto que apresentam um melhor custo benefício e uma vantagem energética quando comparados aos misturadores dinâmicos, isso devido utilizarem apenas a energia do próprio fluido em movimento o que lhe permite não ter partes móveis, descartando também a necessidade de manutenções periódicas com alta frequência.

Os misturadores estáticos podem ser aplicados em processos por batelada, em recirculação, ou em processos contínuos. Em diversas aplicações, estes misturadores caracterizam-se como uma alternativa ao emprego de tanques agitados convencionais, dispensando os investimentos em acionamentos, caixas redutoras, sistemas de selagem, eixos-árvores, impelidores, tanques e instalações, uma vez que a mistura pode ser efetuada em linha, no interior das tubulações (JUNIOR, 2008). Podendo ser empregados em diversas finalidades, o uso dos misturadores estáticos pode ser usualmente encontrado no processo da produção de emulsões, na mistura de líquidos miscíveis, na formação de soluções ou suspensões e a aceleração de troca térmica (SANT'ANNA, 2012).

De acordo com Joaquim Jr (2000), no Brasil inexitem estudos publicados sobre estes aparatos, bem como não é conhecida nenhuma empresa que os produza ou comercialize com tecnologia nacional. Suas aplicações em nossas indústrias de processos são restritas e recentes, dependem de tecnologia de desenvolvimento e de aplicação estrangeiras, encarecendo e dificultando seu uso.

Dessa forma, visando a análise dos comportamentos hidrodinâmicos gerado pelos misturadores, diversos estudos optam pelo uso dos métodos computacionais, nos quais pode-se destacar as ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*), por ser uma forma ágil e de baixo custo quando comparada análises experimentais, que possibilitam visualizar e compreender os padrões de fluxo promotores da mistura. Dessa forma, de acordo com Joaquim Júnior (2008), a versatilidade em adquirir informações sobre as distribuições de velocidades, pressões, temperaturas, entre outras grandezas ou propriedades do escoamento em uma determinada região de um sistema agitado, faz com que a utilização da técnica CFD seja vasto. Mediante aos resultados numéricos alcançados por meio de simulações em CFD é capaz de otimizar o projeto, aumentando seu desempenho e suavizando seus custos, uma vez que é tornar mínimo a necessidade de ensaios experimentais, os quais servirão como

métodos de validação dos modelos das simulações executadas. Assim, essa técnica de CFD permite ainda a determinação da predição do comportamento local dentro do sistema de mistura.

Assim, nesse contexto, este trabalho propõe estudar os misturadores estáticos, através de simulações computacionais baseados em volumes finitos. Essas simulações têm como intuito analisar a influência de parâmetros de operação e da geometria nos fenômenos presentes no processo de modo a buscar a otimização do componente a ser estudado.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Geral**

Realizar estudo investigativo para análise do comportamento fluidodinâmico de misturadores estáticos com diferentes geometrias internas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar o levantamento bibliográfico sobre a fluidodinâmica em misturadores estáticos;
- Realizar estudo sobre os benefícios de se utilizar um misturador estático frente a um misturador dinâmico;
- Construir uma metodologia computacional e desenvolver a modelagem numérica para o objeto de estudo deste trabalho;
- Testar diferentes processos e formas geométricas em um misturador estático;
- Identificar, através de métricas, a melhor geometria de misturador para misturar líquidos de temperaturas diferentes.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Misturadores

Denominada como a junção de duas ou mais substâncias, sejam elas simples, sejam compostas, sem que ocorra uma transformação química desses compostos, a mistura é algo que está o tempo todo presente nas nossas vidas, desde o café com leite, a água com a polpa do suco, o ar com combustível no carro entre outras.

A mistura é uma operação unitária comum em um grande número de processos e é comumente utilizada em muitas aplicações diferentes onde um grau definido de homogeneidade de um líquido é desejado. Os dispositivos de mistura mais comuns são misturadores dinâmicos e misturadores estáticos (MYERS et al., 1997).

Também conhecido como reator de batelada, os misturadores dinâmicos, se tratam de equipamentos utilizados em processos industriais para diversas operações, geralmente sendo constituído por um agitador e sistema integrado de aquecimento ou resfriamento, onde o agitador, comumente, tem em sua estrutura um eixo de transmissão, onde nele são montadas lâminas na parte inferior e possui uma unidade propulsora na parte superior, como o modelo exposto na Figura 1.

**Figura 1** - Misturador dinâmico MR series



**Fonte:** Directindustry (2022)

A maioria dos processos de mistura nas grandes empresas são realizados por meios de tanques com agitadores ou impulsores (Figura 2 e Figura 3), geralmente em trocas térmicas, aeração, dissolução de sólidos e entre outras aplicações. Os agitadores para tanques possuem um eixo rotativo que suporta os elementos de mistura, denominados impelidores, sendo estes os responsáveis por promover a agitação dos produtos líquidos, mas ainda assim esse tipo de misturador acaba acarretando um elevado consumo de energia, necessidade de uma manutenção periódica, alto custo de aquisição e mão de obra especializada.

**Figura 2** - Tanque com agitador (modelo 1).



**Fonte:** Soluções industriais

**Figura 3** - Tanque com agitador (modelo 2).



**Fonte:** MobilBatch

Dessa forma, os misturadores estáticos se sobressaem desses equipamentos do tipo agitadores. Fernandes (2005) defende que os misturadores estáticos estabelecem uma alternativa importante aos tradicionais vasos agitados, sendo aplicados nos processos por batelada e em processos contínuos.

Os misturadores estáticos, também conhecidos como misturadores de linha, são promotores de turbulência, que apresentam como vantagens em relação aos misturadores dinâmicos o fato de não possuírem peças móveis, de necessitarem de menos espaço, de terem baixo ou nenhum custo de manutenção e de terem baixo tempo de residência (próximo a 1 segundo). Além de apresentarem disponibilidade para aplicação em diferentes condições de funcionamento, em regimes laminar, transição e turbulento do fluxo (MÅRTEN et al., 2006). Na Figura 4 se tem um exemplo de misturador estático amplamente utilizado na indústria.

**Figura 4 - Misturador Kenics KM**



**Fonte:** Chemineer (2018) e Chemineer (2014).

O misturador estático mais antigo de que se tem notícia é de autoria e patente de Sutherland (1874), que desenvolveu um misturador de elemento único estático multicamada indicado para misturar ar com um combustível gasoso. No início do século passado Petrole (1931), apresenta uma patente de um misturador com elementos helicoidais alinhados em um tubo para promover a mistura. Um pulverizador ou misturador estático para gases de abastecimento de motores de combustão interna foi apresentado por Blanchard (1933) e mais tarde Bakker (1949), estende a aplicação para a mistura de sólidos granulares.

### 3.2 Modelos de misturadores estáticos

Dentre os principais modelos de misturadores estáticos presentes atualmente no mercado, se tem o misturador estático helicoidal (Figura 5), o qual possui deflectores que são helicoidalmente moldados e cortados em seções em que uma pequena modificação de rotação permite o fluido de mistura. Sendo chamado de divisão de fluxo, permite que a estratificação aumente exponencialmente a mistura do fluido. Um misturador estático helicoidal é geralmente utilizado para a mistura e aplicação de materiais adesivos para uma variedade de campos e disciplinas.

**Figura 5** - Misturador estático helicoidal



**Fonte:** Directindustry

Outro modelo que se tem é o dos misturadores estáticos dentro de tubo cilíndrico com deflectores (Figura 6), o qual funciona muito bem com líquidos viscosos que reagem e formam um outro líquido viscoso ou um produto sólido. As resinas sintéticas, seriam um exemplo deste tipo de produto que podem ser dispensadas e entregues a determinados locais onde vão endurecer para uma condição polimerizada.

**Figura 6** - Misturador estático dentro de um tubo com defletores.



**Fonte:** Directindustry

Além destes já expostos há também modelos de misturadores estáticos com um desenho da lâmina, que aparecem principalmente em aplicações de baixa e média viscosidade. Neles, defletores do mixer também giram, o que aumenta a quantidade de mistura. Outro tipo de misturador estático é o estilo bolacha, onde os produtos químicos com viscosidade de luz são misturados em fluxos de água com alta velocidade. Na tabela 1, há uma breve descrição das características de alguns tipos de misturadores estáticos.

**Tabela 1** - Descrição dos principais tipos de misturadores estáticos.

| <b>Tipo de SM</b> | <b>Características</b>                                    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|
| Kenics            | torção esquerda direita; ângulo da torção 180° da lâmina. |
| LPD               | rotação direita-esquerda; ângulo do cruzamento de 90°.    |

**Fonte:** Han et al.(2012)

### 3.3 Funcionamento dos misturadores estáticos

Os misturadores são compostos por elementos defletores montados dentro de túneis de tubulação. A mistura ocorre quando o escoamento é difundido ao passar pelos elementos do

misturador. A energia utilizada na mistura é derivada da perda do fluido aerodinâmico e da dificuldade de forças mecânicas ou gravitacionais (JOAQUIM JÚNIOR, 2008).

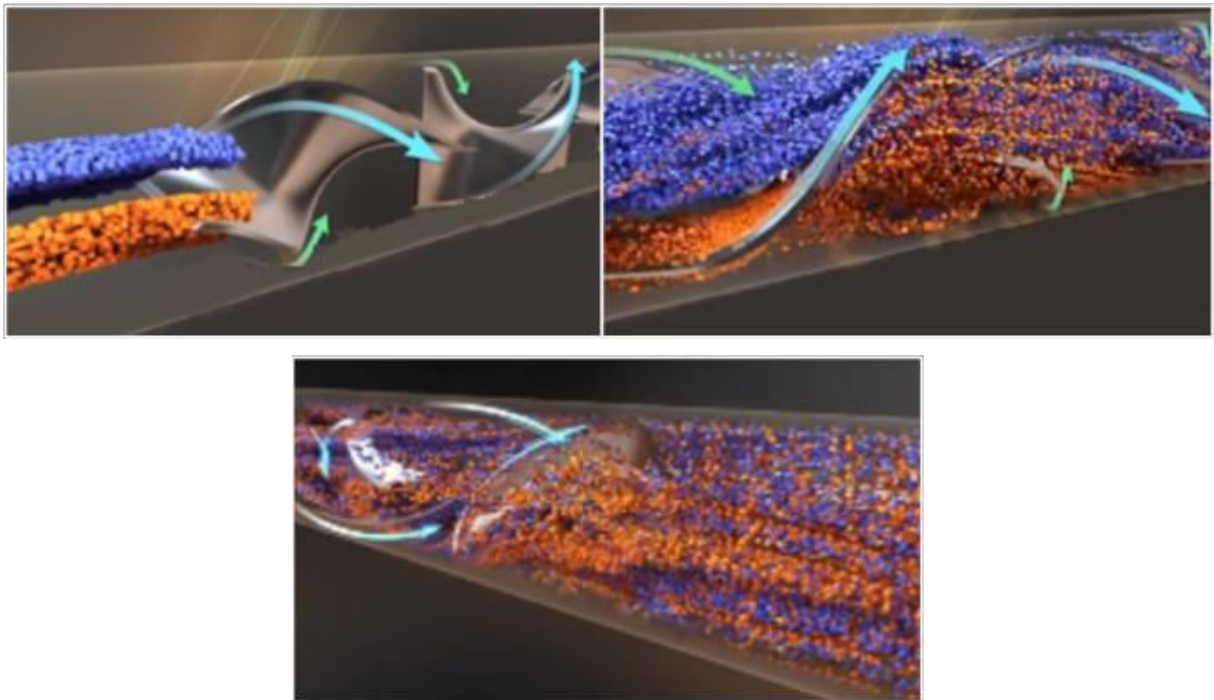
Na maioria das vezes, os fluidos misturados em um misturador estático são dois líquidos ou um gás e um líquido. Os fluidos de mistura não precisam necessariamente ser reativos e, por vezes, o processo resulta em uma mistura simples ou composta.

O desempenho de um misturador depende de diversos critérios. Historicamente, os misturadores estáticos têm sido primeiro avaliados com base na sua perda de carga. Os parâmetros da eficiência de mistura têm sido inseridos baseados na variação de concentração, no tempo de residência e na turbulência do fluxo (DAMIEN et al., 1998)

No final da década de 50, os primeiros misturadores estáticos foram desenvolvidos para fluidos viscosos, porém, somente nos anos 70 é que se iniciou um processo de estudos e pesquisas consistentes (PAHL & MUSCHELKNAUTZ, 1982).

De acordo com a empresa Natural Ambiente (2011), o processo de mistura em misturadores estáticos pode ser compreendido quando se relacionam as variáveis de queda de pressão, distribuições de velocidade, tempo de resistência, fator atrito, viscosidade e outras relações de fase na homogeneização do misturador estático (Figura 7).

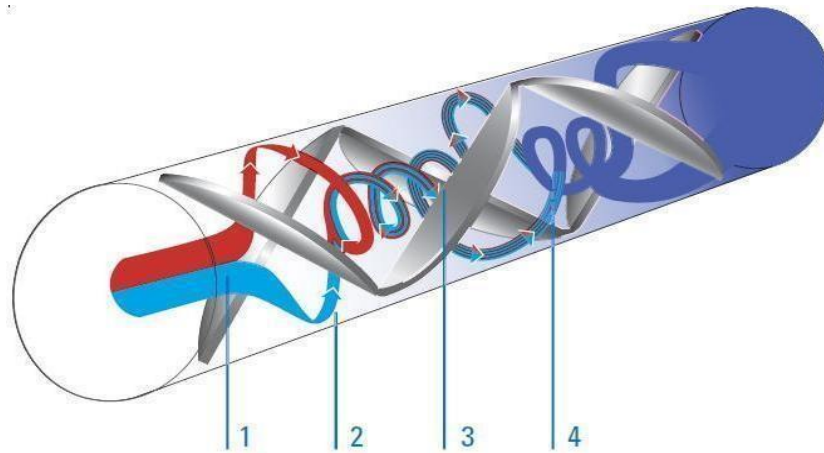
**Figura 7** – Representação do funcionamento Interno do Misturador Estático



**Fonte:** Snatural (2022)

Conforme mostra a Figura 8, na fase de homogeneização ocorrem as etapas de divisão do Fluxo (1); o fluxo é dividido e reforçado contra as paredes opostas (2); desenvolvimento de um vórtice de mistura (3); divisão do vórtice na fase 1 com rotação Inversa (4).

**Figura 8** - Funcionamento do misturador estático.



Fonte: SNatural Ambiente, 2011.

### 3.4 Estudos desenvolvidos sobre misturadores estáticos

Diferentemente de Damien et al.(1998), que estudou a utilização de misturadores estáticos em regime limiar, os estudos de Andreas et al.(2012) visaram a quantificação da mistura do fluxo em macro escalas (macromisturas), bem como as misturas induzidas pela difusão molecular em pequenas escalas (micromisturas) e desenvolveram um procedimento experimental que é baseado em medidas simultâneas de DoisTracer-PLIF (2TPLIF). A fim de investigar a relação entre misturas e campos da velocidade, realizaram simultaneamente as medidas adicionais de velocidade da imagem da partícula (PIV) com 2TPLIF. Mediram a eficiência de mistura calculando o índice da segregação e analisaram os resultados usando a transformação rápida de Fourier a fim de identificar as frequências características dos vórtices induzidos pelo misturador estático.

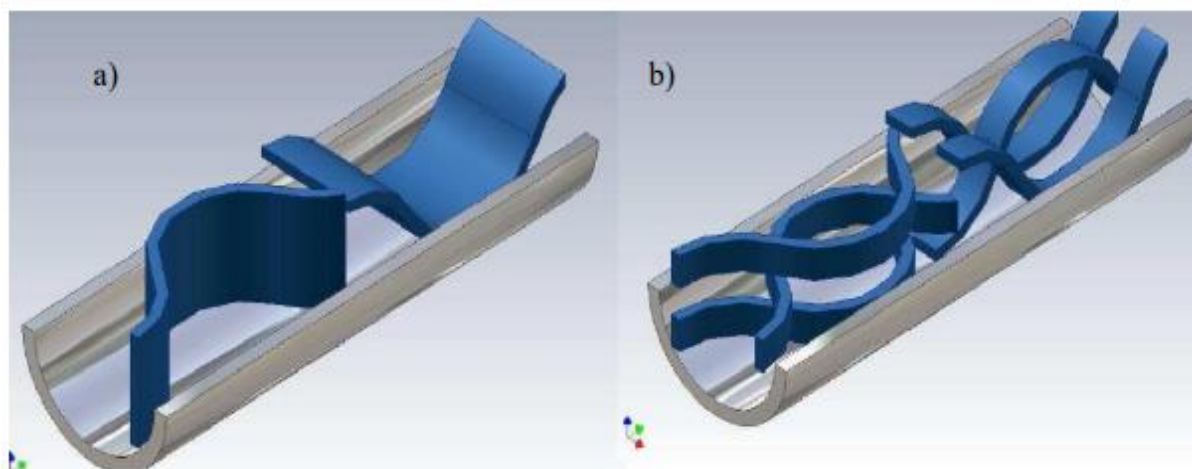
Rauline et al. (2000) estudaram o desempenho de dois misturadores estáticos comerciais no regime laminar (Kenics da Chemineer e SMX da Koch Engenharia). Estes misturadores estáticos foram comparados usando as simulações 3D numéricas. Diversos critérios foram escolhidos como a base para a avaliação de desempenho, a saber: a perda de carga, o

comprimento do misturador, o expoente de Lyapunov e a intensidade da segregação e concluíram que a eficiência de mistura do SMX é melhor do que a do Kenics.

O Estudo da transferência de calor utilizando misturadores estáticos em polímeros foi realizado por Haifeng et al.(2011). A eficiência de troca térmica de um misturador estático tipo Kenics, foi estudada por Lisboa (2010). Seus resultados numéricos mostraram que o misturador estático tem uma eficiência térmica mais de três vezes maior do que aquela de um trocador de calor convencional de tubulação vazia com área similar de transferência de calor.

Joaquim Júnior (2008) realizou um trabalho com objetivo de aplicar as técnicas de CFD possibilitando uma melhor compreensão dos fenômenos que regem o escoamento de fluidos no interior de misturadores estáticos, especificamente desenhados para esta análise, permitindo sugerir e estudar seus desenhos, propondo soluções e modificações afim de melhorar a mistura e minimizar o gasto de energia no processo. As performances encontradas para as geometrias simuladas permitem seu emprego em condições reais de aplicação na indústria. A Figura 9 abaixo mostra os dois modelos estudados.

**Figura 9** - Misturador S cruzado (a), misturador S triplo cruzado (b).



**Fonte:** Joaquim Júnior, 2008.

Os misturadores de jatos (Figura 10) foram introduzidos na engenharia química, principalmente nas últimas duas décadas, sendo um dos dispositivos mais utilizados para mistura devido à sua geometria simples e fácil operação (YOUSUF, 2013).

**Figura 10** - Misturador a jato



**Fonte:** GEA (2021)

Segundo Etchells III e Meyer (2004), todos os misturadores estáticos utilizam o princípio de divisão do escoamento em correntes secundárias, as quais são distribuídas radialmente e recombinadas em uma sequência reordenada. O número de camadas do escoamento é aumentado e sua espessura é diminuída a cada passagem pelos sucessivos elementos do misturador.

Godfrey (1985) refere que a energia para a mistura é decorrente da perda de carga gerada pela passagem do fluido pelos elementos de mistura.

Na procura de um misturador estático ideal, a análise numérica tem um papel importantíssimo pois permite uma melhor compreensão dos fenômenos, balanceando entre custo, tempo e qualidade. A análise numérica trabalha problemas do cotidiano modelados matematicamente e apresentam como resultado soluções numéricas eficientes para determinados problemas.

Os métodos numéricos têm o objetivo de resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Algumas de suas vantagens, em relação a outros métodos, é que ao criar suas equações aproximadas, esse método realiza um balanço da propriedade em nível de volumes elementares que devem ser satisfeitos para qualquer tamanho de malha, ou seja, todos os princípios de conservação podem ser checados em uma malha grosseira, tornando as execuções no computador mais rápidas (MALISKA, 1995).

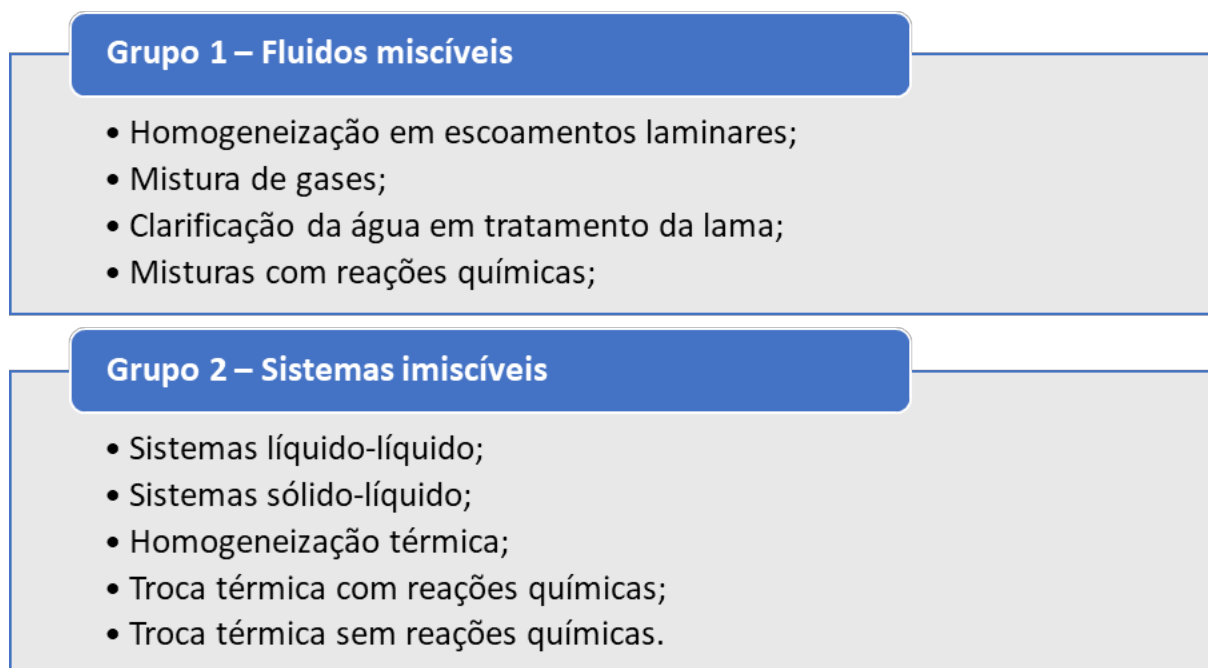
Yousuf (2013) demonstra que os parâmetros geométricos dos misturadores têm uma influência significativa na dinâmica do escoamento, juntamente com o impacto esperado pelo aumento do número de Reynolds no escoamento, avaliado entre 50 e 600.

### 3.5 Principais aplicações dos Misturadores Estáticos.

Utilizados em aplicações industriais para homogeneização e mistura de líquidos diferentes, de gases, além de gases com líquidos ou sólidos granulados, ou mesmo com ambos, os misturadores estáticos têm ampla aplicação, e segundo Naturaltec (2022), cada uma dessas aplicações e vazão identifica um tipo de geometria interna do misturador, além do número de seções ou comprimento do misturador e o diâmetro, de forma que não exceda um nível de pressão admissível para que haja o melhor desempenho em mistura e dissolução. Para Naturaltec (2022), suas principais aplicações são nas misturas químicas, no tratamento de água, na mistura de óleo cru, na dessalinização bruta e na injeção de aditivos.

Thakur et al. (2003) caracteriza as principais aplicações em dois grupos distintos, os quais podem ser visualizados na Figura 11.

**Figura 11** - Principais aplicações dos misturadores estáticos



**Fonte:** Thakur et al. (2003)

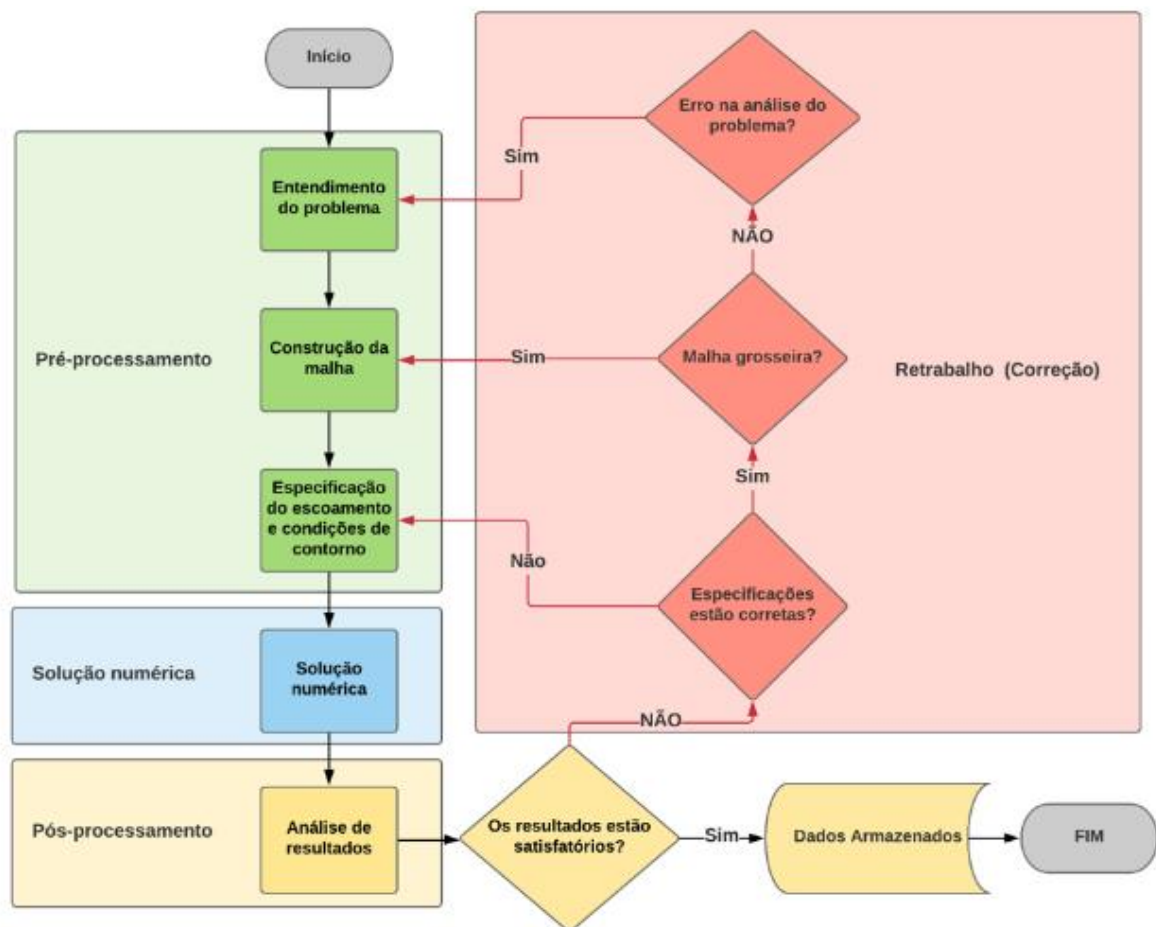
### 3.6 Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)

Sendo uma das técnicas numéricas mais utilizados para análise dos perfis de escoamento do fluxo e seu comportamento hidrodinâmico, a CFD é utilizada em diversos segmentos do

mercado, apoiando projetos e fabricação de centenas de produtos e equipamentos industriais, visto que, segundo ESSS (2016), pode ser utilizada desde a fase conceitual de um projeto, como auxílio para determinar a viabilidade e a melhor solução de um produto, até sua etapa de produção, permitindo analisar diversos cenários.

Para Diniz (2021) o emprego do CFD no desenvolvimento de pesquisa requer a realização das atividades exibidas no fluxograma da Figura 12, onde é possível notar a formação de 3 subgrupos, os quais são divididos entre, antes da solução numérica (pré-processamento), a solução numérica (processamento) e depois desta (pós-processamento).

**Figura 12** - Fluxograma com as etapas necessárias para uso do CFD

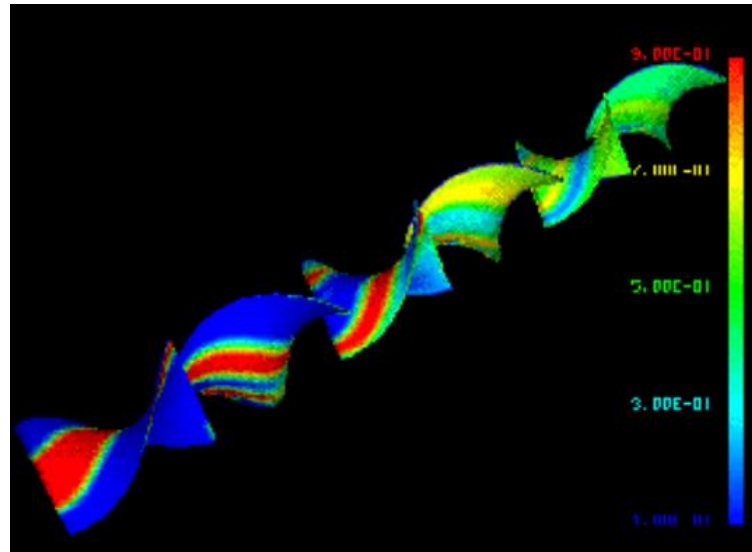


**Fonte:** Diniz (2021)

Um dos estudos que utilizaram CFD em análise de desempenho de misturadores estáticos foi apresentado por Bakker *et al.* (1998), no qual observaram o fluxo laminar em misturadores estáticos com geometrias helicoidais utilizando a métodos numéricos da fluidodinâmica computacional. Foram estudados a forma e o comportamento de fluxo, a perda de carga e as propriedades de mistura do misturador estático Kenics. Dessa forma, este misturador é composto por uma de uma série de geometrias helicoidais, realizando uma mistura

alternada da direita e da esquerda em ângulos de  $180^\circ$ . Os elementos são dispostos de modo a possuir uma perpendicularidade entre arestas de um helicoidal com sua subsequente. Um dos resultados pode ser visto na Figura 13. As simulações possibilitaram ter um melhor entendimento na predição do comportamento do fluxo deste tipo misturador, sendo possível estimar se as perdas de carga foram compatíveis com aquelas disponíveis na literatura.

**Figura 13** – Resultado da simulação de um simulador estático do tipo Kenics.



Fonte: Bakker *et al.* (1998) e Joaquim Júnior. (2008)

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Metodologia numérica aplicada**

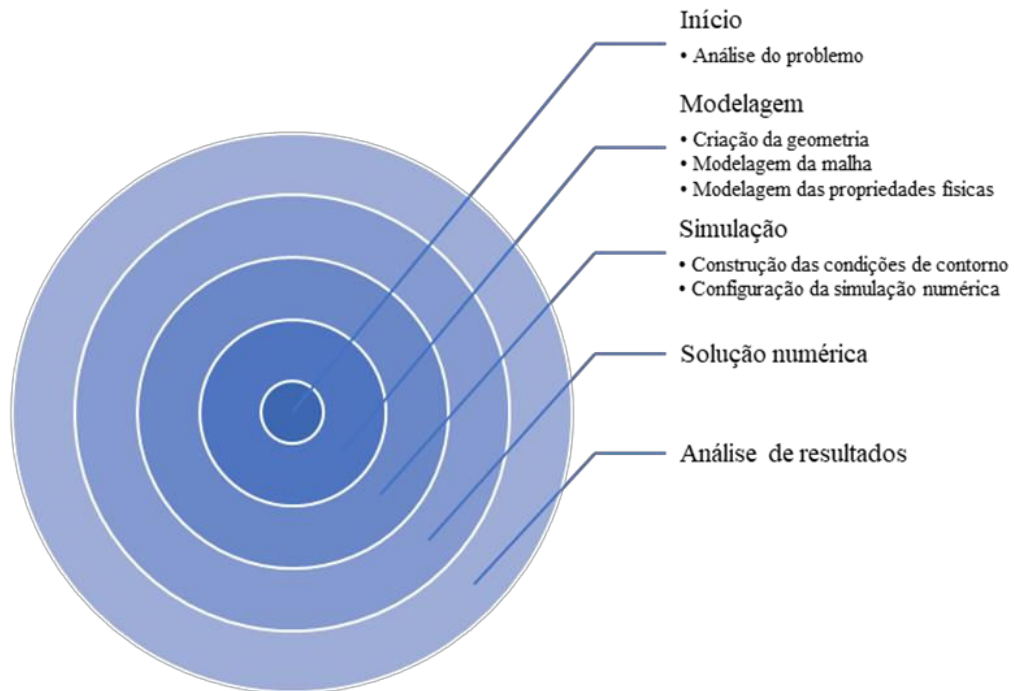
Para o estudo investigativo visando a análise do comportamento fluidodinâmico de misturadores estáticos com diferentes geometrias internas, foi determinada a necessidade de construir uma metodologia computacional e desenvolver a modelagem numérica para o objeto de estudo deste trabalho.

Então, foram realizados levantamentos bibliográficos sobre a fluidodinâmica em misturadores estáticos, analisando os benefícios de se utilizar este tipo de misturador no lugar do misturador dinâmico. A veracidade desses benefícios pode ser testada pela análise de variados processos e formas geométricas em um misturador estático, e assim, também pode ser identificada, através de métricas, a melhor geometria de misturador para misturar líquidos de temperaturas diferentes.

Para a modelagem e solução numérica, foi utilizado o ANSYS FLUENT, software de CFD conhecido por seus recursos avançados de modelagem física e precisão e o uso de método de volumes finitos. Enquanto que para a construção da geometria e da malha, foi utilizado o ANSYS ICEM CFD, por fornecer geração de malha mais flexível, bem como diagnóstico de malha e funções de reparo úteis para uma análise profunda. O ANSYS ICEM CFD e o FLUENT são dois softwares que conseguem se comunicar entre si sem que ocorram problemas de compatibilidade, e são comumente empregados conjuntamente em vários trabalhos no que diz respeito à aplicação em simulação numérica, como por exemplos nos trabalhos de Diniz (2021), Ahmad et al. (2005) e Amokrane (2015).

A metodologia aplicada neste trabalho seguiu-se então as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 14, sendo que, dentre essas etapas destacam-se o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento.

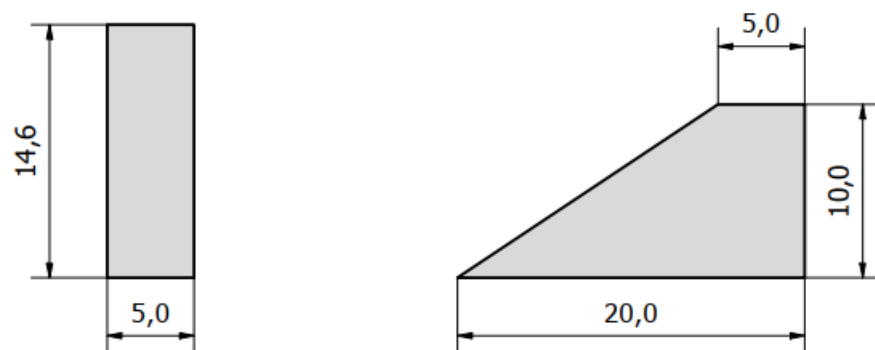
Essa metodologia foi então utilizada para a obtenção da simulação de três geometrias diferentes, para a verificação de qual apresenta a maior eficiência na mistura térmica entre dois fluidos (frio e quente).

**Figura 14** - Etapas do estudo

**Fonte:** Autoria própria

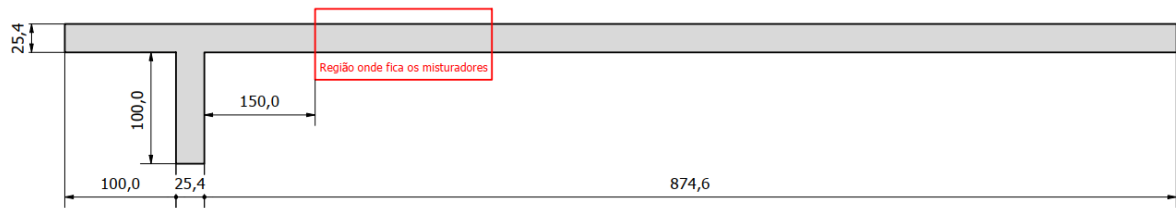
## 4.2 Geometria do domínio computacional

As geometrias do estudo numérico foram realizadas no software ANSYS ICEM CFD em que foram consideradas geometrias bidimensionais para o referido trabalho, as quais tiveram suas dimensões baseadas nos trabalhos de SANT'ANNA (2012), Bakker (1998) e Ouregani (2021), e podem ser vistas na Figura 15 e na Figura 16.

**Figura 15** - Dimensões das geometrias dos espaçadores em milímetros

**Fonte:** Autoria própria

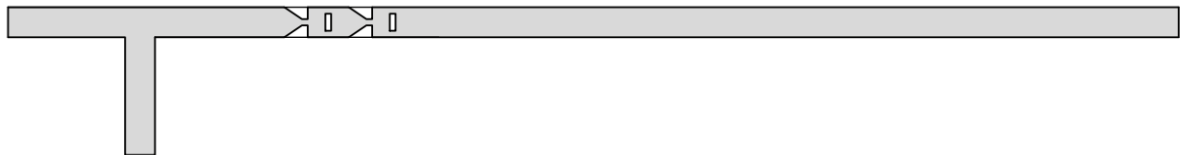
**Figura 16** - Geometria base para análise (sem misturador) com dimensões em milímetros



**Fonte:** Autoria própria

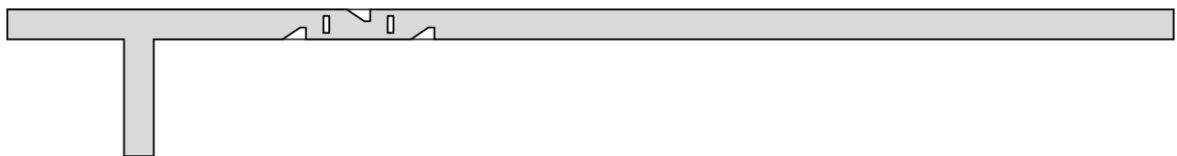
Com essas geometrias bidimensionais citadas anteriores foram então desenvolvidas três modelos de geometrias para análise, sendo essas apresentadas na Figuras 17, Figura 18 e Figura 19. O local em que inicia o posicionamento dos espaçadores é a mesma para os três domínios, o que varia entre elas, são os arranjos dos espaçadores retangulares e trapezoidais, em que a distância entre esses espaçadores também é a mesma de 10 mm.

**Figura 17** - Modelo de geometria 1



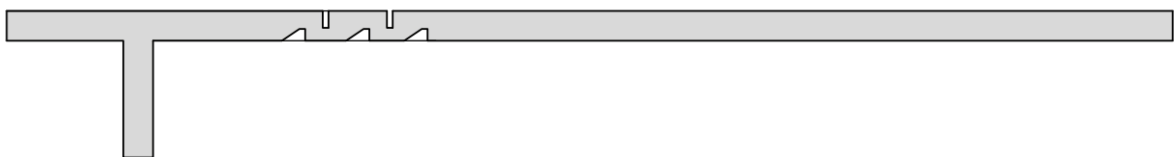
**Fonte:** Autoria própria

**Figura 18** - Modelo de geometria 2



**Fonte:** Autoria própria

**Figura 19** - Modelo de geometria 3



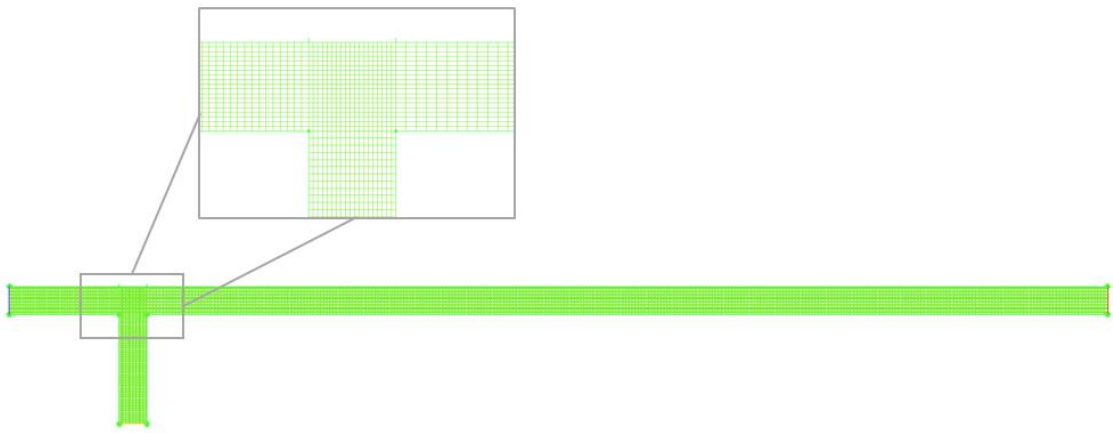
**Fonte:** Autoria própria.

### 4.3 Malhas numéricas utilizadas

As malhas numéricas foram construídas empregando o software ANSYS ICEM CFD15.0, com base no trabalho de Diniz (2021), sendo utilizado a ferramenta *quality* (disponível no ICEM CFD) para avaliar a qualidade das malhas escolhidas. Com isso, foi determinado que as malhas selecionadas deveriam possuir valores acima de 0,8 para esse critério.

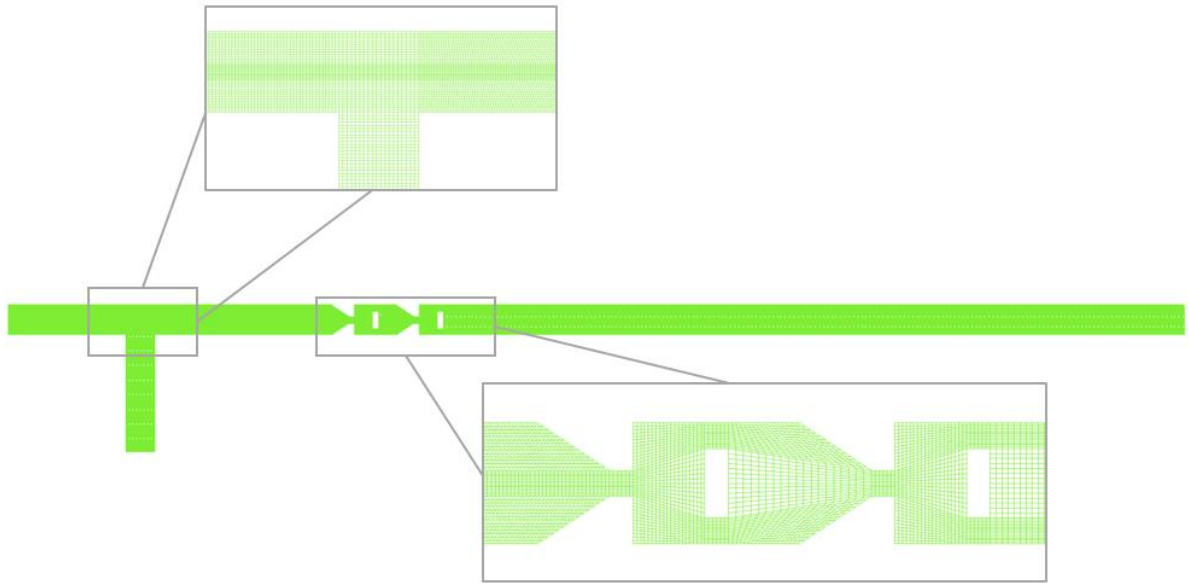
Dessa forma, a malha da geometria base terá um total de elementos de 8774 quadriláteros, sendo apresentada na Figura 20, a da geometria 1 um total de elementos de 41337 quadriláteros, sendo apresentada na Figura 21. Já a malha da geometria 2 terá um total de elementos de 42489 quadriláteros, sendo apresentada na Figura 22, enquanto que a malha da geometria 3 terá um total de elementos de 56945 quadriláteros, sendo apresentada na Figura 23.

**Figura 20** - Malha da geometria base



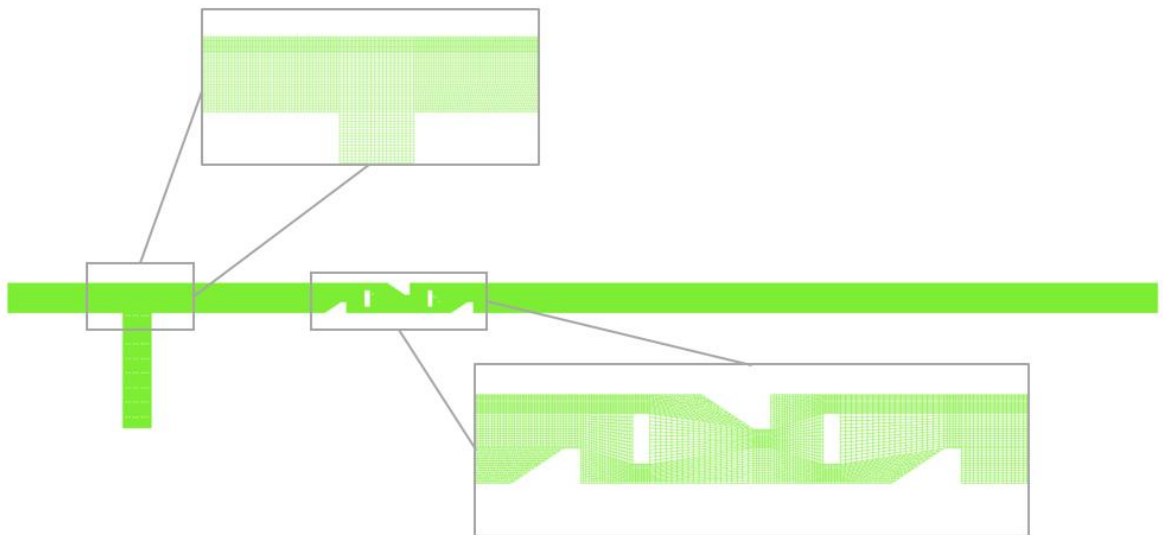
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 21** - Malha do modelo de geometria 1

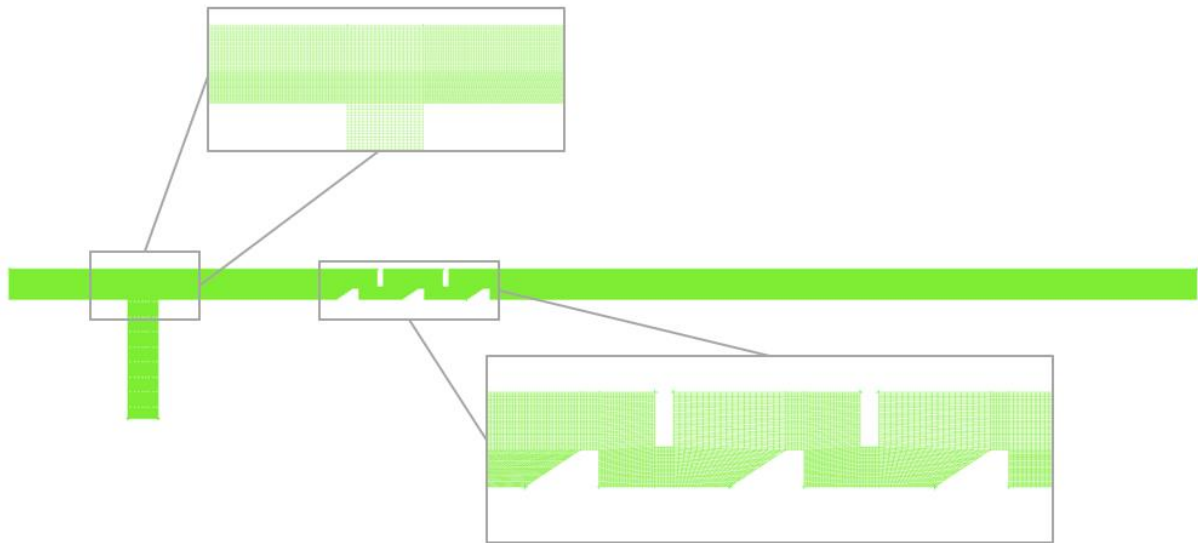


**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 22** - Malha do modelo de geometria 2



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 23** - Malha do modelo de geometria 3

**Fonte:** Autoria própria.

#### 4.4 Equações governantes

Para a simulação, foram utilizadas equações da área de fluidos e térmicas, que envolve o movimento do fluido e a transferência de calor entre os fluidos. Dessa forma, tem-se as seguintes equações:

Equação da continuidade

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

Equação do movimento em x

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla (\rho u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + S_{Mx} \quad (4.2)$$

Equação do movimento em y

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla (\rho v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + S_{My} \quad (4.3)$$

Utilizando também a equação de energia apresentada em Alves da Cunha Junior (2021).

$$\frac{\partial (\rho s h s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho s \vec{U} s h s) = \nabla \cdot (\lambda s \nabla T s) - p \nabla \cdot \vec{U} + \Phi + \vec{s} \epsilon \quad (4.4)$$

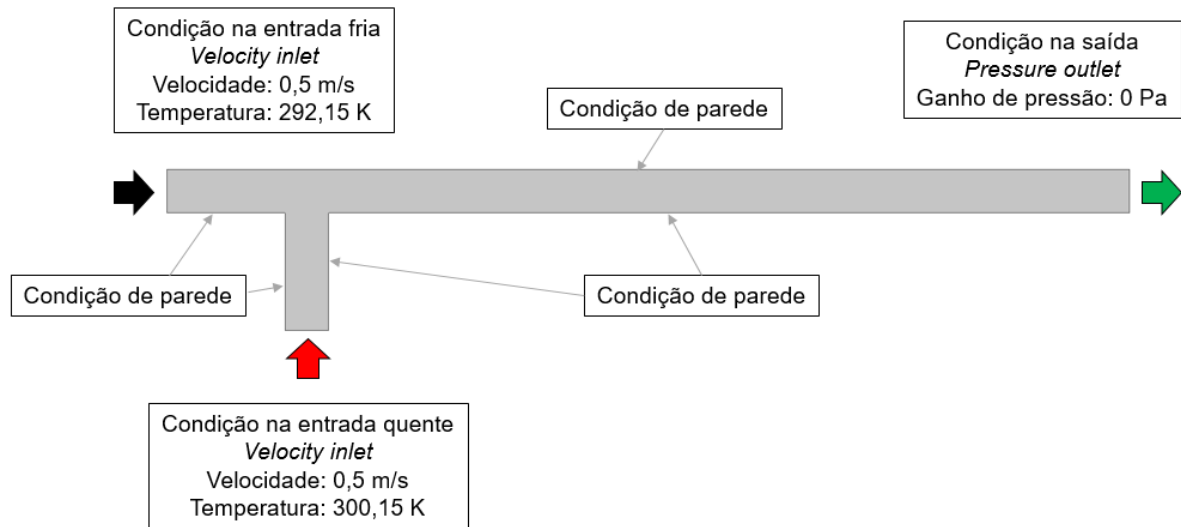
Além dos equacionamentos apresentados foi também utilizado o modelo de turbulência k-ε standard, baseado no trabalho de SANT'ANNA (2012), por possuir uma excelente performance na maioria dos escoamentos relevantes na indústria, além de ser o modelo mais validado com dados experimentais e industriais, nele então é utilizado a seguinte equação de momento

$$\frac{\partial p U}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U \otimes U - \nabla \cdot \mu_{eff} \nabla U = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (4.5)$$

#### 4.5 Condições de contorno

Os valores das condições foram baseados nos trabalhos de Ouregani 2021, em quanto que as condições de paredes foram não deslizantes e adiabáticas, com isso o domínio computacional foi desenvolvido em um duto do tipo T, com a velocidade da água na entrada de 0,5 m/s, com a temperatura de entrada fria de 292,15 K e a de entrada quente de 300,15 K, não havendo ganho de pressão na saída, vide Figura 24.

**Figura 24** - Desenho esquemático 2D do domínio computacional e as condições de contorno utilizadas



**Fonte:** Autoria própria.

#### 4.6 Propriedades do fluido água

Para os dados de entrada da simulação, primeiramente foi necessário determinar as propriedades da água no estado líquido em condições normais de temperatura e pressão, as quais estão representadas na Tabela 2.

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

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

**Fonte:** Adaptado do Ansys-Fluent, 2021.

#### 4.7 Solução numérica

A modelagem numérica de todos os casos estudados foi baseada na pressão e foi desprezado o efeito da gravidade. Além disso, foi imposto que não há transferência de calor

com meio externo e que a pressão de operação é de 1 atm (101325 Pa). Quanto ao critério de convergência foi adotado  $10^{-5}$  para todos as variáveis. Outras informações da configuração utilizada para modelagem empregada na solução numérica pode ser visto no Quadro 1.

**Quadro 1** - Métodos de discretização utilizados na solução numérica

|                                                                       |                                 |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Método para discretização espacial                                    | <i>Least Squares Cell-Based</i> |
| Método para discretização das equações de pressão                     | <i>Upwind</i> de segunda ordem  |
| Método para discretização das equações de momento                     | <i>Upwind</i> de segunda ordem  |
| Método para discretização das equações da energia cinética turbulento | <i>Power Law</i>                |
| Método para discretização das equações da taxa da dissipação          | <i>Quick</i>                    |
| Método para discretização das equações de energia                     | <i>Upwind</i> de segunda ordem  |

**Fonte:** Autoria própria.

Para a solução numérica dos casos estudados, a condição inicial utilizada é mostrada na Tabela 3.

**Tabela 3** – Condições iniciais empregadas nas simulações

| <b>Condição inicial</b>       | <b>Valor empregado</b> |
|-------------------------------|------------------------|
| Ganho de pressão              | 0                      |
| Velocidade em X               | 0                      |
| Velocidade em Y               | 0                      |
| Energia cinético turbulento   | 1                      |
| Taxa da dissipação turbulento | 1                      |
| Temperatura                   | 300                    |

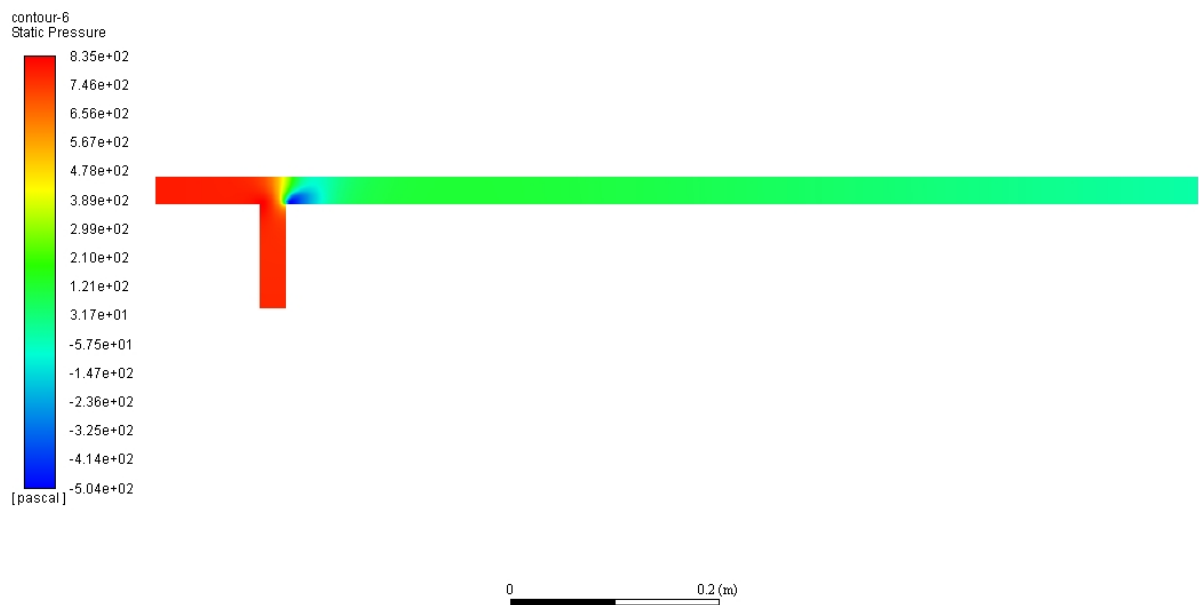
**Fonte:** Autoria própria.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

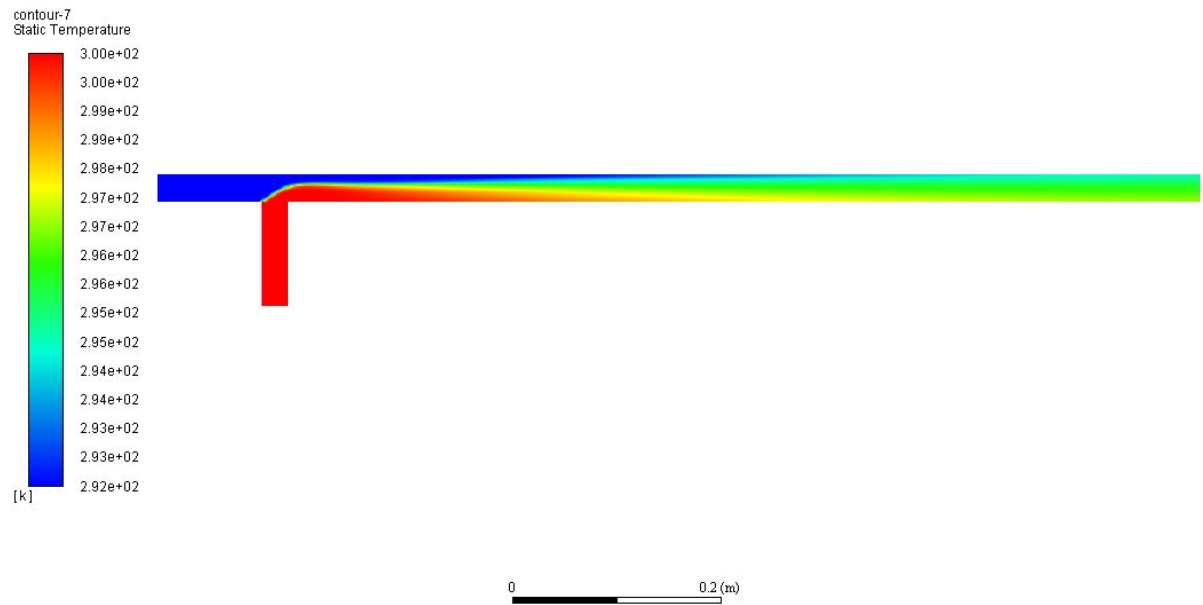
Visando primeiramente gerar uma base comparativa, foi realizada a simulação da passagem de fluidos no modelo base, sem a presença dos misturadores, para em seguida ser realizada as simulações nas mesmas condições, porém com a presença dos modelos de misturadores. Com isso, a partir da simulação, foram plotados quatro gradientes, sendo estes, para análise da pressão (Figura 25), da temperatura (Figura 26), da velocidade (Figura 27) e dos vetores de velocidade do escoamento (Figura 28) na região em T do domínio, podendo verificar a forma como os escoamentos se comportam quando se encontram na junção T.

Vale destacar na figura 26 que as temperaturas de entradas são bem definidas até a região do T. Após essa região, há uma mistura térmica parcial e vai ocorrendo gradualmente a troca de calor até o final do tubo horizontal, no entanto percebe-se que na saída do tubo horizontal a mistura não apresenta está homogênea termicamente, visto que há um gradiente de cores no plano de saída do tubo. Na Figura 27 é visto que a velocidade aumenta logo após a região do T e vai se estabilizando ao longo do tubo horizontal.

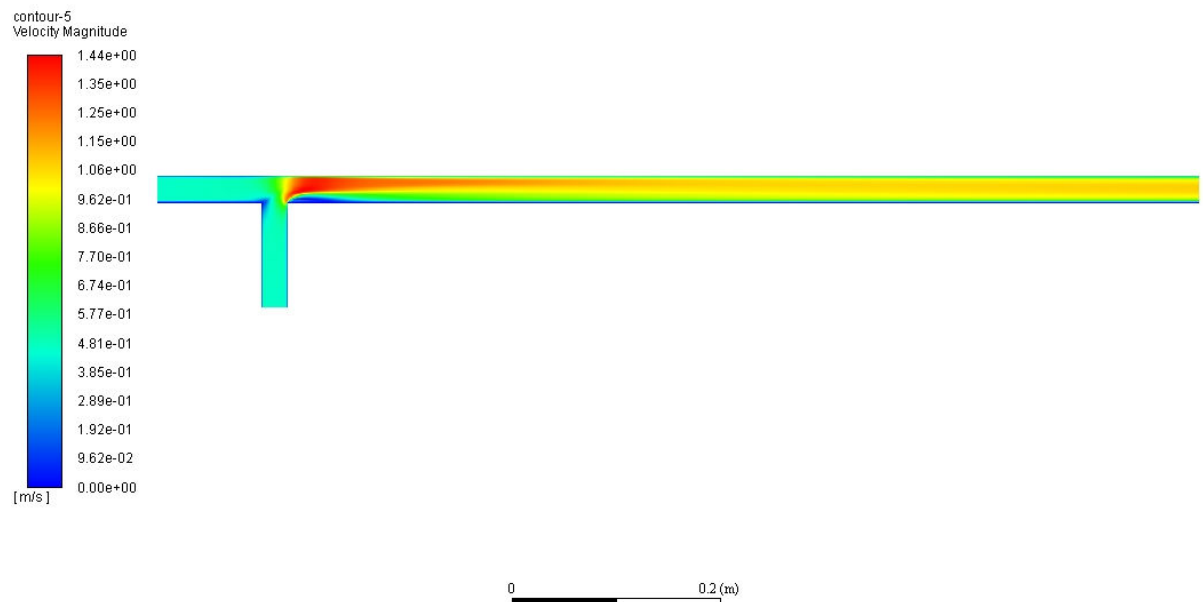
**Figura 25** - Análise de pressão sem misturador



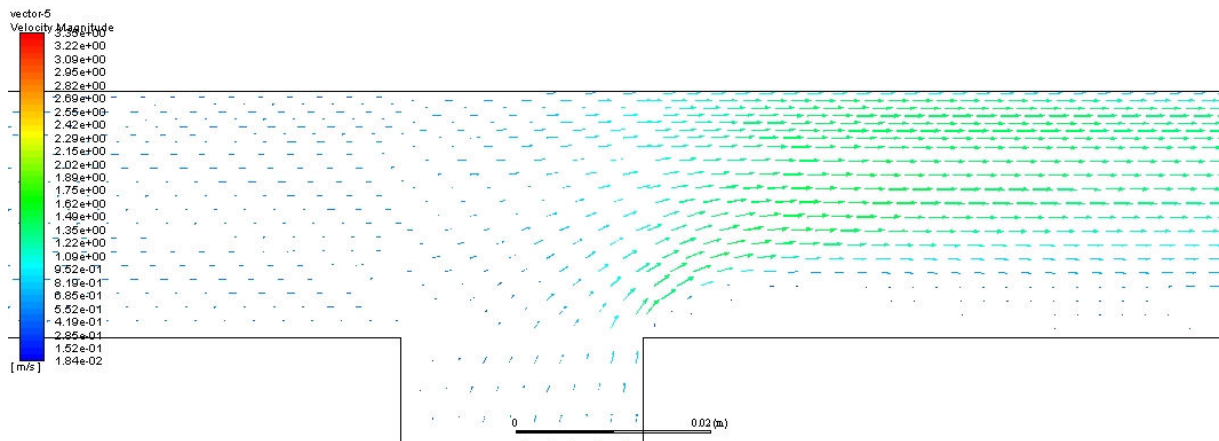
**Fonte:** Autoria própria

**Figura 26 - Análise de temperatura sem misturador**

**Fonte:** Autoria própria

**Figura 27 - Análise de velocidade sem misturador**

**Fonte:** Autoria própria

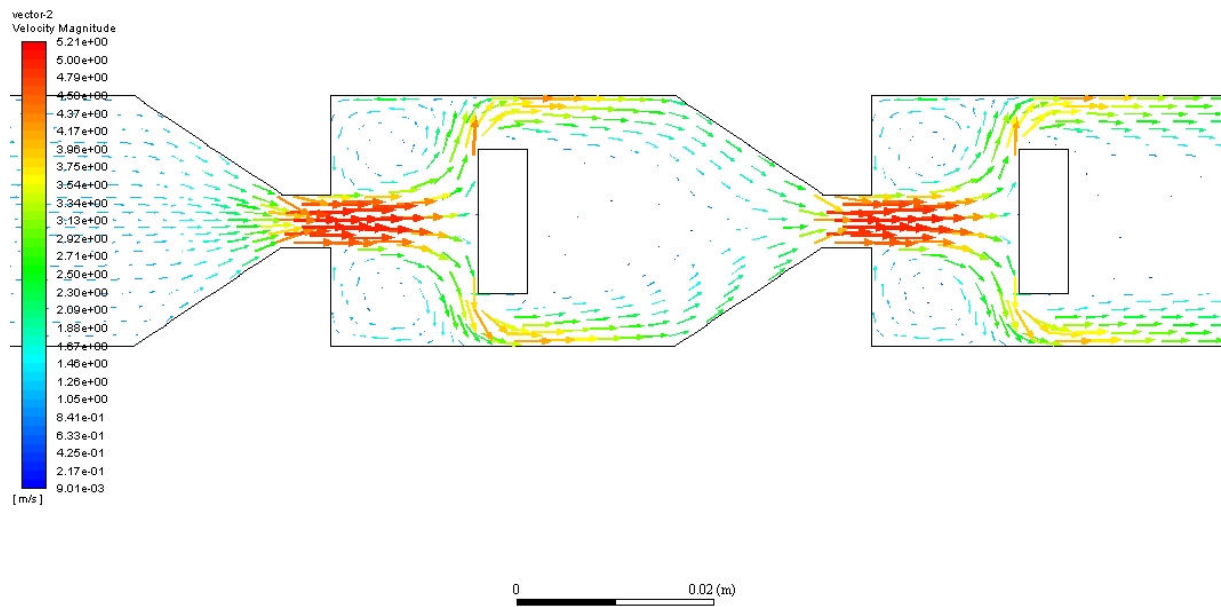
**Figura 28** – Análise dos vetores sem misturador

Fonte: Autoria própria

### 5.1 Análise do modelo de geometria 1

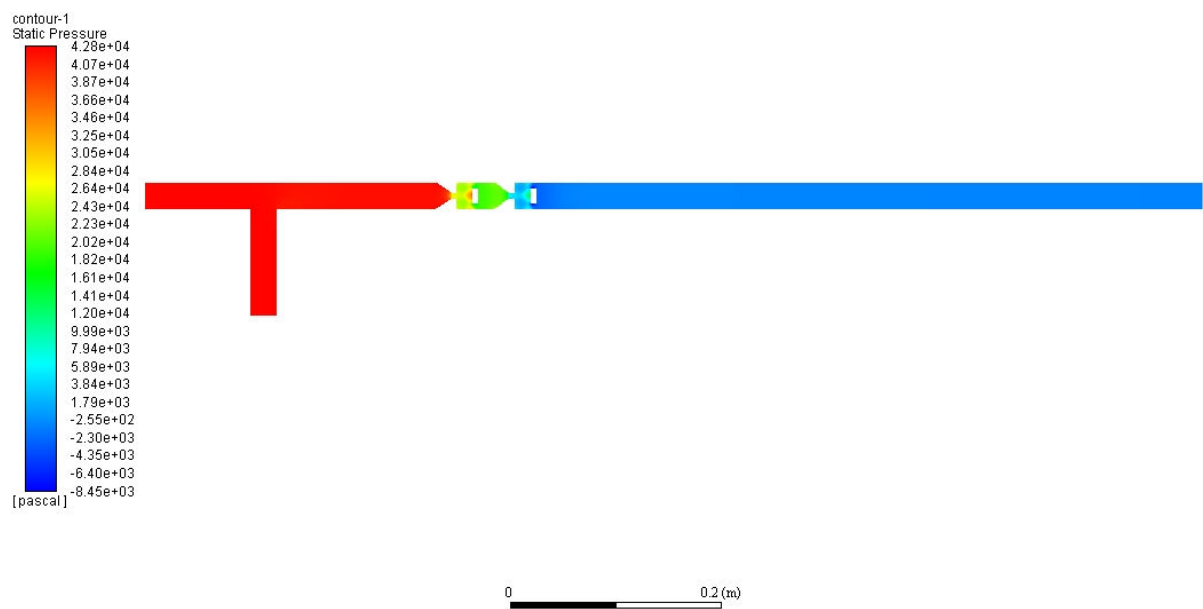
Realizando a simulação para o misturador do modelo de geometria 1, nas mesmas condições que foram realizadas as simulações sem misturadores. Algumas considerações comparativas podem ser previamente destacadas, dentre elas inicialmente tem-se o comportamento dos vetores (Figura 29), os quais, nitidamente, vemos o aumento de suas velocidades máximas, devido à presença dos espaçadores, em relação a mesma região da geometria do modelo sem misturador. Na Figura 30, é possível notar a alta perda de pressão na área antes da região do misturador. Já na Figura 31, é possível notar que após a passagem do fluido pela região do misturador é apresentado uma temperatura constante, havendo uma mistura termicamente homogênea. Então, ao analisar a Figura 32 é possível ver o aumento da velocidade do fluido, o qual possui a maior intensidade na região do misturador.

**Figura 29** – Análise dos vetores com o misturador 1

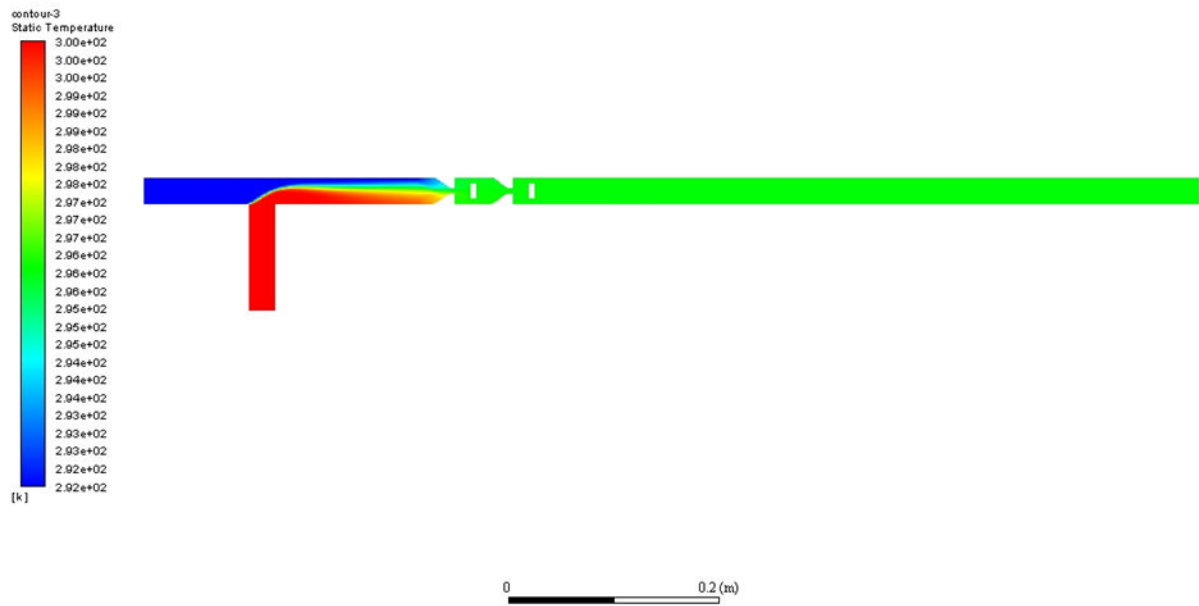


**Fonte:** Autoria própria

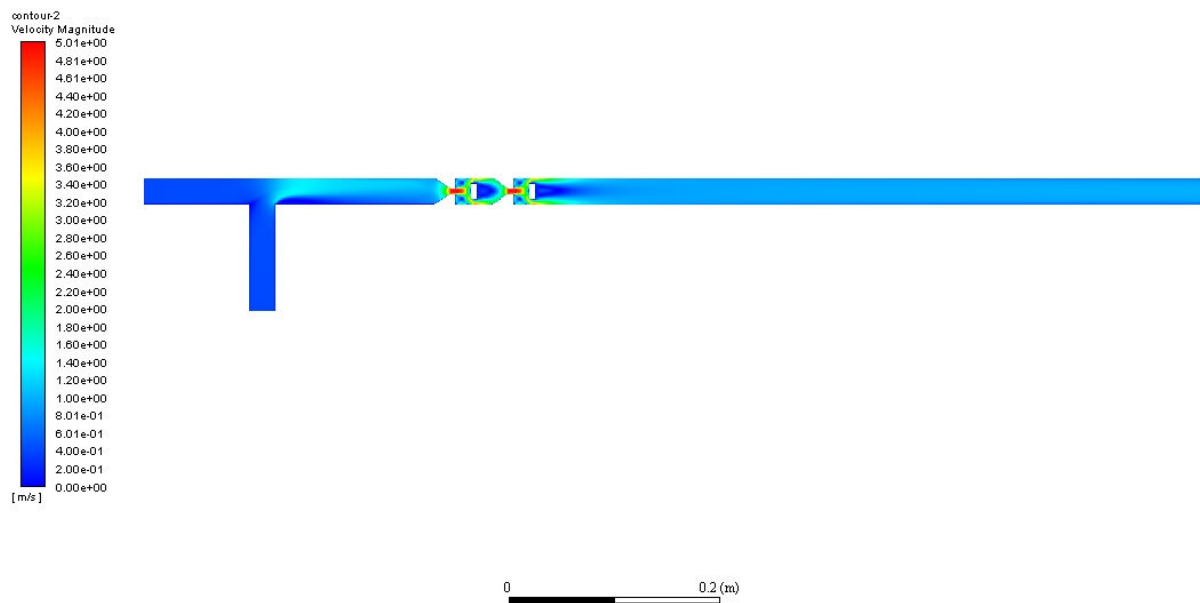
**Figura 30** - Análise de pressão com o misturador 1



**Fonte:** Autoria própria

**Figura 31** - Análise de temperatura com o misturador 1

Fonte: Autoria própria

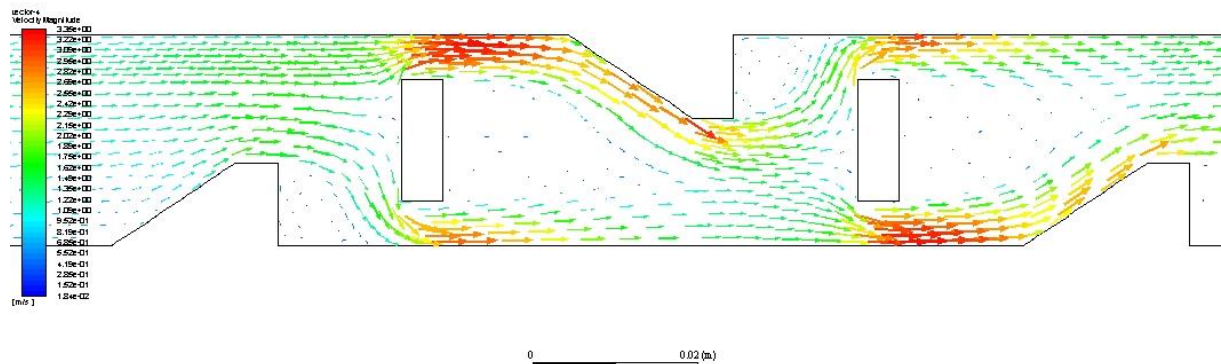
**Figura 32** - Análise de velocidade com o misturador 1

Fonte: Autoria própria

## 5.2 Análise do modelo de geometria 2

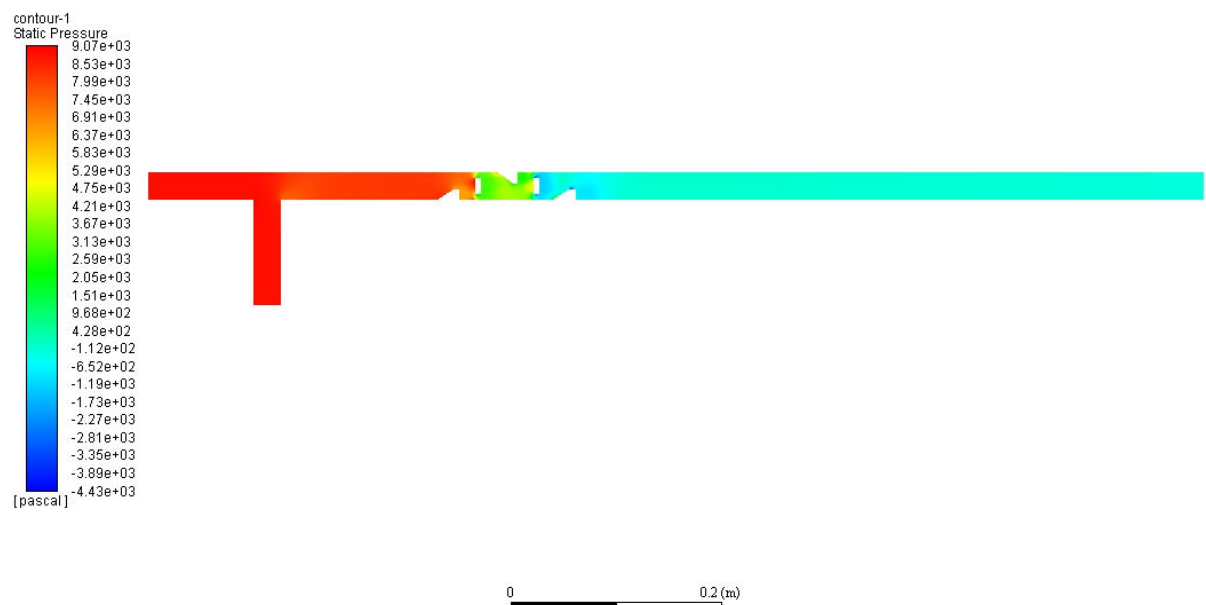
Seguindo então as mesmas considerações das simulações anteriores, as simulações foram realizadas com o misturador modelo de geometria 2, com isso pode-se notar na Figura 33 os vetores com velocidades máximas inferiores ao do modelo de geometria 1, porém ainda superiores à da simulação sem misturador. A mesma variação foi perceptível na análise de pressão (Figura 34), na de temperatura (Figura 35) e na de velocidade (Figura 36).

**Figura 33** – Análise dos vetores com o misturador 2



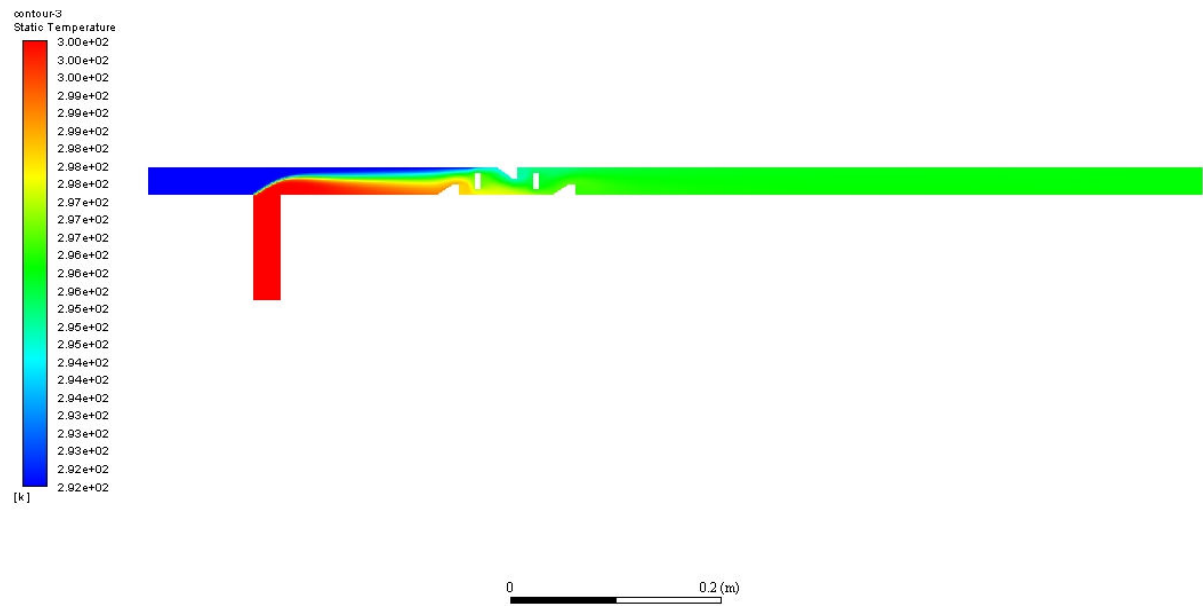
Fonte: Autoria própria

**Figura 34** - Análise de pressão com o misturador 2



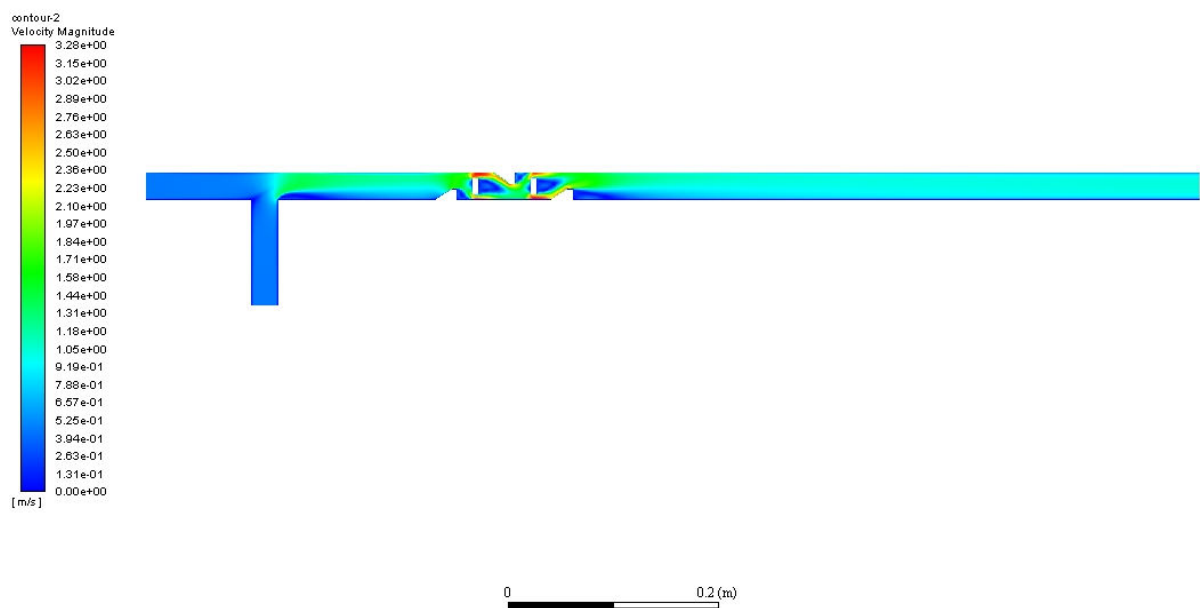
Fonte: Autoria própria

**Figura 35 - Análise de temperatura com o misturador 2**



Fonte: Autoria própria

**Figura 36 - Análise de velocidade com o misturador 2**

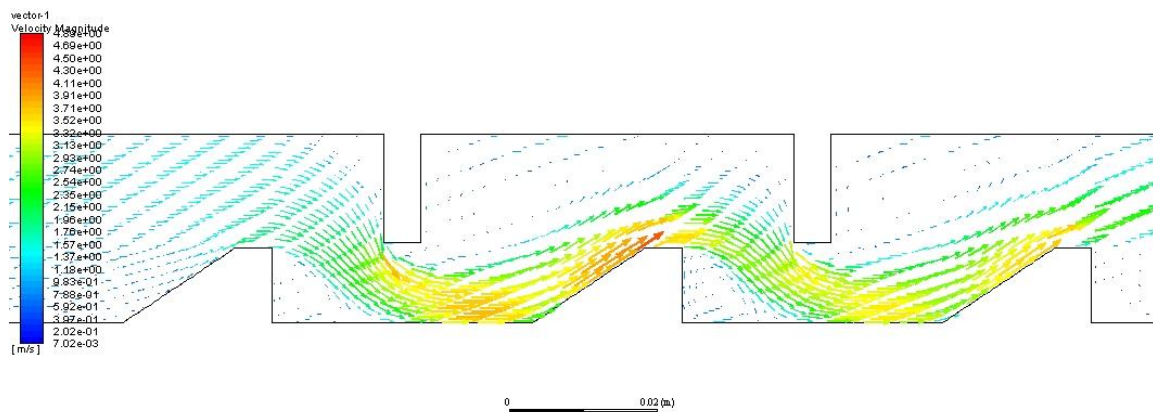


Fonte: Autoria própria

### 5.3 Análise do modelo de geometria 3

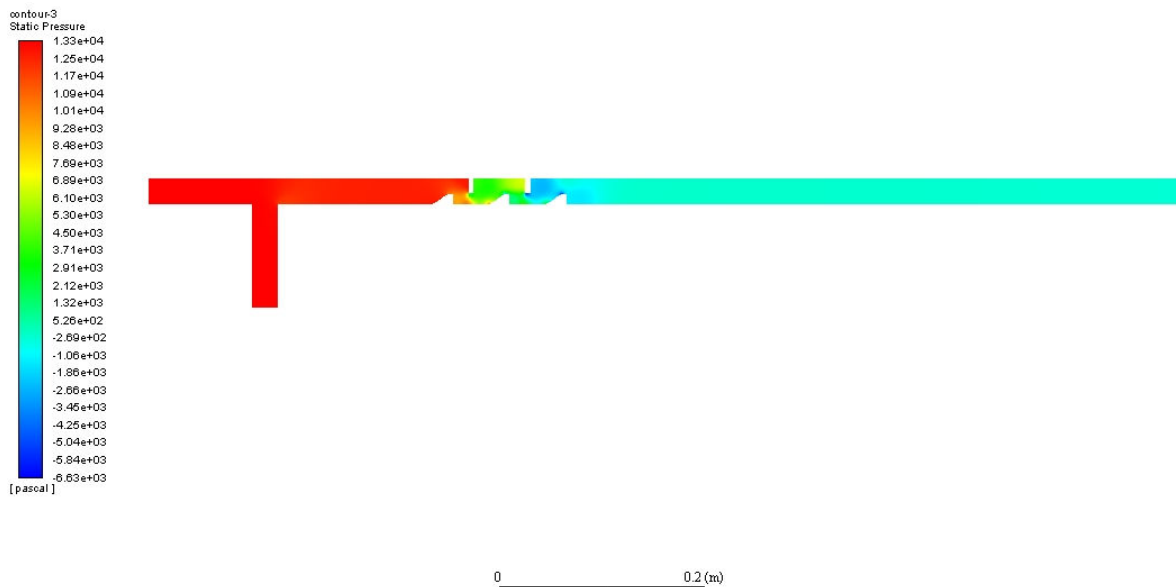
Seguindo as mesmas considerações para as simulações do modelo de geometria 3, podemos notar na Figura 37 que os vetores desse modelo tiveram maior constâncias em comparação com os modelos anteriores, apresentando valores medianos tanto nessa simulação como nas demais (Figura 38, Figura 39 e Figura 40). Ao analisar as Figuras 38 e 39, percebe-se que na região do misturador é onde ocorre maiores variações e isso também ocorre com os outros modelos analisados, em que se destaca a alta perda de pressão causados pelos espaçadores e um maior processo de mistura térmica entre os fluidos, que se pode afirmar aos efeitos de turbulências (instabilidades) causada no escoamento e providos pelos espaçadores.

**Figura 37 - Análise dos vetores com o misturador 3**

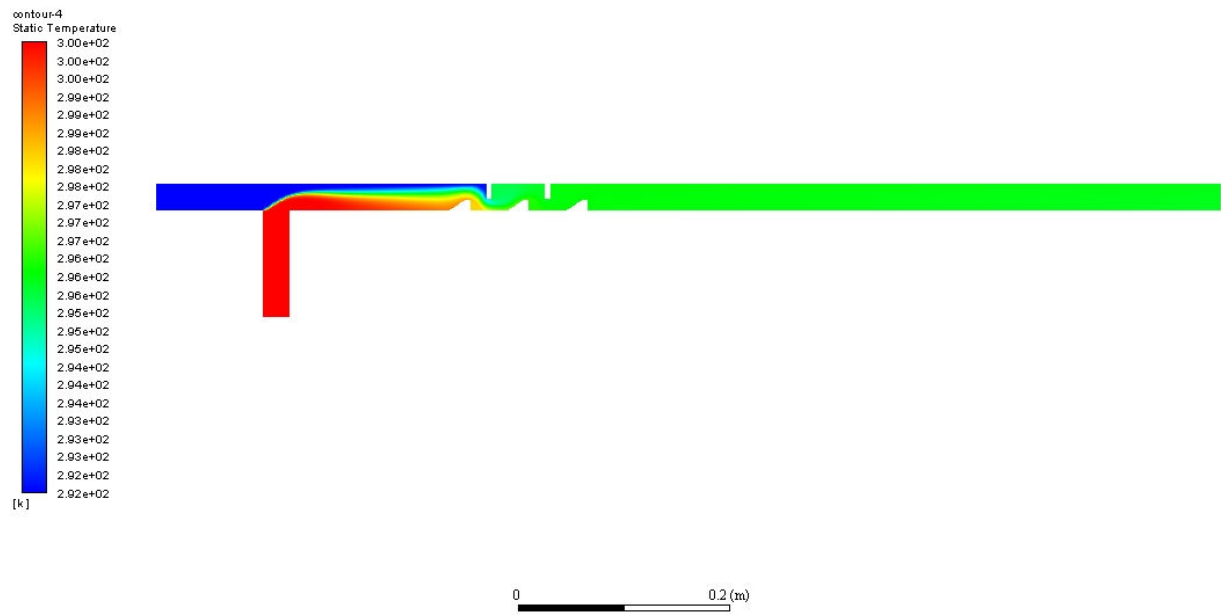


Fonte: Autoria própria

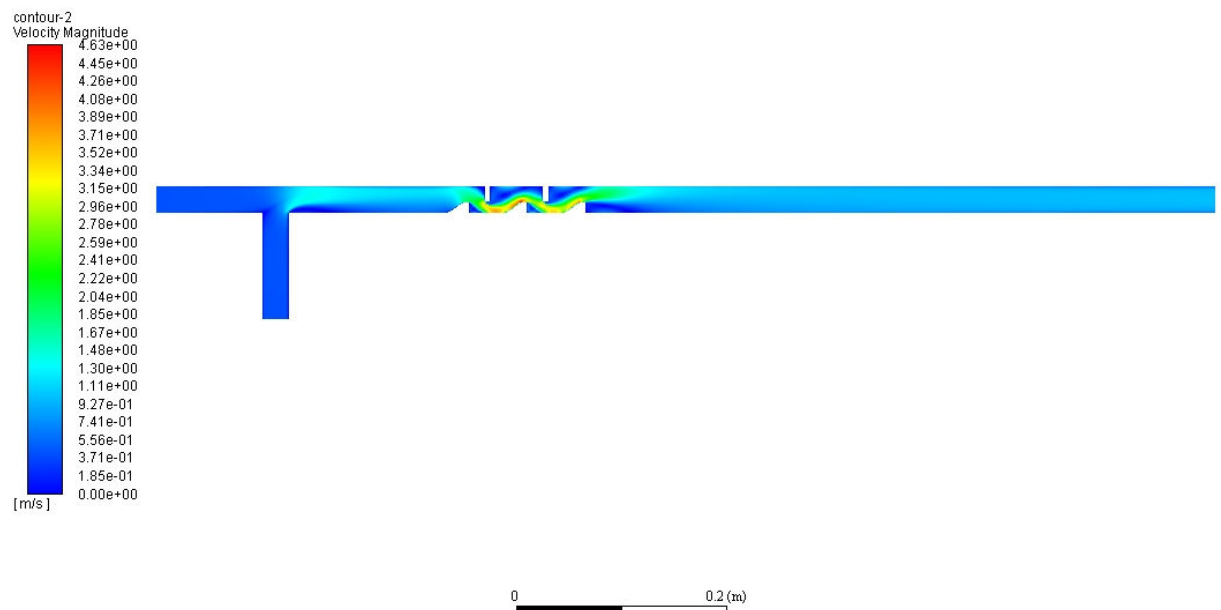
**Figura 38 - Análise de pressão com o misturador 3**



Fonte: Autoria própria

**Figura 39 - Análise de temperatura com o misturador 3**

Fonte: Autoria própria

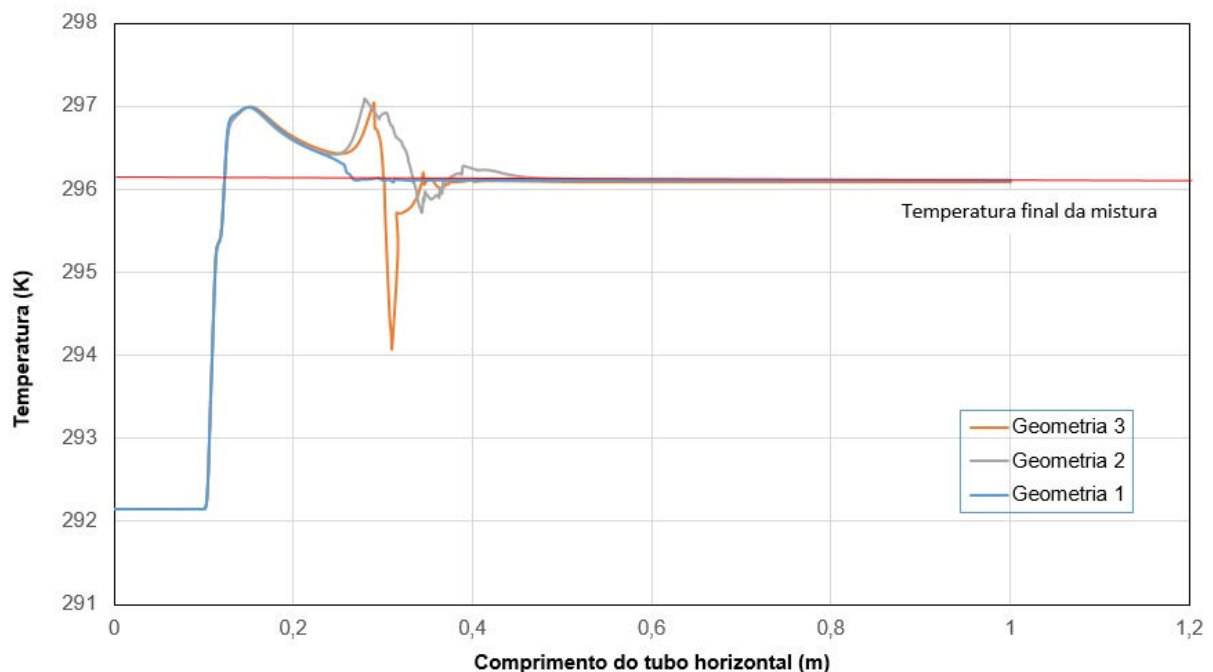
**Figura 40 - Análise de velocidade com o misturador 3**

Fonte: Autoria própria

## 5.4 Comparação entre as geometrias estudadas

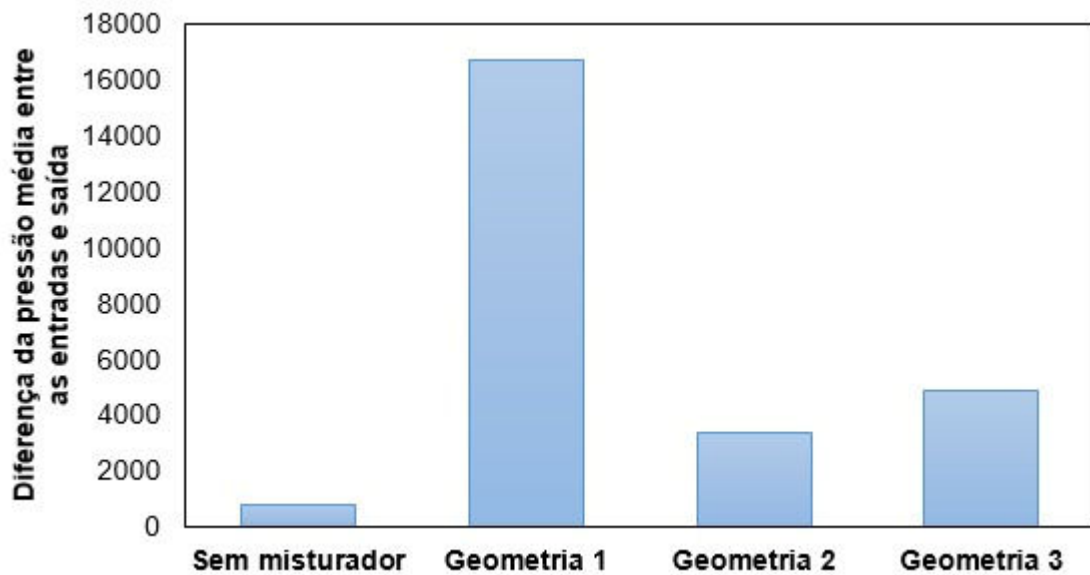
Para determinar qual geometria obteve o melhor resultado, foi realizado o comparativo para determinar qual estabilizou na temperatura final com maior rapidez. Dessa forma utilizou-se a temperatura média da seção transversal do tubo de cada geometria para desenvolver o Gráfico 1, então a partir dele pode-se perceber que a geometria 1 foi a primeira que alcançou a temperatura final (média das temperaturas de entrada) e a que gerou as menores variações.

**Gráfico 1** - Estabilização da temperatura final da mistura



**Fonte:** Autoria própria

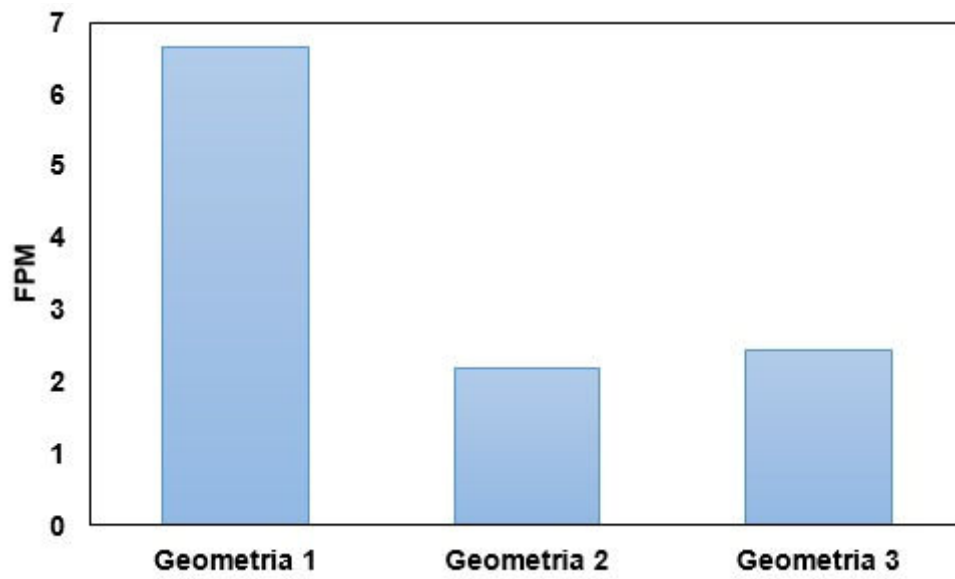
Em seguida foi realizada a análise das perdas de pressão dos misturadores, a qual é representada no Gráfico 2, onde é possível observar que a geometria 1 foi a que apresentou a maior perda de pressão, isso devido ao efeito da sua geometria, pois quanto mais difícil for a passagem do fluido maior será a perda de pressão, sendo então necessário uma bomba de maior capacidade para que seja mantido o mesmo fluxo da entrada.

**Gráfico 2** - Perda de pressão

**Fonte:** Autoria própria

Foi então feita a relação entre a perda de pressão com o comprimento útil necessário para que a mistura chegue à temperatura final, essa relação é dada pela divisão da diferença de pressão com geometria de misturador sobre a diferença de pressão da sem misturador, vezes a divisão do comprimento necessário para a mistura atingir a temperatura final sobre o comprimento total do tubo horizontal. Dessa forma quando menor for o fator de performance, melhor será a relação, pois será o que apresentará a menor perda de pressão e o menor comprimento necessário para obter a temperatura final da mistura. Dessa forma, segundo o Gráfico 3, a geometria que apresentou essa melhor relação foi a geometria 2.

**Gráfico 3** - Fator de performance do misturador



**Fonte:** Autoria própria

## 6 CONCLUSÕES

Diante das análises das três geometrias estudadas, tem-se que a geometria 1 foi a que apresentou menor tempo e variações para atingir a temperatura final da mistura, porém foi também a que apresentou a maior perda de pressão, sendo necessário que esta fosse utilizada com uma bomba de maior capacidade para ser mantido na saída o mesmo fluxo da entrada, dessa forma a geometria 1 foi a que apresentou maior FPM.

Já a geometria 2 apresentou valores intermediários o que lhe proporcionou o menor FPM, enquanto que a geometria 3 apresentou o valor de FPM superior a geometria 2, porém, ainda bem menor do que a geometria 1.

Com isso dentre as geometrias estudadas teremos que melhor apresenta melhor desempenho sobre as condições analisadas será a geometria 2.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Análise e simulação de novas geometrias
- Análise da viabilidade econômica de implantação da geometria de misturador na indústria

## REFERÊNCIAS

ALVES DA CUNHA JUNIOR, Antonio. **Estudo sobre a dinâmica de fluidos computacional**. 2021. TCC (GRADUAÇÃO) – estudante, [S. l.], 2021.

AHMAD, A. L.; LAU, K. K.; ABU BAKAR, M. Z. **Impact of different spacer filament geometries on concentration polarization control in narrow membrane channel**. *Journal of Membrane Science*, [s. l.], v. 262, n. 1–2, p. 138–152, 2005. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0376738805005260>

AMOKRANE, M.; SADAoui, D.; DUDECK, M. **Effect of inter-filament distance on the improvement of Reverse Osmosis desalination process**. [s. l.], 2015.

BAKER, J. S.; DUDLEY, L. Y. **Biofouling in membrane systems — A review**. *Desalination*, [s. l.], v. 118, n. 1–3, p. 81–89, 1998.

BAKKER, A.; LAROCHE, R. D.; MARSHALL, E. M. **Laminar Flow in Static Mixers with Helical Elements**The Online CFM book. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.bakker.org/cfm/>>. Acesso em: 04 jun. 2022.

BEGHINE, P. Samuel; ROSA, Jorge. **Substituição de misturador dinamico por misturador estático para homogeneização de soluções**. Disponível em: <[http://revista.oswaldocruz.br/Content/pdf/Samuel\\_Beghine.pdf](http://revista.oswaldocruz.br/Content/pdf/Samuel_Beghine.pdf)>. Acesso em: 11 ago. 2022.

BLANCHARD, H. **Acceleration valve and immovable mixer.**, 8 set. 1933. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/FR762413A/fr?q=%22static+mixer%22&oq=%22static+>>>. Acesso em: 04 jun. 2022.

DAMIEN RAULINE, PHILIPPE A. TANGUY, JEAN-MARC LE BLÉVEC AND JACQUES BOUSQUET – **Numerical Investigation of the Performance of Several Static Mixers – The Canadian journal of chemical engineering**, volume 76, June, 1998.

DINIZ, D. D. S., **Estudo da fluidodinâmica da dessalinização das águas salobras via osmose reversa: modelagem e simulação**. 2021. 248f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2021.

DIRECTINDUSTRY. Misturador dinâmico MR series. *In: Misturador dinâmico MR series*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/chemineer/product-223623-2287275.html>. Acesso em: 11 ago. 2022.

ETCHELLS III, A.W.; MEYER, C. F. **Mixing in pipelines**. In: Paul, E. L. Handbook of Industrial Mixing. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

ESSS. *In: Fluidodinâmica Computacional: o que é?*. [S. l.], 24 jun. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>. Acesso em: 9 set. 2022.

GODFREY, J. C. Static mixers. In: Harnby, N. **Mixing in the Process Industries**. London: Robert Hartnoll, 1985.

HAIFENG SHI et. al. , **To improve Transference of Heat of surfactante Solution-Reduction of drag for a HEV mixer static with low loss of load**, Departamento de Engenharia Química e Biomolecular da Universidade Estadual de Ohio, 140 oeste 19 th Avenue, Columbus, OH 43210 , EUA, 2011.

JOAQUIM JUNIOR, C.F.J., **Desenvolvimento e otimização de misturador estático com o uso da fluidodinâmica computacional**, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2008.

LISBOA, PEDRO F. , JOÃO FERNANDES, PEDRO C. SIMÕES, et al. **Computational-fluid-dynamics study of a Kenics Static mixer as a Heat Exchanger for supercritical carbon dioxide**. The Journal of supercritical fluids, 2010.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional – Fundamentos e coordenadas generalizadas**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MÅRTEN REGNER, KARIN ÖSTERGREEN, CRHISTIAN TRÄGÅRDH - **Effects of geometry and flow rate on secondary flow and the mixing process in Static Mixers – A numerical study.** - Chemical Engineering Science , 2006.

MISTURADORES Estáticos. [S. l.]. Disponível em: <https://www.naturaltec.com.br/misturador-estatico-3/>. Acesso em: 15 ago. 2022.

MISTURADORES Estáticos. [S. l.]. Disponível em: <https://www.snatural.com.br/misturador-estatico-1/>. Acesso em: 15 ago. 2022.

MYERS, K.J., BAKKER, A., RYAN, D., **Avoid agitation by selecting Static Mixers.** **Chemical Engineering Progress** ,1997.

Najmeh Jafari Ouregani *et al* 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2088** 012030

PAHL, M. H. and E. MUSCHELKNAUTZ, **Static Mixers and Their Applications**, Int. Chem. Eng. 22, p. 197-205, 1982.

PETROLE, L. C. DE. **Dispositif pour le mélange de deux ou plusieurs fluides** França, 1931.

RAULINE, D., LE BLÉVEC, J.M., BOUSQUET, J., TANGUY, P.A., **A comparative assessment of the performance of the Kenics and SMX static mixers.** – Trans IChemE, Vol. 78, Part A, April, 2000.

SANT'ANNA, Mikele et al. **Desenvolvimento de novas configurações para misturadores estáticos por meio da simulação computacional.** Exacta, [S. l.], p. 10, 2012

SANT'ANNA, Mikele. **Otimização de um misturador estático para a produção de biodiesel.** 2012. TCC (pós-graduação) - estudante, [s. L.], 2012.

SUTHERLAND, W. **Improvement in apparatus for preparing gaseous fuel**, Sutherland 1874.pdf, 1874.