



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

JULIANA DE OLIVEIRA CORDEIRO

ANÁLISE DO ESCOAMENTO DO BIODIESEL EM  
QUEIMADORES INDUSTRIAIS ROTACIONAIS UTILIZANDO  
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Salvador

2019

JULIANA DE OLIVEIRA CORDEIRO

ANÁLISE DO ESCOAMENTO DO BODIESEL EM  
QUEIMADORES INDUSTRIAIS ROTACIONAIS UTILIZANDO  
FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos  
Coorientadora: Prof. Dr<sup>a</sup>. Luzia Aparecida Tofaneli

Salvador  
2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

C794a Cordeiro, Juliana de Oliveira

Análise do escoamento do biodiesel em queimadores industriais rotacionais utilizando fluidodinâmica computacional / Juliana de Oliveira Cordeiro. – Salvador, 2019.

83 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luzia Aparecida Tofaneli.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019.  
Inclui referências.

1. Queimadores industriais. 2. Biodiesel. 3. Escoamento rotacional. 4. Fluidodinâmica computacional. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Santos, Alex Álisson Bandeira. III. Tofaneli, Luzia Aparecida. IV. Título.


CDD: 621.4023

## CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

### Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "ANÁLISE DO ESCOAMENTO DO BIODIESEL EM QUEIMADORES INDUSTRIAIS ROTACIONAIS UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL" apresentada no dia 29 de março de 2019, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador:

  
**Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos**  
SENAI CIMATEC


Coorientadora:

  
**Prof.ª Dr.ª Luzia Aparecida Tofaneli**  
SENAI CIMATEC

Membro Externo

  
**Prof. Dr. Davidson Martins Moreira**  
FIEB

Membro Externo

  
**Prof. Dr. Maximilian Serguei Mesquita**  
UFES

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Mônica Gonçalves de Oliveira Cordeiro e Luiz Robisson Cordeiro, por me mostrarem o valor dos estudos e me darem todo o suporte e incentivo para que eu chegasse até aqui.

Aos orientadores Alex Álisson Bandeira Santos e Luzia Aparecida Tofanelli pela confiança, disponibilidade e apoio durante o árduo processo de construção e escrita da dissertação.

Aos membros da banca pela disponibilidade em avaliar e realizar comentários construtivos, contribuindo com a evolução do trabalho.

A Turan Dias Oliveira por toda colaboração e suporte em todas as etapas deste trabalho.

Aos colegas de turma do GETEC 10 que tornaram as aulas mais leves e divertidas.

A toda equipe do Laboratório de Energia pelo incentivo e momentos de descontração.

A Josefa Gonçalves de Oliveira, Marina Fonseca de Jesus e Vitor Passos Silva, pelo suporte, carinho e compreensão.

## RESUMO

Queimadores são os principais responsáveis pela combustão na indústria quando se trata de equipamentos como fornos, turbinas e caldeiras. Nestes processos de combustão, é frequente o uso de óleos pesados que normalmente apresentam alta densidade e baixa fluidez, isso está associado a uma difícil mistura e altos níveis de emissão quando queimados. Por isso, mediante a uma crescente preocupação com o meio ambiente, aumenta o interesse por substitutos para esses óleos como o biodiesel. Todavia, o biodiesel apresenta uma eficiência de queima e temperatura mais baixas que os combustíveis normalmente utilizados. Uma solução para o aumento da eficiência da queima é a utilização do escoamento rotacional que proporciona uma melhora na mistura entre combustível e oxidante resultando em diminuição das emissões, aumento da eficiência e redução no consumo de combustível. O objetivo desse trabalho é analisar, sem presença de reações ou queima, a influência da geometria direcionadora de ar na entrada do queimador no escoamento de biodiesel, para se obter o máximo de dispersão desse fluido e assim, melhorar a eficiência. A análise foi feita através da Fluidodinâmica Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*), utilizando o software Ansys CFX 19.0. Foram avaliadas as distribuições de fração volumétrica, a trajetória do escoamento e *Swirl*, qualitativamente e quantitativamente. Os resultados mostram que a geometria de entrada do queimador pode induzir o escoamento rotacional e aumentar a dispersão do biodiesel, melhorando a mistura entre combustível e oxidante.

Palavras-chave: Queimadores Industriais. Biodiesel. Escoamento Rotacional. Fluidodinâmica Computacional.

## ABSTRACT

Burners are primarily responsible for combustion in the industry when it comes to equipment such as ovens, turbines and boilers. In these combustion processes, the use of heavy oils that normally have high density and low fluidity is often associated with difficult mixing and high emission levels when burned. Therefore, through a growing concern with the environment, interest in substitutes for these oils such as biodiesel increases. However, biodiesel has a lower burning and temperature efficiency than normally used fuels. One solution to increase firing efficiency is the use of rotational flow which provides an improved mixture between fuel and oxidant resulting in reduced emissions, increased efficiency and reduced fuel consumption. The objective of this work is to analyze, without presence of reactions or burning, the influence of the air directing geometry at the burner entrance in the biodiesel flow, in order to obtain the maximum dispersion of this fluid and, therefore, to improve the efficiency. The analysis was done through Computational Fluid Dynamics (CFD), using the software Ansys CFX 19.0. The distributions of volumetric fraction, the flow trajectory and Swirl, were evaluated qualitatively and quantitatively. The results show that the burner inlet geometry can induce rotational flow and increase biodiesel dispersion, improving the mixture between fuel and oxidant.

Keywords: Industrial burners. Biodiesel. Swirl. Computational Fluid Dynamics.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das constantes do modelo k- $\epsilon$ .....	45
Tabela 2 – Detalhes das malhas elaboradas para o estudo de convergência. ....	53
Tabela 3 – Condições de contorno utilizadas.....	55
Tabela 4 – Propriedades do biodiesel baseadas na literatura.....	55
Tabela 5 – Resultados do estudo de convergência de malha.....	58



## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética Brasileira de 2017.....	15
Figura 2 – Estrutura do consumo do Setor Industrial em 2017. ....	16
Figura 3 – Distribuição do consumo de biodiesel por setor.....	18
Figura 4 – Exemplos de queimadores (a) dentro de um forno rotativo e (b) queimador de combustível líquido.....	21
Figura 5 – Arranjo de queimadores (a) pré-misturados, (b) por difusão e (c) parcialmente pré-misturados.....	23
Figura 6 – Exemplo de queimador com <i>swirl</i> apresentado por Beér e Chigier (1972). ....	24
Figura 7 – Zona de recirculação mostradas através de linhas de corrente. ....	25
Figura 8 – Geometria proposta por Beér; Chigier (1972). ....	27
Figura 9 – Gráfico de velocidade resultante comparando os modelos de turbulência. ....	29
Figura 10 – Gerador de <i>swirl</i> utilizado por ISHAK et al. (2009).....	31
Figura 11 – Emissões de (a) CO e (b) HC dos combustíveis para diferentes razões de equivalência e temperaturas. ....	33
Figura 12 – Mapeamento da velocidade axial através do (a) contorno no plano de corte – Fluxo instantâneo por LES (superior) e fluxo médio de tempo por RANS (parte inferior), (b) e (c) gráficos comparativos da velocidade.....	35
Figura 13 – Câmara de combustão utilizada neste trabalho. ....	47
Figura 14 – Arranjo dimensional da câmara de combustão em metros. ....	47
Figura 15 – Imagem do gerador de redemoinho ( <i>swirler</i> ) utilizado por Liu et al. (2017).....	48
Figura 16 – Visão 3D da geometria sem pás (sem <i>swirler</i> ).....	49
Figura 17 – Visão 3D da geometria do <i>Swirler 1</i> na (a) vista isométrica e (b) frontal. ....	49
Figura 18 – Visão 3D da geometria do <i>Swirler 2</i> na (a) vista isométrica e (b) frontal. ....	50
Figura 19 – Arranjo dimensional para o conjunto de pás em metros. ....	50
Figura 20 – Domínio computacional.....	51
Figura 21 – Imagem da malha total (a) e detalhe da região refinada (b) e (c) ....	52
Figura 22 – Condições de contorno utilizadas para simulações.....	54
Figura 23 – Linhas para apresentação gráfica dos resultados.....	57
Figura 24 – Gráfico comparativo do perfil de velocidade entre as malhas. ....	59
Figura 25 - Distribuição do $y^+$ nas paredes do domínio. ....	60
Figura 26 – Linhas de corrente do combustível (a) e do ar (b).....	61
Figura 27 – Contorno de fração volumétrica de biodiesel ao longo da câmara.....	62
Figura 28 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal na geometria sem <i>swirler</i> .....	63
Figura 29 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linhas 1, 2 e 3 na geometria sem <i>swirler</i> . ....	64
Figura 30 – Linhas de corrente do combustível (a) e do ar (b).....	65

Figura 31 – Contorno de fração volumétrica de biodiesel ao longo da câmara.....	66
Figura 32 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal na geometria <i>Swirler</i> 1.....	67
Figura 33 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linhas 1, 2 e 3 na geometria <i>Swirler</i> 1. ....	68
Figura 34 – Linhas de corrente do combustível (a) e do ar (b).....	69
Figura 35 – Contorno de fração volumétrica de biodiesel ao longo da câmara.....	70
Figura 36 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal na geometria <i>Swirler</i> 2.....	71
Figura 37 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linhas 1, 2 e 3 na geometria <i>Swirler</i> 2. ....	72
Figura 38 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal para as três geometrias. ....	73
Figura 39 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linha 1 para as três geometrias.....	74
Figura 40 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linha 2 para as três geometrias.....	74
Figura 41 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linha 3 para as três geometrias.....	75
Figura 42 – Linhas de corrente bidimensionais no plano XY das geometrias: (a) Sem <i>Swirler</i> , (b) <i>Swirler</i> 1 e (c) <i>Swirler</i> 2.....	76
Figura 43 – Zona de recirculação mostradas através de linhas de corrente. ....	77

## LISTAS DE SÍMBOLOS

$G_\varphi$	Momento angular [kg.m.s <sup>-2</sup> .m]
$u$	Velocidade axial [m.s <sup>-1</sup> ]
$W$	Velocidade tangencial [m.s <sup>-1</sup> ]
$r$	Coordenada radial [m]
$\rho$	Massa específica de um fluido [kg.m <sup>-3</sup> ]
$G_x$	Momento linear [kg.m.s <sup>-2</sup> ]
$p$	Pressão [Pa]
$S$	Número de <i>Swirl</i>
$R$	Raio do bocal de combustível do queimador [m]
$r_\alpha, r_\beta$	Fração volumétrica das fases $\alpha$ e $\beta$ , respectivamente
$\vec{U}_\alpha, \vec{U}_\beta$	Vetor velocidade para as fases $\alpha$ e $\beta$ , respectivamente [m.s <sup>-1</sup> ]
$\rho_\alpha, \rho_\beta$	Massa específica das fases $\alpha$ e $\beta$ , respectivamente [kg.m <sup>-3</sup> ]
$p_\alpha$	Pressão na fase $\alpha$ [Pa]
$\mu_\alpha$	Viscosidade dinâmica para fase $\alpha$ [Pa.s]
$\vec{M}_\alpha$	Conjunto de forças na fase $\alpha$ devido outras fases
$c_{\alpha\beta}^{(d)}$	Coeficiente de arrasto entre fases
$\vec{F}_g$	Força gravitacional [N]
$g$	Aceleração da gravidade [m.s <sup>-1</sup> ]
$d_p$	Diâmetro da partícula [m]
$A_p$	Área projetada [m <sup>2</sup> ]
$V_p$	Volume de uma partícula esférica [m <sup>3</sup> ]
$n_p$	Número de partículas por volume
$\vec{D}_p$	Força de arrasto [N]
$C_D$	Coeficiente de arrasto

$\vec{D}_{\alpha\beta}$	Força de arrasto total [N]
$Re$	Número de Reynolds
$d$	Diâmetro da câmara [m]
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta [Pa.s]
$k_\alpha$	Energia cinética turbulenta [ $m^2.s^{-2}$ ]
$\varepsilon_\alpha$	Dissipação turbulenta [ $m^2.s^{-2}$ ]
$C_\mu$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$
$\sigma_k$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$
$\sigma_\varepsilon$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$
$P_\alpha$	Produção de turbulência devido a forças viscosas [ $kg.m^{-1}.s^{-3}$ ]
$\mu_{td}, \mu_{tc}$	Viscosidade turbulenta para as fases dispersa e contínua, respectivamente [Pa.s]
$Pr_t$	Número de Prandtl turbulento

# SUMÁRIO

---

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b> .....	17
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	19
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	20
<b>2.1 QUEIMADORES</b> .....	20
<b>2.2 AERODINÂMICA DE COMBUSTÃO</b> .....	24
<b>2.3 BIODIESEL</b> .....	28
<b>2.4 ESTADO DA ARTE</b> .....	29
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	37
<b>3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA</b> .....	37
<b>3.2 MÉTODO NUMÉRICO</b> .....	40
<b>3.2.1 Geometria</b> .....	47
<b>3.2.2 Malha Computacional</b> .....	51
<b>3.2.3 Condições de contorno</b> .....	54
<b>3.2.4 Processamento</b> .....	56
<b>3.2.5 Avaliação dos resultados</b> .....	56
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	58
<b>4.1 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA</b> .....	58
<b>4.2 GEOMETRIA SEM SWIRLER (SEM PÁS)</b> .....	60
<b>4.3 GEOMETRIA SWIRLER 1</b> .....	64
<b>4.4 GEOMETRIA SWIRLER 2</b> .....	68
<b>4.6 ANÁLISE COMPARATIVA</b> .....	72
<b>4.7 ASPECTOS DE INOVAÇÃO DO BIODIESEL NA CADEIA INDUSTRIAL</b> .....	77
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	79
<b>5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS POSTERIORES</b> .....	80
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81

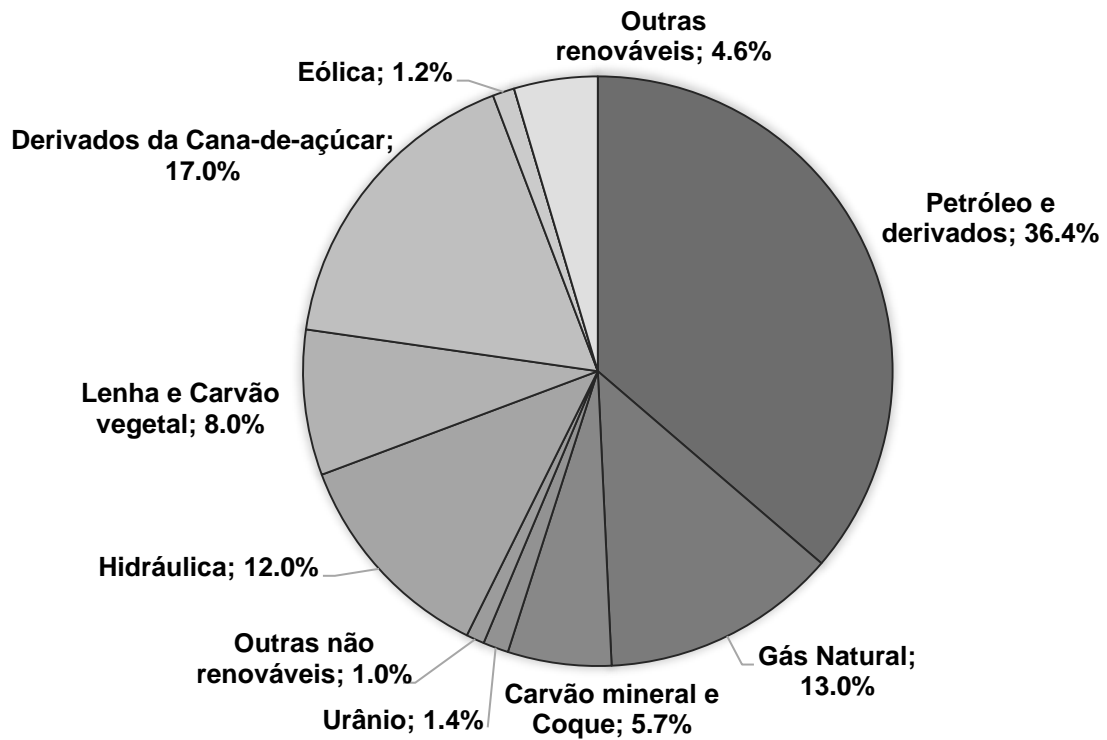
# 1 INTRODUÇÃO

Grande parte da energia consumida no mundo é proveniente da queima de combustíveis fósseis (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2017). Porém a combustão desses compostos resulta em emissões de poluentes que contribuem para o aquecimento global e efeito estufa que estão entre os principais motivos para a crescente preocupação com o meio ambiente. De acordo com relatório do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), os combustíveis fósseis são responsáveis por 78% das emissões dos gases de efeito estufa, através da emissão de CO<sub>2</sub>. Além disso, estudos alertam sobre a possibilidade de escassez dos combustíveis fósseis.

Segundo Wang et al. (2015), com o crescimento da população, há uma tendência no aumento da demanda de energia. Haverá ainda o aumento do consumo de energia por habitante principalmente nos países em desenvolvimento (GOLDEMBERG, 2015). Porém a oferta de matéria prima para geração de energia, em especial os combustíveis fósseis, não aumenta na mesma proporção. Projetando esta tendência para o futuro, os combustíveis fósseis ficarão cada vez mais escassos. Por esses motivos, observa-se um aumento nos estudos acerca de novas fontes de energia, em especial as energias renováveis ou “limpas”. Houve também um aumento da busca por reaproveitamento da energia liberada e de dejetos de processos, que podem ser transformados e reutilizados diminuindo custos e poluição (YAAKOB et al., 2013; MAHMUDUL et al., 2017; NUNES; MATIAS; CATALÃO, 2017).

Neste contexto, a matriz energética brasileira se mostra promissora pois apresenta uma grande contribuição de energias renováveis, 43% em 2017 segundo o Balanço Energético Nacional (2018). Este percentual foi maior que a média mundial que foi em torno de 14% em 2015 de acordo com a Agência Internacional de Energia. Contudo boa parte dessa energia é de origem hídrica, tendo pouca contribuição de fontes consideradas menos impactantes socialmente ou fontes não esgotáveis como exemplo eólica, solar e biomassa. A Figura 1 apresenta a distribuição da oferta de energia no Brasil em 2017, data do último balanço realizado pelo Ministério de Minas e Energia.

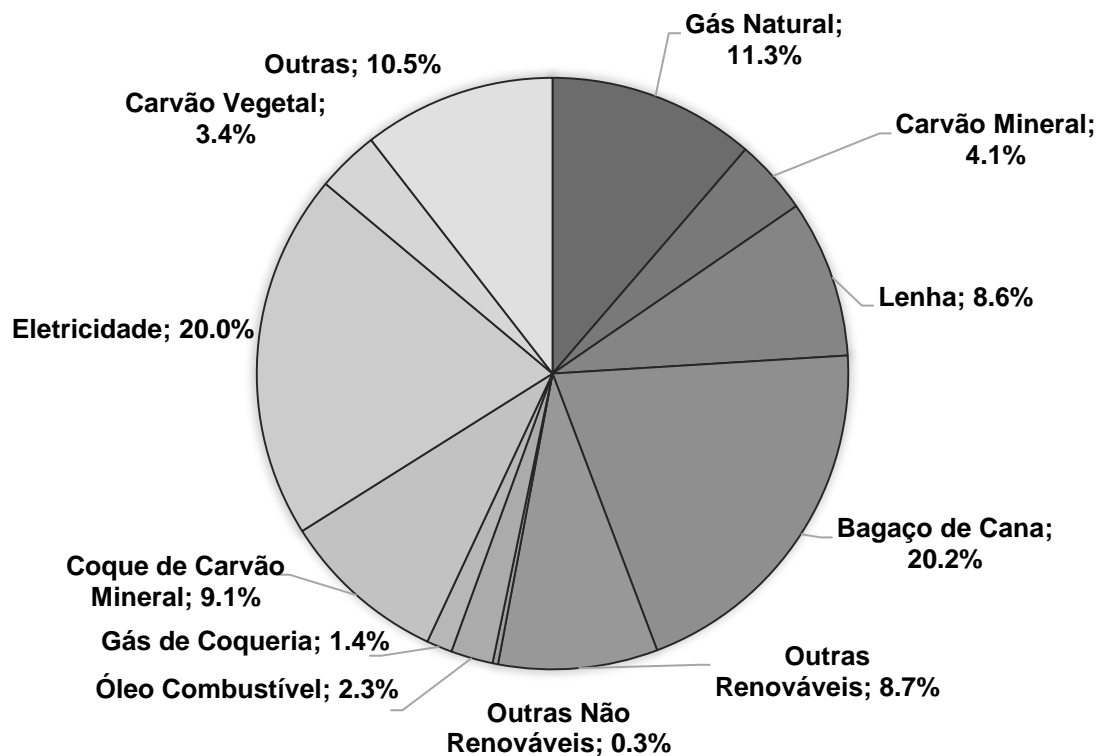
Figura 1 – Matriz Energética Brasileira de 2017.



Fonte: Adaptado do Balanço Energético Nacional (2018)

Este gráfico mostra um panorama geral considerando a produção de energia elétrica, o setor de transportes e o setor industrial. De forma semelhante, o setor industrial também apresenta uma dependência de fontes originárias dos combustíveis fósseis como mostra a Figura 2. De acordo com o Balanço Energético Nacional, há uma tendência de crescimento de utilização da biomassa dentro da indústria, porém ainda é minoria dentro deste quadro. Ademais, dentre os setores da economia, o setor industrial é o que mais consome energia.

Figura 2 – Estrutura do consumo do Setor Industrial em 2017.



Fonte: Adaptado do Balanço Energético Nacional (2018)

A preocupação com o meio ambiente e com a escassez desses recursos naturais abre espaço para o estudo e a utilização de novas fontes de energia. Vassilev; Vassileva; Vassilev (2015) mostraram através da revisão de vários trabalhos que a biomassa vem ganhando relevância, por conta dos benefícios ambientais, sociais e econômicos. Yaakob et al. (2013) apresentaram um apanhado de diversos trabalhos que abordam o estudo da reutilização dos óleos de cozinha e concluíram que esta matéria-prima para o biodiesel é promissora. Outros trabalhos como Pinto et al. (2005) e Mahmudul et al. (2017) atestaram as vantagens da utilização do biodiesel como substituto aos combustíveis fósseis, principalmente o diesel.

A partir dessa perspectiva, nota-se que há um cenário favorável ao desenvolvimento de estudos aprofundados sobre fontes de energia mais sustentáveis e de novas tecnologias que propiciam a redução das emissões de agentes poluidores. Uma dessas tecnologias aplicadas a queimadores industriais é a utilização do escoamento rotacional para melhorar a mistura entre os reagentes e consequentemente, melhorar a queima (OLIVEIRA et al., 2014).



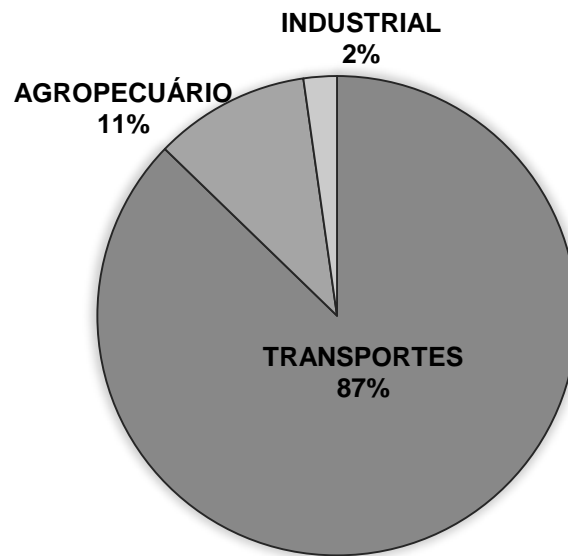
## 1.1 JUSTIFICATIVA

A combustão é o principal processo aplicado na indústria em diversas áreas, como química, petroquímica, metalurgia e siderurgia, etc. (TURNS, 1996). Queimadores são os principais responsáveis pela combustão quando se trata de equipamentos como fornos, turbinas e caldeiras. Algumas indústrias que utilizam fornos em seu processo, fazem uso de queimadores movidos a óleos pesados. Os óleos pesados têm como características principais alta densidade e baixa fluidez, o que dificulta sua dispersão e posteriormente sua queima.

Além disso, esses óleos possuem altos índices de emissões de fuligem e outros poluentes, o que vai de encontro à crescente preocupação com meio ambiente e a busca de redução do nível de emissões, fazendo com que haja um crescimento nos estudos acerca da utilização dos biocombustíveis em equipamentos industriais (PUIGJANER; PÉREZ-FORTES; LAÍNEZ-AGUIRRE, 2015; MAHMUDUL et al., 2017). Mahmudul et al. (2017) estudaram diversos trabalhos a fim de avaliar a performance do biodiesel em motores a diesel e concluíram que as emissões em geral são menores, exceto para as emissões de NOx que em alguns casos apresentou aumento. O que pode ser minimizado com a utilização de aditivos e outras tecnologias. Malik et al. (2017) estudaram o desempenho de misturas de biodiesel e diesel com até 15% de biodiesel em um queimador e concluíram que o aumento do percentual de biodiesel reduziu as emissões de NOx, SO2 e CO.

Apesar do uso do biodiesel na Indústria ainda ser bem tímido como mostra a Figura 3, houve um crescimento gradativo de 2007 até 2017 segundo o Balanço Energético Nacional (2018). Em 2007, não houve registro do consumo do biodiesel por parte da Indústria. Já em 2017 o consumo registrado foi de 95 mil metros cúbicos.

Figura 3 – Distribuição do consumo de biodiesel por setor.



Fonte: Balanço Energético Nacional (2018)

Não obstante, o biodiesel apresenta um grande ganho ecológico em relação a alguns aspectos quando comparado com o diesel, em alguns casos há o aumento das emissões de NOx. Além disso, a utilização do biodiesel geralmente está associada a uma redução na eficiência de queima e diminuição da temperatura (MAHMUDUL et al., 2017). Esses fatores juntamente com uma baixa produção impedem o crescimento da utilização do biodiesel.

Uma das linhas de estudo envolvendo estratégias de redução dos impactos ambientais dos combustíveis e aumento da eficiência é a aerodinâmica de combustão. Essa linha de pesquisa engloba o estudo da combustão por pulverização, *spray*, e o estudo da formação de vórtices, *swirl*. O estudo da aerodinâmica de combustão entra no contexto ambiental por dois motivos. O primeiro é o aumento da eficiência da queima em função da melhor dispersão do combustível, que pode proporcionar ao final do processo uma redução no consumo. O segundo é a possibilidade de se reduzir o índice de emissões. (FU, 2008; ISHAK; JAAFAR; ELDRAINY, 2009)

Assim, a aerodinâmica da região de entrada da câmara e o escoamento rotacional podem aumentar a eficiência da queima, o que pode ser uma alternativa para as limitações da queima de biodiesel. Por isso, faz-se relevante estudar diferentes possibilidades de distribuição e dispersão do biodiesel dentro da câmara.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência da geometria da entrada de um queimador industrial no escoamento de biodiesel por meio de Fluidodinâmica Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*). O foco deste trabalho é analisar a presença ou ausência do escoamento rotacional, portanto não serão considerados os efeitos de queima e reações. Para isso, são utilizados alguns parâmetros de avaliação relacionados.

Para possibilitar a execução e conclusão deste objetivo macro, são necessárias algumas etapas de evolução e construção do trabalho dispostas a seguir como objetivos específicos:

- Definir as geometrias a serem utilizadas para estudo de diferentes escoamentos rotacionais;
- Simular numericamente o escoamento do biodiesel nos queimadores nas diferentes geometrias geradoras de *swirl*;
- Analisar qualitativamente e quantitativamente os resultados das simulações realizadas, correlacionando-os com o nível de *swirl* e a aerodinâmica dos queimadores.
- Discutir a aplicação do biodiesel em queimadores industriais como alternativa a utilização de óleos pesados.

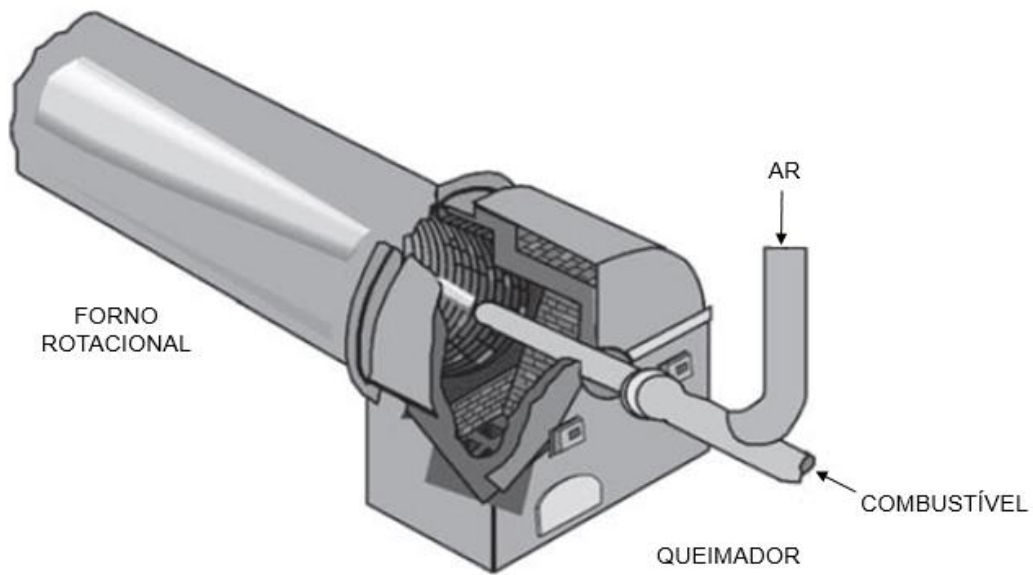
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 QUEIMADORES

A combustão é amplamente utilizada na indústria, seja em alguma etapa de produção ou para geração de energia. Um dos dispositivos mais utilizados na indústria para o processo de combustão é o queimador. (BAUKAL JR, 2003)

O queimador é um dispositivo utilizado para transformar energia química da reação de combustão em energia térmica. Existe algumas possibilidades em que o combustível e o oxidante são injetados pelo queimador na câmara de combustão, a mais comum é a injeção do combustível com um pouco de ar de combustão, ar primário, ou então a injeção de forma totalmente separada, sendo a pré-mistura completa pouco comum. Ao longo dos anos, a preocupação do projetista de queimadores mudou. Anteriormente, a grande preocupação no projeto de um queimador era garantir a combustão completa através da mistura total. Atualmente, objetiva-se o equilíbrio da mistura combustível-oxidante para obtenção da eficiência máxima. Além disso, também há uma preocupação crescente com o meio ambiente, conseqüentemente com os níveis de emissão de poluentes de queimadores (BAUKAL JR, 2003). A Figura 4a apresenta um exemplo de queimador dentro de um forno rotativo, enquanto a Figura 4b apresenta um exemplo de queimador de combustível líquido.

Figura 4 – Exemplos de queimadores (a) dentro de um forno rotativo e (b) queimador de combustível líquido.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Baukal Jr (2003)

A combustão é resultado de interações entre fenômenos físicos e químicos que geram uma reação química de oxidação exotérmica. Por isso, há produção de uma quantidade de calor podendo haver liberação de luz (BEÉR; CHIGIER, 1972; RAGHAVAN, 2016). Para ocorrer a reação é necessário que os reagentes sejam uma espécie oxidante e um combustível. Na reação completa, todo carbono existente no combustível se une ao Oxigênio fornecido pelo oxidante e resultam no dióxido de Carbono que somado com o vapor d'água são produtos da combustão. Existem

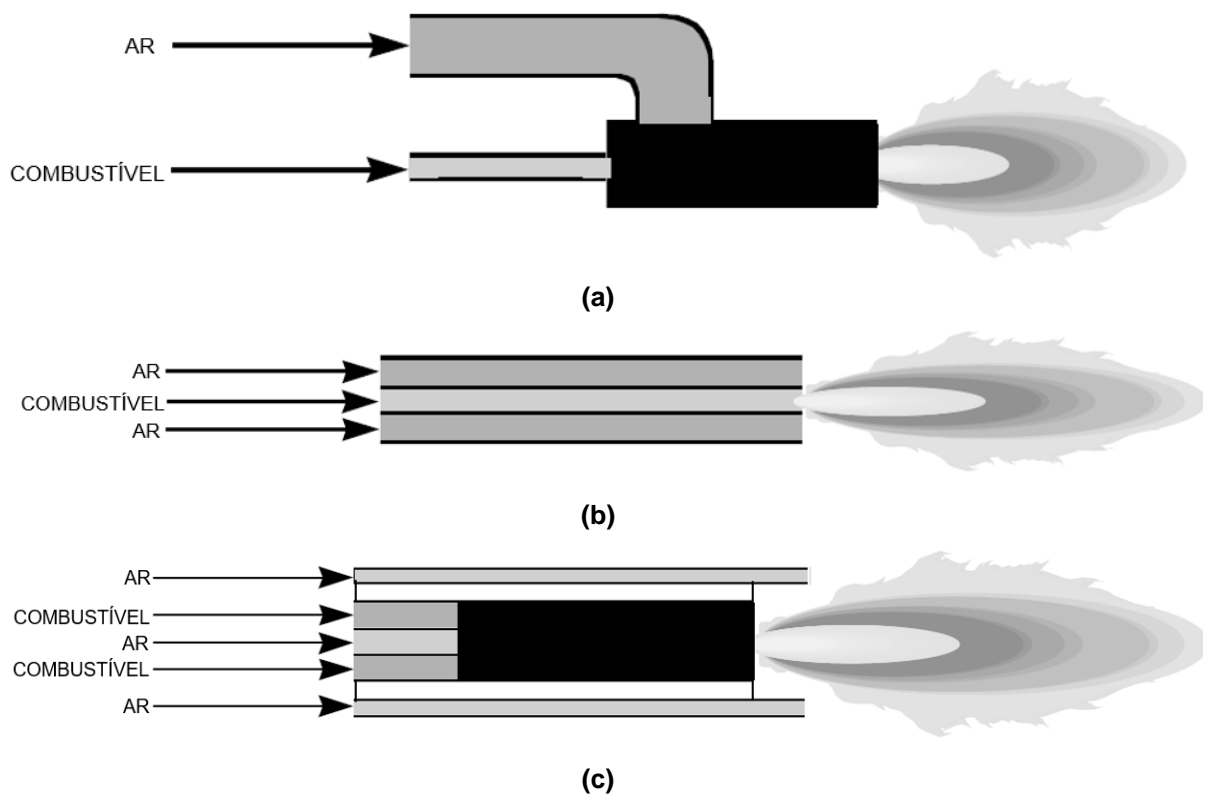
espécies de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, porém a combustão só ocorre na fase gasosa. Sendo assim, os combustíveis condensados (líquidos e sólidos) queimam somente quando entram no estado gasoso. A queima em si acontece de maneira rápida, por conta disso, o controle do processo de combustão geralmente é feito através dos processos de transporte para os combustíveis gasosos, e dos processos de vaporização (líquidos) e pirólise (sólidos) para os combustíveis condensados. Os combustíveis gasosos entram no queimador no seu estado natural, os líquidos e sólidos demandam alguma preparação. Comumente, os combustíveis líquidos são aquecidos com o intuito de melhorar a atomização através da diminuição da viscosidade. A seleção do combustível mais adequado a uma aplicação deve ser baseada em alguns fatores, como as propriedades físicas, custos envolvidos e oferta. (RAGHAVAN, 2016)

É necessário obedecer a estequiometria da reação para que haja o consumo total do Carbono presente no combustível. Portanto calcula-se a razão ar-combustível ou razão estequiométrica para garantir oxidante suficiente. O mesmo ocorre com as vazões mássicas. O ar é o oxidante mais utilizado pelos baixos custos envolvidos, entretanto a presença de Nitrogênio e outros componentes produz alguns poluentes como óxidos de nitrogênio, monóxidos de carbono, fuligem, etc. Algumas ações podem evitar ou reduzir esses poluentes: como a utilização de catalisadores apropriados para controle das taxas de reação; utilização de dispositivos de captura ou aproveitamento desses poluentes e utilização de um desenho adequado do queimador e da câmara para controle do processo de transporte do combustível. (RAGHAVAN, 2016)

Os queimadores podem ser classificados pelo tipo de mistura, que se refere ao modo como combustível e oxidante são injetados e misturados dentro da câmara, podendo ser pré-misturados, misturados por difusão e pré-misturados parcialmente. Nos queimadores pré-misturados (Figura 5a), como o nome sugere, os reagentes entram na câmara de combustão totalmente misturados, em um nível molecular. Por conta disso, esses queimadores apresentam chamas mais curtas e intensas que os queimadores por difusão, o que pode gerar um aquecimento não uniforme e níveis de emissões superiores de NOx. Contrapondo essas características, nos queimadores por difusão (Figura 5b), os reagentes são injetados separadamente na câmara de combustão, então a mistura ocorre efetivamente na chama. Os queimadores por

difusão, geralmente apresentam chamas mais longas e menos intensas que os pré-misturados. A temperatura é uniformemente distribuída e as emissões são diminuídas. O terceiro tipo de queimadores são os parcialmente pré-misturados (Figura 5c). Neste tipo, uma parcela do combustível é previamente misturada com oxidante. O comportamento da chama está entre os outros tipos, ou seja, comprimento e temperatura são intermediários. A razão para utilização dos queimadores parcialmente pré-misturados é justamente se conseguir unir as melhores características dos outros dois tipos, intensidade do calor e estabilidade da chama. (BAUKAL; GERSHTEIN; LI, 2001; BAUKAL JR, 2010)

Figura 5 – Arranjo de queimadores (a) pré-misturados, (b) por difusão e (c) parcialmente pré-misturados.



Fonte: Adaptado de BAUKAL JR, 2003.

A escolha do queimador dependerá da aplicação para qual se destina e o tipo de chama e de aquecimento que se quer atingir. Portanto, a combustão é um fenômeno complexo que envolve várias áreas de estudo e variáveis, e por isso, e apesar de sua importância, ainda não é compreendida por completo. Mesmo após

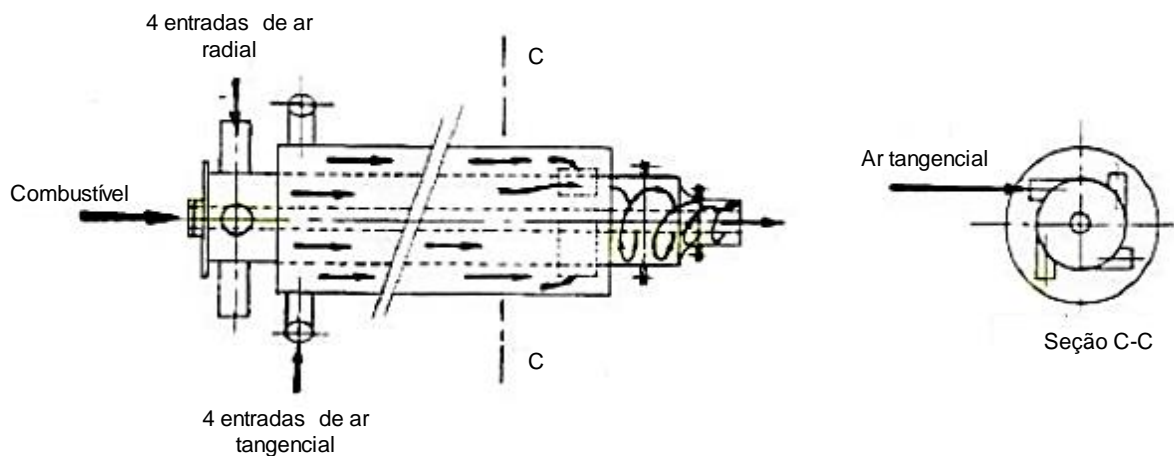
várias décadas sendo utilizada pela indústria para geração de energia e produção industrial, ainda são realizados inúmeros estudos sobre este ramo da ciência.

## 2.2 AERODINÂMICA DE COMBUSTÃO

Ao saírem do queimador para a câmara, os fluxos de ar e combustível estão na forma de jato e não estão em contato com as paredes. O controle da mistura e o direcionamento da chama é feito através da quantidade de movimento dos jatos de combustível e ar. A pressão influencia nos padrões de fluxo e de mistura no interior da chama, essa pressão é convertida em energia cinética na injeção do combustível e do ar. (BEÉR; CHIGIER, 1972)

As dimensões e a força do vórtice são definidas pelas condições de entrada. O ar que entra em um queimador como um fluxo tangencial muda de direção para resultar na forma espiral. Beér; Chigier (1972) conseguiram descrever o conjunto de forças que atuam no escoamento tipo *swirl* dentro de um queimador e as consequências dentro da câmara de combustão através de experimentação. A Figura 6 mostra um exemplo de queimador com *swirl* apresentado por eles.

Figura 6 – Exemplo de queimador com *swirl* apresentado por Beér e Chigier (1972).

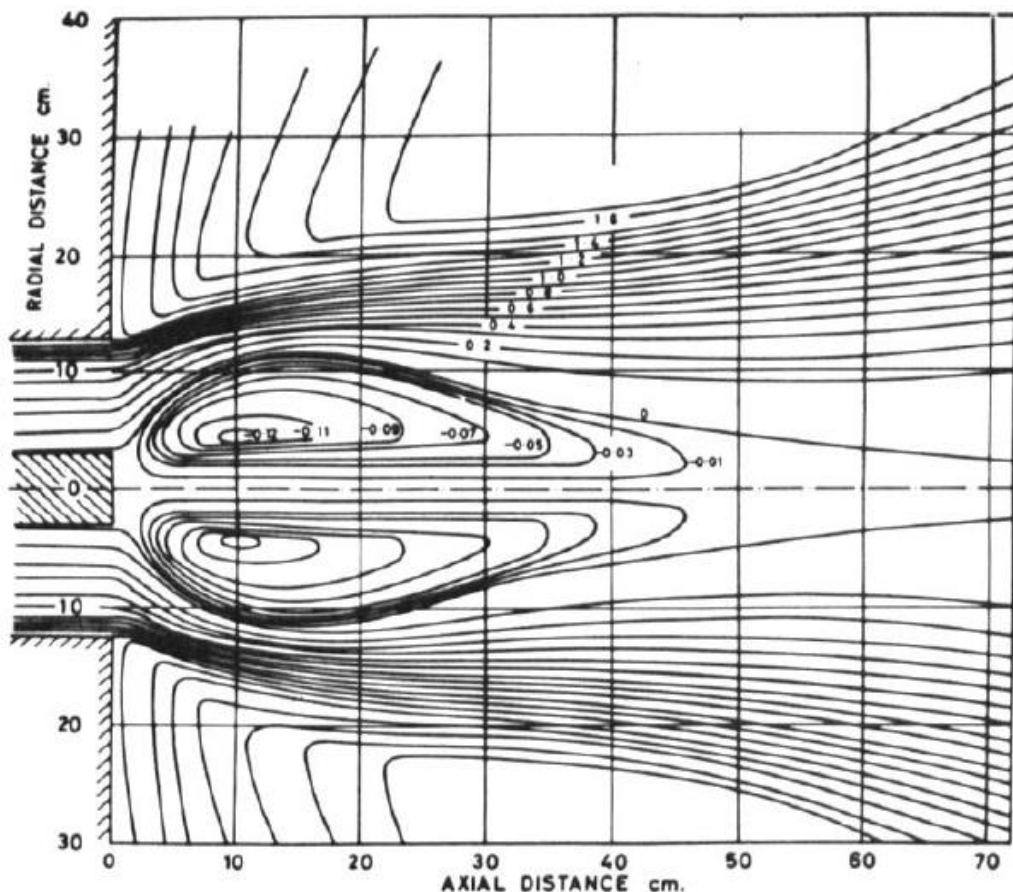


Fonte: Adaptado de Beér; Chigier (1972).



Segundo Syred e Beér (1974), os escoamentos tipo *swirl* apresentam zonas de recirculação toroidais centrais (ZCR) que influenciam diretamente as melhorias na estabilização de chama dentro do *swirl*. O centro da zona de recirculação geralmente ocorre próximo ao bocal de saída, à jusante do queimador, como mostra a Figura 7. Conforme o jato se desenvolve, a zona de recirculação se dissipa e a pressão baixa no centro se recupera, gerando um gradiente de pressão axial e fazendo com que haja um desprendimento de vórtices. Porém, em níveis altos de turbulência, o fluxo é revertido formando um vórtice em forma de toroide (anel). As linhas de corrente deste escoamento são resultado da combinação entre a pressão da parede no fluido em contraponto com as forças viscosas e de pressão radial.

Figura 7 – Zona de recirculação mostradas através de linhas de corrente.



Fonte: Adaptado de Syred; Beér (1974).

O escoamento rotacional (*swirling flows*) é formado por fluxos em forma de redemoinho que apresentam uma componente de velocidade tangencial associada às

componentes axial e radial, também encontradas nos outros tipos de jatos. Quando o fluxo rotacional pode ser induzido logo na saída do bocal, o jato já entra na câmara com as componentes tangencial, radial e axial da velocidade. A rotação do escoamento pode ser provocada de três formas principais: através de entrada tangencial de fluido; pás direcionadoras de fluxo ou dispositivos rotativos para transmissão de movimentação do fluido. Para queimadores industriais, é mais comum a utilização dos dois primeiros métodos. (BEÉR; CHIGIER, 1972)

Este tipo de jato é utilizado para controlar as chamas nas câmaras de combustão através da ampliação da dispersão e aceleração da mistura, além de controlar a mistura entre os reagentes e o fluxo de recirculação, podendo também ser utilizado como estabilizador de chama. O jato *swirl* turbulento (*swirling turbulent jet*), tem sua aerodinâmica descrita pela junção das características do movimento de rotação e fenômeno de turbulência.

O nível de *swirl* em termos quantitativos é descrito pela razão adimensional entre a velocidade angular e linear. Em um escoamento com *swirl* forte, forma-se um fluxo reverso ao longo do eixo provocado pelo alto gradiente de pressão axial adverso.

Baseado nas equações de Beér; Chigier (1972), Ishak et al. (2009), utilizaram as Equações de 1 a 3 para calcular o número de *Swirl* (Equação 3). Este número é um parâmetro adimensional para avaliar a intensidade do *swirl* calculado a partir dos fluxos de momentum momento angular  $G_\varphi$  e axial  $G_x$  (Equações 1 e 2). De acordo Beér; Chigier (1972), o *swirl* é considerado alto se o número de *Swirl* foi maior que 0,6

$$G_\varphi = 2\pi \int_0^\infty (W) \rho u r^2 dr \quad (1)$$

$$G_x = 2\pi \int_0^\infty \rho u^2 r dr + 2\pi \int_0^\infty p r dr \quad (2)$$

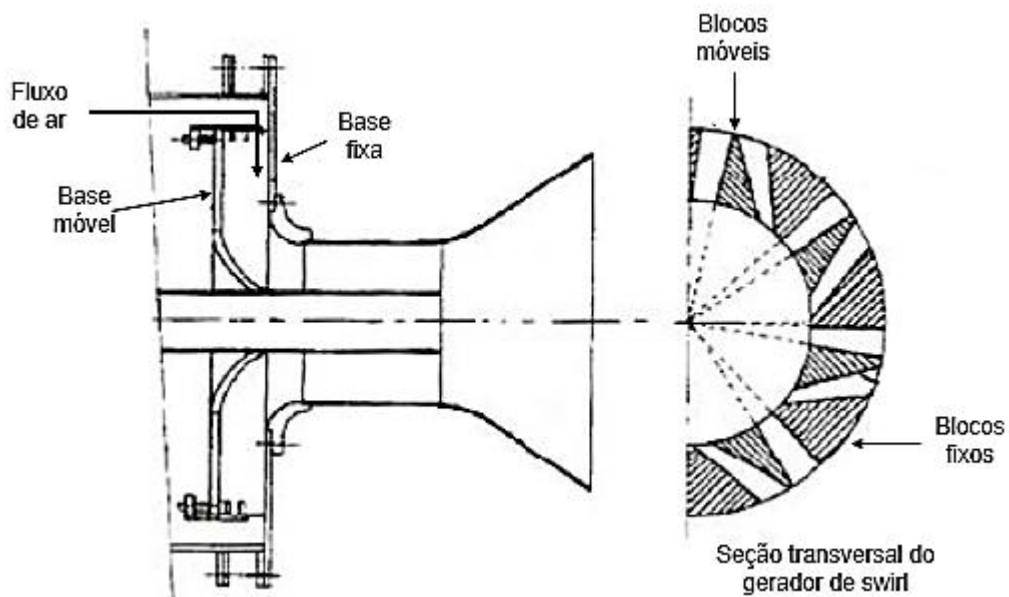
$$S = \frac{G_\varphi}{G_x R} \quad (3)$$

Onde  $u$  é a velocidade axial,  $W$  a velocidade radial,  $p$  é a pressão estática,  $r$  é a coordenada radial e  $\rho$  é a massa específica.  $R$  é o raio da saída do queimador (*burner nozzle*).

Esta relação é possível nos jatos livres em turbilhão (*swirling free jets*), pois  $G_\phi$  e  $G_x$  se conservam e podem ser descritos como funções integrais do raio do queimador e descrevem o comportamento aerodinâmico do escoamento.

Beér; Chigier (1972) concluíram também, por meio de experimentos, que o número de *swirl* pode ser utilizado como critério de comparação entre geradores de *swirl* semelhantes geometricamente. A equação 3 é a equação geral para o número de *swirl*, porém Beér; Chigier (1972) fizeram deduções para o tipo de gerador de *swirl* de blocos móveis (Figura 8) guiados por seu experimento, na qual serviu de inspiração para outros trabalhos.

Figura 8 – Geometria proposta por Beér; Chigier (1972).



Fonte: Adaptado de Beér; Chigier (1972).

## 2.3 BIODIESEL

O biodiesel é um combustível alternativo substituto direto do diesel. O biodiesel é definido pelo PNPB (Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel) como um combustível biodegradável que deriva de fontes renováveis, podendo ser proveniente de óleos vegetais ou gorduras animais.

A maior parte dos biodieseis são produzidos a partir de óleos vegetais como canola, milho, girassol, soja e palma. Além desses, o estudo de óleos residuais de cozinha como matéria-prima para o biodiesel está ganhando relevância nos últimos anos. (PINTO et al., 2005; YAAKOB et al., 2013; AJALA et al., 2017)

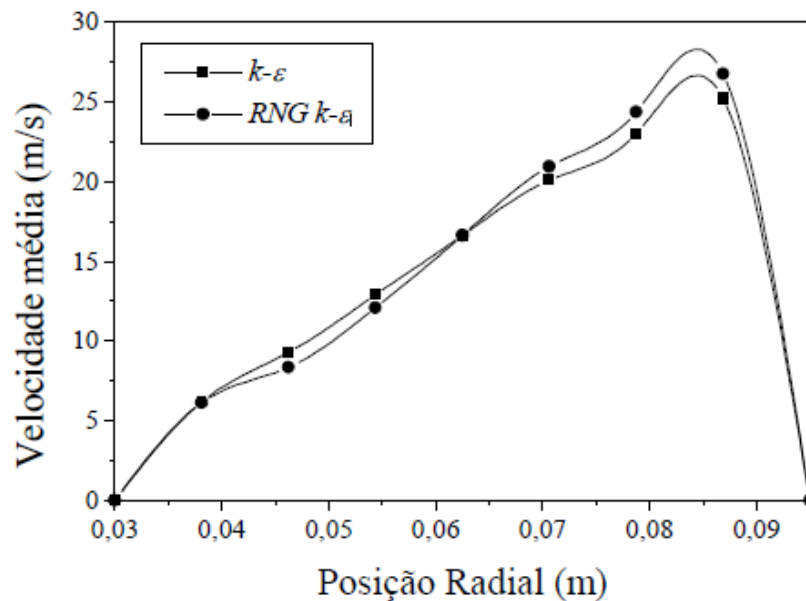
A busca por novos métodos de produção e novas origens para o biodiesel se deve não só à poluição provocada pelos combustíveis originados do petróleo e às previsões de que este recurso pode se tornar escasso diante da grande dependência que o mundo tem em relação a ele, mas também do fato da obtenção do biodiesel ser mais cara que a dos combustíveis fósseis e da maior parte das matérias-primas do biodiesel serem comestíveis contrariando os esforços para diminuir a fome mundial. (YAAKOB et al., 2013; ARANSIOLA et al., 2014)

O biodiesel é formado por cadeias longas de ácidos graxos, uma característica presente em óleos e gorduras animais e vegetais. A produção, na maioria das vezes, ocorre por meio de uma reação chamada de transesterificação, na qual ocorre a produção de ésteres a partir da interação entre um óleo e um álcool, resultando também em um subproduto que pode ser glicerol ou glicerina. (LOFRANO, 2008; ARANSIOLA et al., 2014;)

## 2.4 ESTADO DA ARTE

O conhecimento relacionado com o estudo do *swirl* e da aerodinâmica de combustão, assim como o estudo das possibilidades para o biodiesel e a utilização do CFD para análise geral destes, vem se desenvolvendo cientificamente através de trabalhos acadêmicos e artigos científicos. Entretanto ainda são poucos os trabalhos que se propõe em estudar através da Fluidodinâmica Computacional, a aerodinâmica de combustão. Nesse âmbito, alguns autores propuseram o estudo do *swirl* como alternativa para a redução de poluentes como NOx.

Figura 9 – Gráfico de velocidade resultante comparando os modelos de turbulência.



Fonte: Adaptado de FUDIHARA; GOLDSTEIN; MORI (2003)

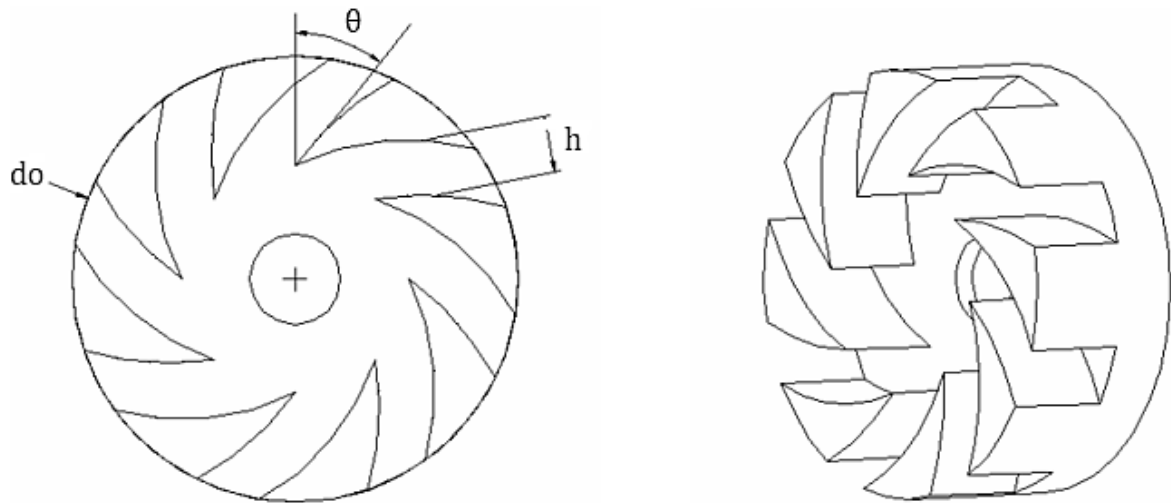
Em 2003, Fudihara, Goldstein e Mori fizeram um estudo utilizando fluidodinâmica computacional para analisar a aerodinâmica de um queimador de blocos móveis utilizando a geometria de Beér e Chigier (1972) da seção anterior (Figura 8). A simulação foi em regime permanente, com escoamento isotérmico e incompressível, sem considerar a combustão e as reações. Eles compararam os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  e  $RNG\ k-\epsilon$ . Os resultados obtidos nos dois modelos foram semelhantes (Figura 9), porém o  $RNG\ k-\epsilon$  descreveu melhor o fluxo reverso na direção

da injeção do queimador. Os mesmos autores refizeram o estudo em 2007 afim de investigar melhor as velocidades e os efeitos do fluxo reverso, desta vez utilizando apenas o RNG k- $\epsilon$ . Traçaram um perfil do número de *swirl* ao longo da câmara. (FUDIHARA; GOLDSTEIN; MORI, 2003, 2007)

Experimentos acerca do escoamento do biodiesel, atomização e aerodinâmica de combustão começaram a aparecer utilizando turbina a gás. Bolszo; McDonell (2009) investigaram, dentre outros parâmetros como o nível de emissões, a atomização e a influência do tamanho de gota do biodiesel em comparação com o diesel numa turbina a gás em escala reduzida. O motor de turbina a gás utilizado continha três injetores de ar com atomizador. Eles otimizaram a atomização do biodiesel e conseguiram diminuir o diâmetro da gota em até 26 micrômetros. Com isso eles conseguiram diminuir as emissões de NO, porém os valores mínimos de emissão de NOx ainda ficaram acima dos valores mínimos para o diesel.

ISHAK et al. (2009) mostraram experimentalmente em um queimador de combustível líquido que um design adequado do direcionador de ar (*swirler*) tem influência na mistura ar-combustível, conseqüentemente na qualidade da combustão e no nível de emissões. Eles investigaram um sistema de queima com redutores de ar (*swirlers*) radiais (Figura 10) anexados a câmara de combustão utilizando o biodiesel de palma como combustível. Foram utilizados quatro geradores de *swirl* com lâminas curvas cujos ângulos eram diferentes para cada redutor, 45°, 50°, 60° e 70°, obtendo-se um número de *swirl* menor para o ângulo de pá de 45° e maior para o de 70°. Foi obtida uma redução de emissões de NOx de aproximadamente 12% do direcionador com número de *swirl* mais elevado em comparação com o de menor *swirl*. Conseguiu-se também uma diminuição da emissão de monóxido de carbono com o aumento do número de *swirl*. Com isso, eles demonstraram que uma geometria adequada do *swirler* melhora o processo de mistura entre o biodiesel e o ar.

Figura 10 – Gerador de *swirl* utilizado por ISHAK et al. (2009).



Fonte: ISHAK et al. (2009).

Novella et al. (2011) estudaram numericamente o fenômeno da pulverização do diesel através de CFD afim de obter resultados mais próximos de experimentos anteriores analisando alguns parâmetros e relacionando-os com literatura prévia. Definiram o modelo de turbulência utilizado como o  $k-\epsilon$  por ter tido uma boa concordância com os dados experimentais.

Em relação à utilização do biodiesel, nota-se um aumento de trabalhos que estudam e analisam este combustível. Chong (2011) traz uma análise da pulverização, porém ele utilizou uma turbina a gás, já Alviso et al. (2011) utilizaram um queimador de contra fluxo para caracterizar o biodiesel.

CHONG (2011) comparou experimentalmente aspectos da combustão de diversos combustíveis, como o biodiesel e o diesel, Jet-A1, n-heptano, acetona, metano e metano/acetona, analisando diversos parâmetros na câmara de uma turbina a gás. Para avaliação da pulverização (*spray*), ele utilizou em seu experimento um anemômetro de fase Doppler. Ele concluiu que o biocombustível tem características de pulverização semelhantes aos combustíveis convencionais e que a emissão de NOx é menor para o biodiesel, atestando o uso potencial do biodiesel em turbinas a gás.

Alviso et al. (2011) estudaram a combustão do biodiesel analisando fatores como velocidade da combustão e o nível de emissões, afim de caracterizá-lo. O

experimento foi conduzido utilizando um queimador de contra fluxo com duas chamas pré-misturadas sendo uma de biodiesel com ar e outra de metano com ar, esta última usada apenas para garantir a temperatura de ignição do biodiesel. O objetivo do estudo era coletar informações sobre o biodiesel extraído da colza e da soja. As emissões de  $\text{CH}^*$  e  $\text{OH}^*$  para o biodiesel e o metano foram medidas através da espectroscopia de emissões. Para os dois poluentes analisados, o biodiesel apresentou um número muito menor do que o do metano, porém isso foi justificado pelo fato da chama de metano ser mais intensa.

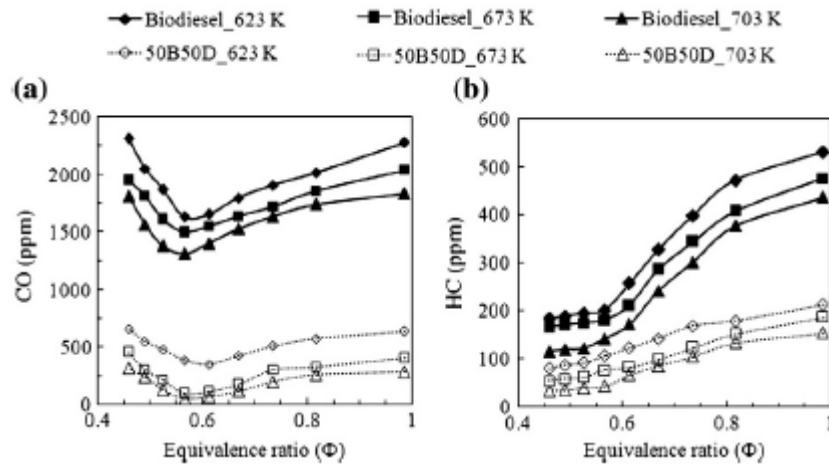
Ishak et al. (2012) fizeram um estudo da pulverização do querosene em um queimador para combustível líquido. Determinaram o tamanho de gota empiricamente e através de simulação em CFD. O modelo de turbulência utilizado para analisar a geometria foi o  $k-\epsilon$ , que descreveu a pulverização do combustível de maneira satisfatória.

A combustão por pulverização foi modelada em CFD por YASIN et al. (2014) com o diesel e o biodiesel e comparado com modelo experimental. Foram feitas comparações entre as pulverizações dos dois combustíveis utilizando como modelo de turbulência o  $k-\epsilon$ . Um experimento em um queimador com *swirl* foi realizado para validar o modelo numérico. O fluxo de volume e densidade de gotas foi maior para o biodiesel do que para o diesel.

FAN et al. (2014) avaliaram o efeito da viscosidade cinemática na pulverização em um experimento utilizando retroiluminação por pulso-laser. Eles controlaram a viscosidade através da variação de temperatura dos combustíveis e inseriram um jato de ar auxiliar para melhorar a atomização. Foram utilizados quatro óleos: óleo de *Jatropha* bruto, éster metílico de *Jatropha*, diesel e salmoura de propileno glicol. A análise dos diâmetros médios das gotas foi realizada em função da viscosidade. Concluíram que a intensidade da radiação da chama pode ser diminuída melhorando as características de atomização.



Figura 11 – Emissões de (a) CO e (b) HC dos combustíveis para diferentes razões de equivalência e temperaturas.



Fonte: Reddy et al. (2014)

Reddy et al. (2014) compararam experimentalmente e numericamente as emissões de vários poluentes do biodiesel puro e misturado com diesel através de um queimador de alto *swirl* e baixa emissão, com o objetivo de avaliar as características de combustão para as várias misturas do biodiesel com diesel e reduzir a formação de NO térmico. Para tanto, utilizou-se a recirculação interna de gases de escape. Eles encontraram um diâmetro médio de gota para o biodiesel a uma pressão de 9 bar na faixa de 36 a 39 $\mu$ m. Para simulação computacional adotaram como modelo de turbulência o *Reynolds Stress Model* (RSM). Uma redução drástica das emissões foi observada na mistura 50% de biodiesel e 50% de diesel em comparação com o biodiesel puro. A Figura 11 mostra a variação das emissões de CO e HC para o biodiesel puro e mistura de 50% em diferentes temperaturas.

Outro estudo acerca das misturas de biodiesel e diesel foi executado experimentalmente por Rahim et al. (2016) onde investigaram as emissões de vários compostos utilizando biodieseis diferentes comparando com diesel puro em um queimador de combustíveis líquidos. Foi realizado a priori um estudo da geometria para verificar entre três números de *swirl*, qual era o que mais reduzia as emissões e o resultado foi o que tinha maior número de *swirl*. Os poluentes analisados foram NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio), SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre), CO (monóxido de carbono), CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e O<sub>2</sub> (oxigênio). Ao passo que o biodiesel na mistura de combustível provoca uma redução nas emissões de CO, SO<sub>2</sub> e UHC, em relação às

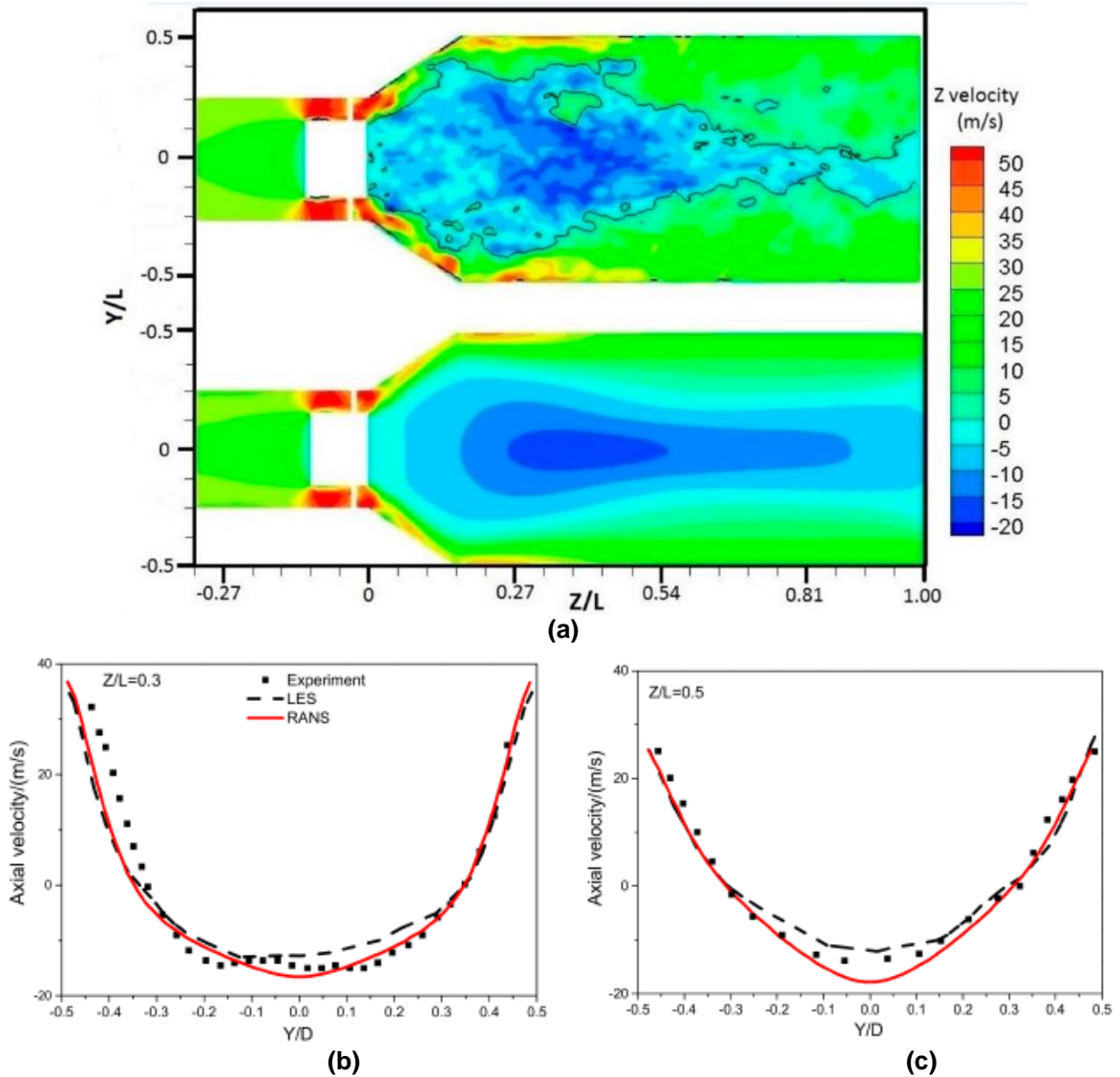
emissões de NOx há um aumento nas emissões. Concluíram que as misturas de biodiesel e diesel são, a nível de emissões, adequadas para uso em queimadores.

O estudo experimental do *swirl* em um regime de combustão sem chama visível foi feito por Silva (2016) através do desenvolvimento de uma bancada de testes para operar em vários regimes de combustão sem chama visível. Dentre outras coisas, estudou a recirculação do biodiesel e o efeito spray. Utilizando interferometria a laser, ele obteve o diâmetro de gota em função da temperatura do biodiesel para quatro pressões de entrada (4 bar, 6 bar, 8 bar, 10 bar). Os estudos resultaram em níveis de ruídos sonoros reduzidos, assim como as emissões de fuligem e as emissões de NOx e CO foram significativamente reduzidas.

CHONG; HOCHGREB (2017) concluíram, através de um experimento variando o tamanho das gotículas do biodiesel extraído da colza, do diesel e da mistura 50% entre os dois em uma turbina a gás, que a mistura de 50% de biodiesel com diesel resulta em redução significativa na radiação de fuligem. Ainda segundo eles, o biodiesel emite em média 22% menos de NOx, em comparação com o diesel em condições de queima magra.

Uma investigação sobre o fluxo turbulento de uma geometria geradora de *swirl* foi realizada numericamente por Liu et al. (2017) em uma turbina a gás. Eles utilizaram CFD e compararam os métodos LES e RANS com resultados experimentais prévios. Foi feito um mapeamento da velocidade para os dois modelos (Figura 12), onde a Figura 12a corresponde ao contorno das velocidades no plano central, e as Figuras 12b e 12c traz a comparação das velocidades entre os dois modelos com dados experimentais para duas posições em Z diferentes. O detalhamento da velocidade na turbulência dentro do vórtice foi descrito melhor pelo LES, porém os perfis de velocidades radiais foram bem próximos para os dois métodos.

Figura 12 – Mapeamento da velocidade axial através do (a) contorno no plano de corte – Fluxo instantâneo por LES (superior) e fluxo médio de tempo por RANS (parte inferior), (b) e (c) gráficos comparativos da velocidade.



Fonte: Liu et al. (2017)

Em síntese, os trabalhos citados que estudam o *swirl* e a combustão do biodiesel em queimadores utilizam tanto a metodologia experimental como a Fluidodinâmica Computacional para suas análises. O Quadro 1 apresenta as publicações citadas classificadas segundo o método utilizado

Quadro 1 – Classificação dos trabalhos de acordo com o tipo de método aplicado.

<b>Publicação</b>	<b>Experimental</b>	<b>Numérico</b>
Fudihara; Goldstein; Mori, 2003		X
Fudihara; Goldstein; Mori, 2007		X
Bolszo; McDonell (2009)	X	
Ishak et al. (2009)	X	
Novella et al. (2011)		X
Chong (2011)	X	
Alviso et al. (2011)	X	
Ishak et al. (2012)	X	X
Yasin et al. (2014)		X
Fan et al. (2014)	X	
Reddy et al. (2014)	X	X
Rahim et al. (2016)	X	
Silva (2016)	X	
Chong; Hochgreb (2017)	X	
Liu et al. (2017)		X

### 3 METODOLOGIA

Como explanado anteriormente, a proposta deste trabalho é analisar o escoamento rotacional (*swirl*) do biodiesel em um queimador industrial por meio da utilização da Fluidodinâmica Computacional. O *swirl* é um tipo de jato extremamente turbulento, e regimes turbulentos agregam maior nível de rigor matemático ao problema físico. Quando isso ocorre, para ser possível a aplicação de um método analítico, é necessário fazer muitas simplificações o que resulta em uma física distante da realidade. Assim, a aplicação do método numérico é a mais viável.

As simulações foram realizadas em regime permanente. Também não foram considerados os efeitos gravitacionais, por não serem tão relevantes para o fenômeno devido ao diâmetro das gotas de biodiesel serem pequenos.

O escoamento foi modelado como multifásico utilizando ar e biodiesel. Uma das características do comportamento aerodinâmico dos combustíveis em queimadores industriais é que sua saída do bico injetor se dá através de gotas. Por isso, a fim de representar este comportamento, o biodiesel foi tratado como fluido disperso e o ar foi definido como fluido contínuo nas simulações expostas a seguir.

#### 3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem do escoamento é feita através da equação da continuidade e das equações de Navier-Stokes. Ambas equações são apresentadas na forma diferencial e são obtidas a partir da dedução em um volume de controle infinitesimal. A partir da Lei da conservação de massa, na qual a massa do sistema não se altera pois este é uma quantidade fixa de massa, obtém-se a equação diferencial da conservação da massa. Esta, também é chamada de equação da continuidade, pois as únicas considerações necessárias são que a massa específica e a velocidade sejam funções contínuas. A seguir é exposta a equação da continuidade para regime permanente e escoamento incompressível (Equação 4).

$$\text{div}(r_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (4)$$

Onde  $r_\alpha$  e  $\vec{U}_\alpha$  são, respectivamente, a fração volumétrica e o vetor velocidade para a fase  $\alpha$ .

Para os escoamentos multifásicos, é necessário descrever a conservação de volume transportado. A equação 5 é a equação de continuidade para o volume.

$$\sum_{\alpha} \text{div}(r_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (5)$$

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais da quantidade de movimento que originalmente descrevem escoamento Newtoniano. A equação 6 é a equação de Navier-Stokes modificada para descrever o escoamento para uma das fases fluidas de um escoamento multifásico em regime permanente e sem transferência de massa entre as fases  $\alpha$  e  $\beta$ .

$$\begin{aligned} \text{div}(r_\alpha(\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \times \vec{U}_\alpha)) \\ = -r_\alpha \text{grad}(p_\alpha) + \text{div}(r_\alpha \mu_\alpha (\text{grad} \vec{U}_\alpha + (\text{grad} \vec{U}_\alpha)^T)) + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

$p_\alpha$  é a pressão na fase  $\alpha$ ,  $\rho_\alpha$  a massa específica da fase  $\alpha$ ,  $\mu_\alpha$  é a viscosidade dinâmica para fase  $\alpha$  e  $T$  corresponde à matriz transposta do termo entre parênteses.

O termo  $\vec{M}_\alpha$  descreve as forças que atuam na fase  $\alpha$  devido a outras fases. Escoamentos multifásicos necessitam de um modelo de arrasto que descreve a força de arrasto que a fase  $\beta$  provoca na fase  $\alpha$ . Assim, o termo  $\vec{M}_\alpha$  da equação 6 se transforma numa relação entre fases (Equação 7), que para este caso, será igual ao arrasto.

$$\vec{M}_\alpha = c_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (7)$$

Poderia ser considerado no termo  $\vec{M}_\alpha$ , a força gravitacional (Equação 8), porém a força de arrasto é mais significativa devido o diâmetro da partícula ser pequeno.

$$\vec{F}_g = r_\beta (\rho_\beta - \rho_\alpha) g \quad (8)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade.

O coeficiente  $c_{\alpha\beta}^{(d)}$  é resultado da dedução matemática apresentada a seguir, que depende da área projetada,  $A_p$  (Equação 9), do volume de uma partícula esférica,  $V_p$  (Equação 10) e do número de partículas por volume,  $n_p$  (Equação 11).

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (9)$$

$$V_p = \frac{\pi d_p^3}{6} \quad (10)$$

$$n_p = \frac{r_\beta}{V_p} \quad (11)$$

Onde  $d$  é o diâmetro da partícula.

A equação 12 descreve a força de arrasto  $\vec{D}_p$  exercida por uma única partícula na fase contínua e a equação 13 descreve o arrasto total  $\vec{D}_{\alpha\beta}$  entre as fases. Substituindo a força de arrasto total na equação 7, consegue-se extrair o coeficiente  $c_{\alpha\beta}^{(d)}$  (Equação 14), através da equação 13, obtendo assim a equação 15.

$$\vec{D}_p = \frac{1}{2} C_D \rho_\alpha A_p |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (12)$$

$$\vec{D}_{\alpha\beta} = n_p \vec{D}_p = \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} r_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (13)$$

$$\vec{D}_{\alpha\beta} = c_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (14)$$

$$c_{\alpha\beta}^{(d)} = c_{\alpha\beta}^{(d)} \frac{3}{4} \frac{C_D}{d_p} r_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| \quad (15)$$

Onde,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto.

No caso de fases dispersas ou partículas, o coeficiente de arrasto pode ser calculado através de um modelo de arrasto. O modelo utilizado para descrever o arrasto entre as fases foi o Schiller Naumann, cuja a equação (16) depende do número de Reynolds  $Re$  (Equação 17) e é descrita como:

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re}(1 + 0,15 Re^{0,687}); 0,44\right) \quad (16)$$

$$Re = \frac{\rho_\alpha \vec{U}_\alpha d}{\mu_\alpha} \quad (17)$$

Onde  $d$  é o diâmetro da câmara.

A equação 16 considera o valor máximo entre o coeficiente de arrasto calculado e 0,44, que é o coeficiente de arrasto de uma esfera lisa e é considerado o menor coeficiente de arrasto teórico (WHITE, 1962).

### 3.2 MÉTODO NUMÉRICO

A principal tarefa do método numérico é transformar as equações diferenciais, definidas em um domínio, em um sistema de equações algébricas (MALISKA, 2004). Para tanto, estes códigos são divididos em três macro etapas: pré-processamento, processamento e o pós-processamento.

A Fluidodinâmica Computacional analisa problemas envolvendo escoamentos de fluidos e fenômenos térmicos, através da computação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005), e possui aplicações em diversos campos como avaliação de equipamentos industriais (bombas, turbinas e queimadores), projetos



automobilísticos, estudos aerodinâmicos aplicados a turbinas eólicas e engenharia aeroespacial, entre outros.

Para se desenvolver numericamente problemas fluidodinâmicos, é necessário a obtenção da solução das equações de Navier-Stokes. Porém, só é possível obter uma solução através do método analítico se forem feitas simplificações, o que distancia a solução da realidade. Deste modo, os métodos numéricos podem trabalhar com uma quantidade maior de equações e com nível de complexidade elevado.

As soluções computacionais são obtidas em dois estágios: discretização, onde as equações diferenciais são convertidas em um sistema de equações algébricas discretas; e implementação do método numérico, onde é aplicado um método para solucionar o sistema linear. (TU; YEOH; LIU, 2008)

Os métodos numéricos para discretização mais utilizados na Fluidodinâmica Computacional são diferenças finitas e volumes finitos. O método de elementos finitos não é tão utilizado na fluidodinâmica computacional por exigir mais capacidade computacional que os métodos citados, porém é comumente aplicado para simulações fluido-estrutura. O cálculo diferencial realizado por estes métodos, não pode ser aplicado para a geometria total, é necessário dividir o domínio em pequenos volumes de controle discretos, caracterizando uma grade ou malha computacional. (TU; YEOH; LIU, 2008)

O método de diferenças finitas se baseia na geração de aproximações de diferenças finitas para as derivadas parciais das equações governantes, através da aplicação das séries de Taylor em cada nó da malha computacional. Ao final para cada nó uma equação algébrica é produzida para solução do escoamento. Este método requer malhas com alto grau de regularidade, por isso é mais comum a utilização de malhas estruturadas. (TU; YEOH; LIU, 2008)

No método de volumes finitos, a discretização das equações na forma integral é feita de maneira direta e os cálculos são efetuados no centroide dos volumes de controle da malha, o que ocorre por meio de interpolação para que os valores das extremidades do volume de controle sejam abrangidos. Com isso, para cada volume de controle existe uma equação algébrica que depende do número de nós vizinhos ao elemento.

No presente trabalho, foi utilizado o software Ansys CFX 19.0 para a obtenção dessas soluções. O referido programa faz uso do método de volumes finitos.

A metodologia de solução das equações utilizada pelo método volumes finitos, necessita de um método de acoplamento entre velocidade e pressão. Essas duas variáveis estão interligadas, uma interfere na outra de tal modo que não podem ser desassociadas. Para isso, utiliza-se o modelo de Rhie e Chow (1983), onde uma equação dinâmica é aplicada a cada ponto de integração, obtendo uma expressão para a velocidade de advecção.

Todavia, antes da aplicação de um método numérico, é necessário um modelo de turbulência. O regime turbulento é definido como caótico com altos níveis de flutuações (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005). A turbulência é formada por um emaranhado de vórtices crescendo influenciados por seu campo de velocidade. Um fluxo turbulento contém um fluxo médio e um componente aleatório com flutuações de movimento. A aleatoriedade do fluxo turbulento é promovida pela velocidade. O campo de velocidade apresenta flutuações aleatórias no tempo, é desordenado no espaço e instável. (DAVIDSON, 2004)

Por conta da complexidade deste regime e das limitações computacionais, é necessário fazer algumas aproximações para as equações de Navier-Stokes. Além disso, para grande parte dos problemas de engenharia, a solução dos detalhes presentes nas flutuações instantâneas é desnecessária.

O que é feito a princípio, para a maioria dos casos, são modificações das equações de Navier-Stokes, ao calcular médias das flutuações, o que resulta no aparecimento de termos extras na equação. As equações finais resultam no método RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), médias de Reynolds para Navier-Stokes. Entretanto, como os detalhes acerca do comportamento do fluido estão contidos nas flutuações instantâneas, a utilização das equações RANS para cálculo dos fluxos só é possível se aplicado a um modelo de turbulência. O objetivo deste é descrever o fluido de uma forma geral através da previsão do comportamento das tensões de Reynolds e dos termos de transporte e escalar. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005; WILCOX, 1993)

Todo modelo de turbulência tem sua particularidade em relação ao modo de resolver as equações descritoras do fluido e a escolha do melhor modelo é feita de acordo com a precisão necessária e o recurso computacional disponível. Os modelos de turbulência que se baseiam nas equações RANS para resolver o escoamento, requerem menos recurso computacional, e o nível de precisão desses modelos é suficiente para grande parte das aplicações de engenharia. Pois, como citado anteriormente, na maioria dos casos não há preocupação com as flutuações instantâneas, e sim, com o comportamento geral do fluido. (TU; YEOH; LIU, 2008)

Como o foco deste trabalho não é o estudo do modelo de turbulência, a escolha deste foi feita com base na literatura. Os modelos mais utilizados para o estudo da aerodinâmica de combustão foram o LES (*Large Eddy Simulation*) e alguns modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) como o  $k-\epsilon$ . O LES modela os vórtices menores e calcula os redemoinhos maiores, partindo da ideia que os vórtices maiores carregam a maior parte das tensões de Reynolds pois são diretamente influenciados pelas condições de contorno. Então, o LES modela pequenos vórtices e resolve também equações de fluxo instável, necessitando de uma malha refinada. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005; WILCOX, 1993)

Por isso, o LES pode chegar a uma precisão maior que alguns modelos que utilizam as RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), todavia é necessária uma carga computacional grande (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005). Já as RANS são equações que utilizam médias de Reynolds para as flutuações. Dentre os modelos que as utilizaram para descrever a turbulência do escoamento rotacional estão RNG  $k-\epsilon$ ,  $k-\epsilon$  e o RSM (Reynolds Stress Model). O modelo mais difundido para simulação do escoamento rotacional foi o  $k-\epsilon$  que é um modelo RANS robusto e pode ser usado para uma grande variedade de casos e requer baixo recurso computacional. Os trabalhos que usaram o  $k-\epsilon$  conseguiram ter bons resultados na análise do *swirl* (FUDIHARA; GOLDSTEIN; MORI, 2003, 2007; NOVELLA et al., 2011; ISHAK et al., 2012). Portanto o  $k-\epsilon$  foi o modelo escolhido para simular o escoamento no presente trabalho, pois não exige tanto recurso computacional diante os bons resultados obtidos nos trabalhos citados. Os modelos de turbulência utilizados pelos trabalhos numéricos apresentados no estado da arte (item 2.4) foram agrupados no Quadro 2.

Quadro 2 - Modelos de turbulência utilizados para análise do swirl.

Modelos de Turbulência	Número de trabalhos	Vantagens	Desvantagens
<b>LES</b>	3	Mais preciso que os modelos RANS; capaz de resolver casos complexos.	Requer capacidade computacional muito elevada e longo tempo de processamento
<b>RSM</b>	1	Mais geral dos modelos clássicos; precisão elevada no cálculo das propriedades médias de fluxo e tensões de Reynolds de fluxos simples a mais complexos, incluindo jatos de parede, escoamentos assimétricos e escoamentos curvos.	Alto custos de computação; não tão amplamente validado; funciona mal em alguns fluxos devido a problemas idênticos com a modelagem de equações $\epsilon$ (por exemplo, jatos axissimétricos e fluxos de recirculação não confinados)
<b>k-<math>\epsilon</math></b>	4	Robusto; aplicável a uma grande variedade de casos; bem estabelecido, modelo mais amplamente validado	Desempenho inferior em casos complexos, como alguns fluxos não confinados, fluxos com grandes tensões e fluxos rotativos.
<b>RNG k-<math>\epsilon</math></b>	2	Bom para casos com complexidade moderada	Sujeito a limitações devido à hipótese de viscosidade isotrópica.

Fonte: Adaptado de Versteeg; Malalasekera (2005)

O modelo de turbulência k- $\epsilon$  é amplamente utilizado na literatura devido à abrangência dos tipos de casos aos quais ele pode ser aplicado, com precisão razoavelmente boa, mas principalmente, por não necessitar de uma grande capacidade de processamento. Ele parte da suposição de uma relação entre a ação das tensões viscosas e tensões de Reynolds, a viscosidade turbulenta  $\mu_{t\alpha}$  (Equação 18). A particularidade deste método está na resolução de duas equações (19 e 20) além das equações de Navier-Stokes, energia cinética turbulenta  $k_\alpha$  e a dissipação dessa energia cinética  $\epsilon_\alpha$ . (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005; WILCOX, 1993)

$$\mu_{t\alpha} = c_\mu \rho_\alpha \left( \frac{k_\alpha^2}{\epsilon_\alpha} \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \text{div}\left(r_\alpha \left(\rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k}\right) \text{grad} k_\alpha\right)\right) = r_\alpha (P_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) + T_{\alpha\beta}^\varepsilon \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \text{div}\left(r_\alpha \left(\rho_\alpha U_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon}\right) \text{grad} \varepsilon_\alpha\right)\right) \\ = r_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_{\varepsilon 1} P_\alpha - C_{\varepsilon 2} \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) + T_{\alpha\beta}^\varepsilon \end{aligned} \quad (20)$$

onde  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  e  $C_\mu$  são constantes do modelo cujos valores estão expostos na Tabela 1.  $P_\alpha$ , produção de turbulência devido a forças viscosas que é modelado a partir da equação 21.

Tabela 1 – Valores das constantes do modelo k-ε.

Constante	Valor
$C_{\varepsilon 1}$	1,44
$C_{\varepsilon 2}$	1,92
$\sigma_k$	1,0
$\sigma_\varepsilon$	1,3
$C_\mu$	0,09

$$P_\alpha = \sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 \sum_{c=1}^3 \left[ \mu_{t\alpha} \left( \frac{\partial U_a}{\partial x_b} + \frac{\partial U_b}{\partial x_a} \right) \frac{\partial U}{\partial x_b} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_c}{\partial x_c} \left( 3\mu_{t\alpha} \frac{\partial U_c}{\partial x_c} + \rho_\alpha k_\alpha \right) \right] \quad (21)$$

O modelo k-ε trata apenas fases contínuas. No caso da fase dispersa, é necessário um modelo de transporte para descrever a turbulência para este tipo de fluxo. O modelo que o Ansys CFX utiliza para descrever a turbulência da partícula é o *Dispersed Phase Zero Equation Model* ou Modelo de Zero Equação para Fase Dispersa como mostra a Equação 22. Neste modelo, a tensão de cisalhamento é relacionada em cada ponto, com as condições de fluxo médio (MARKATOS, 1986). Este tipo de modelo é bastante utilizado, pois é formado apenas por equações algébricas.

$$\mu_{td} = \frac{\rho_d \mu_{tc}}{\rho_c Pr_t} \quad (22)$$

Onde,  $Pr_t$  é o número de Prandtl turbulento que associa as viscosidades da fase dispersa  $\mu_{td}$  com a da fase contínua  $\mu_{tc}$ .

De modo prático e sucinto, as etapas do desenvolvimento de toda a modelagem em CFD para o usuário e também para o andamento deste trabalho, são:

- A confecção da geometria, que é a representação do domínio físico onde ocorrerá o escoamento. Para escoamentos internos, o domínio é toda região interna seja uma tubulação, caldeira ou câmara de combustão. No caso de escoamentos externos, é necessário definir uma região de interesse, ou seja, a distância máxima do objeto estudo na qual o escoamento será relevante.
- Confecção da malha, onde a geometria é dividida em pequenos volumes (elementos). A escolha do tamanho dos elementos deve ser feita com base na complexidade da geometria, problema físico e, em contraponto, o recurso computacional disponível. Devido à interferência que a malha pode provocar no resultado, pode ser feito um estudo de convergência de malha.
- Pré-processamento que engloba a definição de todas as condições físicas e químicas, se houver, onde o problema é reportado. Para isso é necessário um entendimento do fenômeno físico como um todo. Tudo que for relevante para a solução do problema, parâmetros, condições, entradas, saídas, considerações e simplificações são colocadas nesta fase para que no processamento, o código chegue numa solução condizente com a realidade em tempo hábil considerando o recurso computacional disponível.
- Solução do sistema de equações. No Ansys CFX, a plataforma que resolve estas equações, mostra o andamento das soluções através de gráfico de resíduos, que é um modo de avaliar os resultados e observar o estado de convergência.
- Avaliação dos resultados. No CFD, há inúmeros resultados que podem ser extraídos na etapa de pós processamento, porém é fundamental que o usuário saiba quais resultados são relevantes para o seu problema ou as variáveis de interesse.

### 3.2.1 Geometria

Para um posterior processamento em CFD é necessário definir o domínio físico de interesse, para confeccionar a geometria a ser estudada.

A geometria da câmara escolhida foi baseada em Oliveira et al. (2014), que simularam em CFD um queimador industrial rotacional. A partir desta geometria, foram feitas algumas modificações para melhorar a convergência e o escoamento (Figura 13). A figura 14 mostra as dimensões utilizadas nesta câmara.

Figura 13 – Câmara de combustão utilizada neste trabalho.

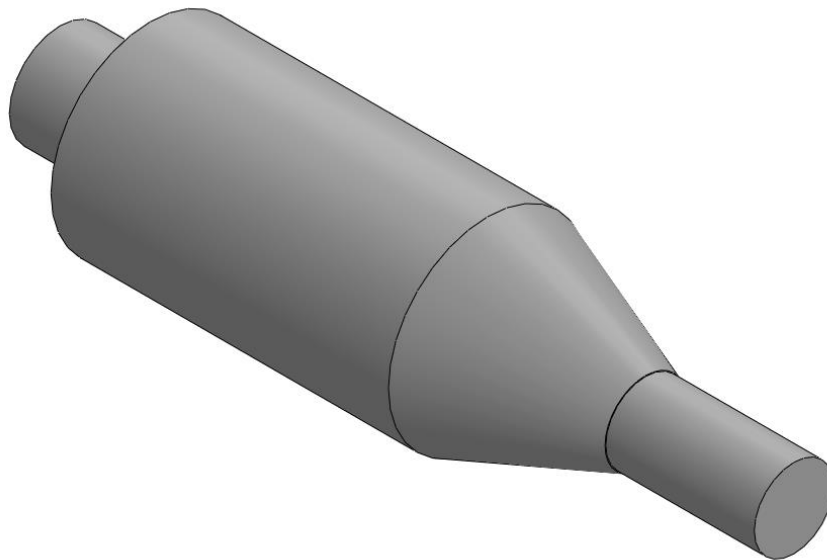
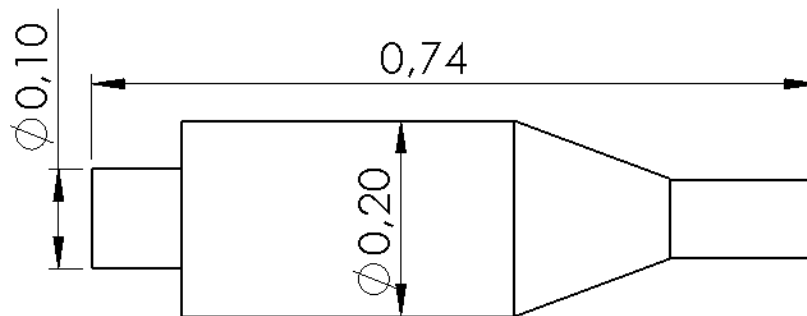
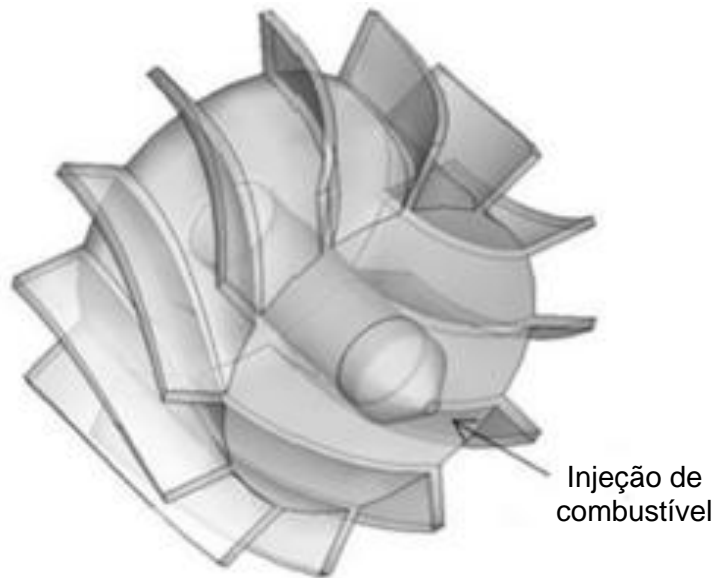


Figura 14 – Arranjo dimensional da câmara de combustão em metros.



Para provocar o *swirl*, optou-se por pás inspiradas nos modelos na literatura como o de Liu et al. (2017). O gerador de redemoinho (*swirler*) utilizado no referido trabalho apresenta 12 pás com ângulo da curva de  $45^\circ$  (Figura 15).

Figura 15 – Imagem do gerador de redemoinho (*swirler*) utilizado por Liu et al. (2017).



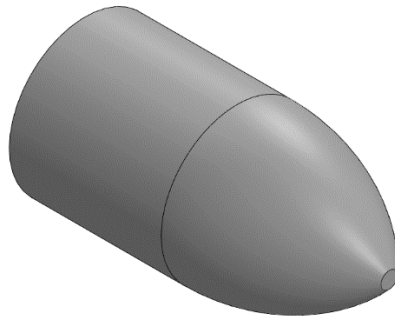
Fonte: Liu et al., 2017

No *swirler* desenhado para este trabalho, foram colocadas 14 pás formadas por duas partes retas e um ângulo suavizado entre elas, a fim de criar um jato turbilhonado e fazer com que modificação e fabricação da geometria fossem de maneira simples. Para avaliar a influência da geometria no escoamento, foi decidido variar o ângulo da pá. A princípio, serão feitas simulações para uma geometria sem pás, ou seja, sem *swirler*, e depois com dois ângulos de pás distintos, denominadas *Swirler 1* e *Swirler 2*.

A Figura 16 mostra o desenho da geometria sem pás.

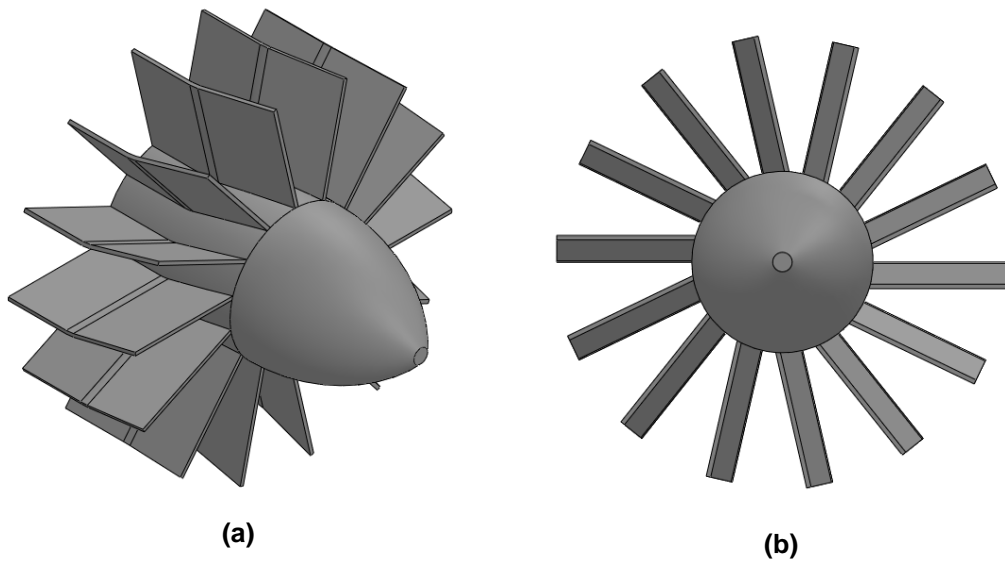


Figura 16 – Visão 3D da geometria sem pás (sem *swirler*).



A geometria do *Swirler 1* é apresentada na Figura 17. A Figura 17a mostra a geometria na vista isométrica (tridimensional). Na Figura 17b, o *Swirler 1* é mostrado na vista frontal.

Figura 17 – Visão 3D da geometria do *Swirler 1* na (a) vista isométrica e (b) frontal.



A geometria do *Swirler 2*, que tem o ângulo de pá mais acentuado, é apresentada na Figura 18. A Figura 18a mostra a geometria na vista isométrica (tridimensional). Na Figura 18b, o *Swirler 2* é mostrado na vista frontal.

Figura 18 – Visão 3D da geometria do *Swirler 2* na (a) vista isométrica e (b) frontal.

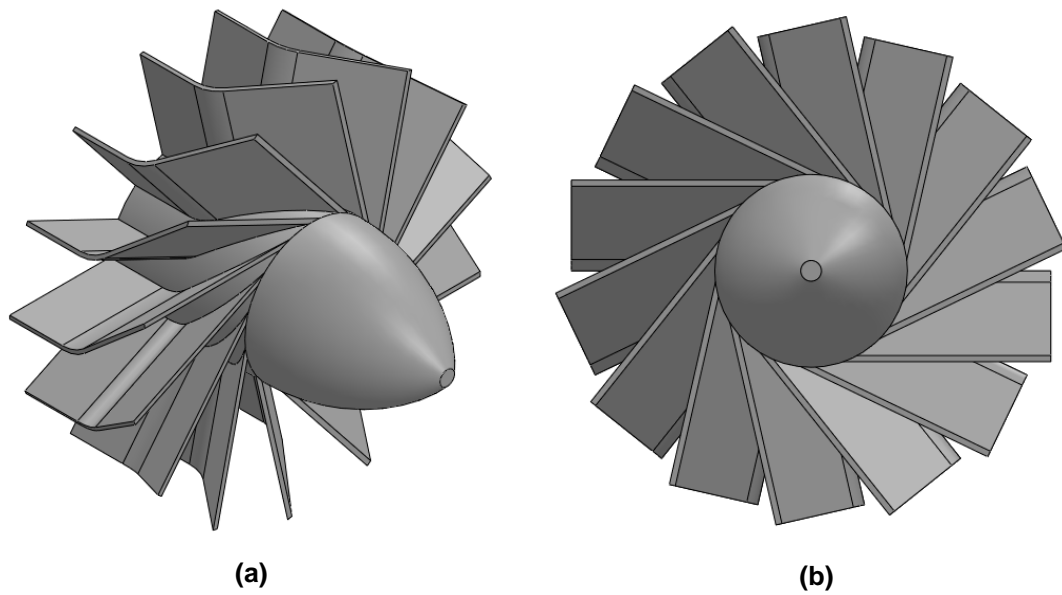
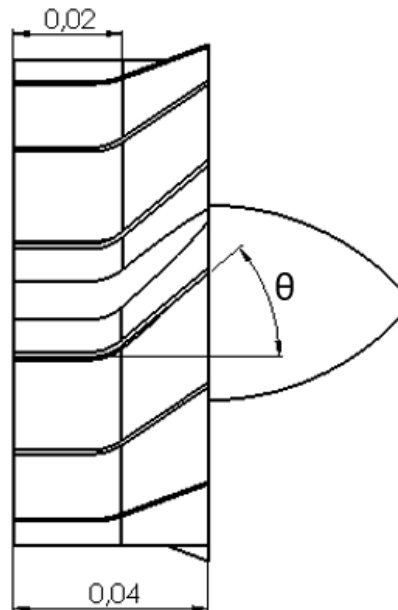


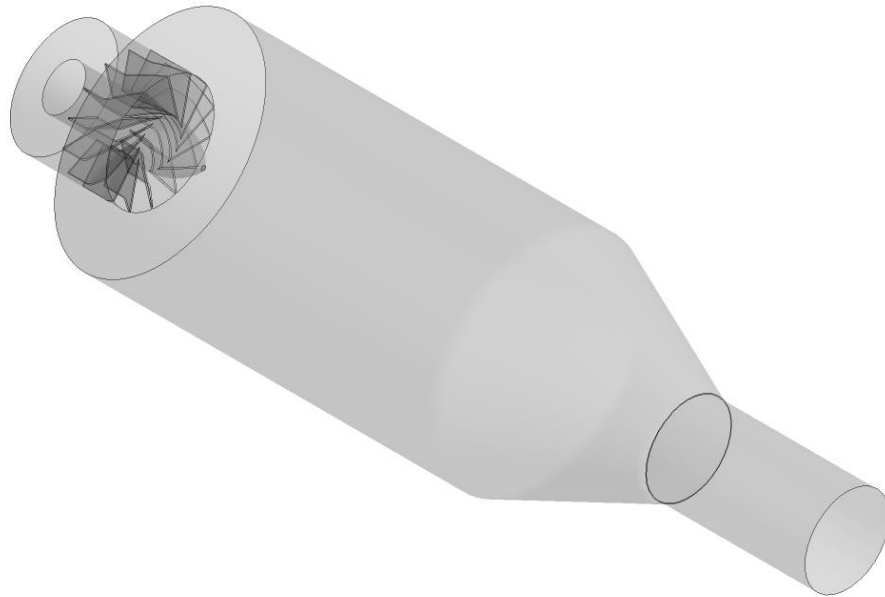
Figura 19 – Arranjo dimensional para o conjunto de pás em metros.



A Figura 19 mostra o arranjo dimensional utilizado para as geometrias com *swirl* com a variação do ângulo  $\theta$ . O ângulo  $\theta$  é igual a  $13,39^\circ$  e  $40,60^\circ$  para *Swirler 1* e *2*, respectivamente.

O domínio computacional compreende a entrada de ar, a injeção de combustível, a câmara de combustão e uma saída estendida para o escoamento se desenvolver (Figura 20).

Figura 20 – Domínio computacional.

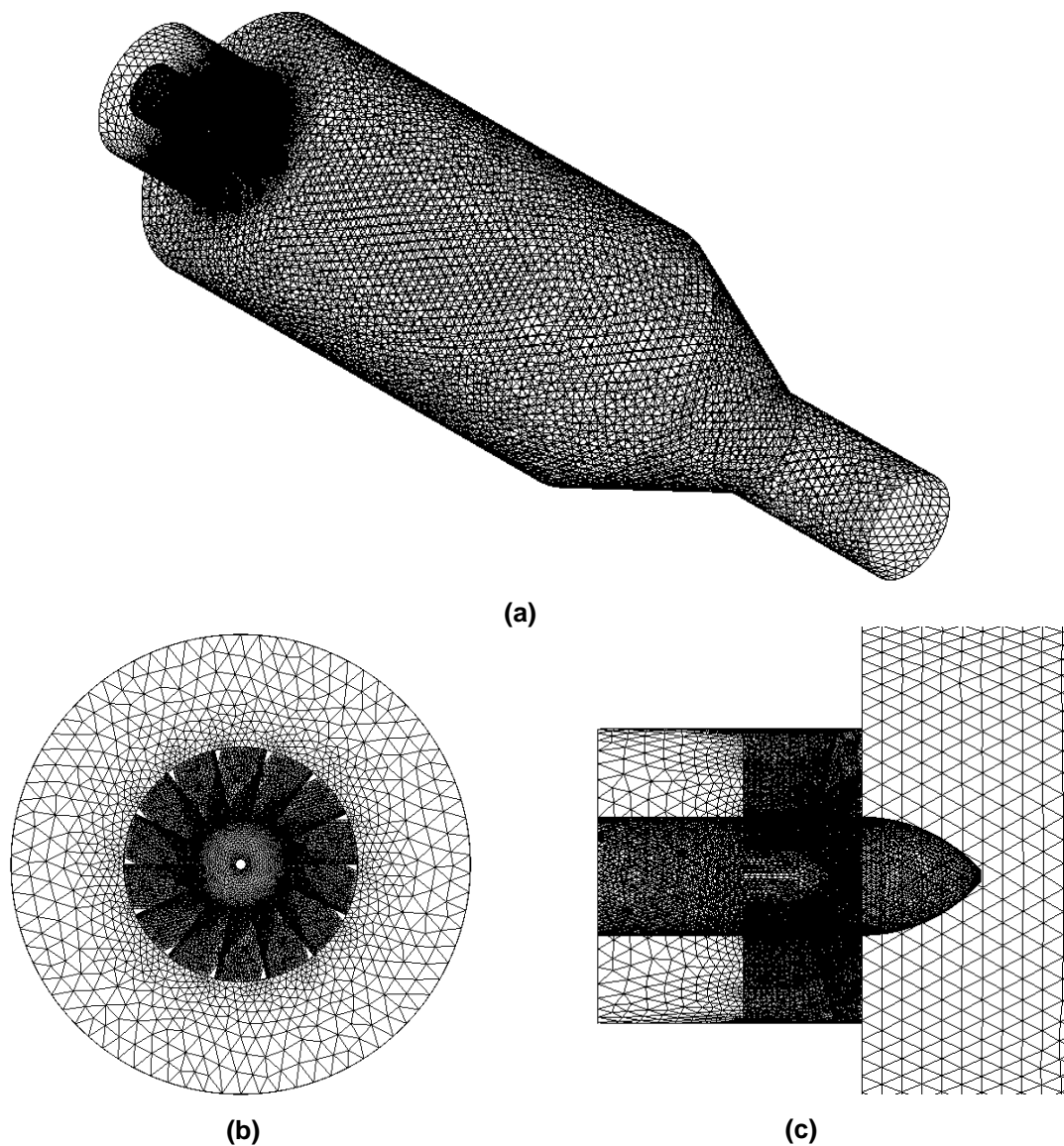


### 3.2.2 Malha Computacional

Para solucionar o sistema de equações a partir da geometria definida, é necessário dividir o domínio em subdomínios menores e não sobrepostos compondo assim uma malha computacional. Esses subdomínios são pequenos volumes de controle chamados de células ou elementos e no interior de cada um deles, é definida a solução do problema. Por isso, quanto menor o tamanho da célula, maior o número de células e maior será a precisão da solução. Todavia, a capacidade computacional e o tempo de processamento necessários também dependerão da quantidade de elementos. Portanto, uma malha refinada, com um número de células elevado (tamanho de elemento pequeno), exigirá maior capacidade computacional gastando mais tempo para simulação do que uma malha grosseira com o número de elementos reduzido (tamanho de célula relativamente grande). (TU; YEOH; LIU, 2008)

Para reduzir o tempo e o gasto computacional utiliza-se malhas otimizadas. As malhas otimizadas são não uniformes, ou seja, o tamanho de elemento varia de acordo com as necessidades de cada caso. Logo, para regiões com dimensões menores ou regiões cuja física é mais complexa, adota-se elementos com tamanho menor que se forem apenas nessas regiões, a malha exigirá menos do processador que uma malha refinada em todo domínio, porém sem perder a precisão. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2005)

Figura 21 – Imagem da malha total (a) e detalhe da região refinada (b) e (c)



Portanto, no presente trabalho, foram refinadas a face de entrada de combustível e a região das pás. A Figura 21a mostra a imagem da malha e as Figuras 21b e 21c mostra o detalhe da malha nas regiões de refino.

Para que não haja um uso desnecessário da capacidade computacional, é necessária uma malha otimizada. Por isso é feito um estudo de convergência de malha, que para este caso, foi realizado apenas no caso mais crítico, na geometria com ângulo de pá mais agudo, *Swirler 2*.

A metodologia utilizada para avaliação das malhas é descrita por Celik et al. (2008) e é sugerida por periódicos técnicos como o *Journal of Fluids Engineering*. De acordo com os autores, para se obter uma avaliação aceitável da malha, é necessário utilizar três malhas diferentes com uma diferença mínima entre os tamanhos médios de elemento das mesmas. Além disso, é necessário correlacionar as informações de malha e geometria com algum resultado de simulação. Para este caso, foi escolhida a perda de pressão, por se tratar de uma propriedade geral do domínio e não apenas uma verificação pontual.

O programa utilizado para gerar as malhas foi o Ansys Meshing. A Tabela 2 mostra os valores referente as malhas utilizadas no estudo de convergência, onde a razão entre malhas é a razão entre os tamanhos médios de elemento das malhas, no qual é recomendado ser maior que 1,3 para garantir uma boa diferença entre elas. O número de nós variou entre 242 mil e 439 mil.

Tabela 2 – Detalhes das malhas elaboradas para o estudo de convergência.

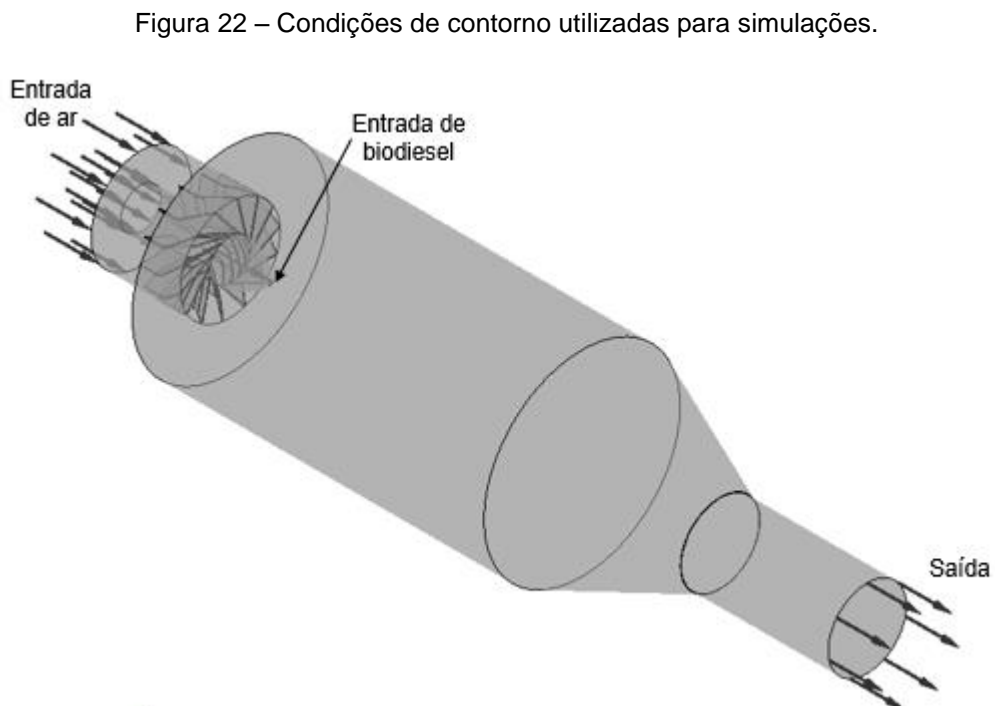
Malha	Volume (m <sup>3</sup> )	Nº de nós	Tamanho Médio (m)	Razão entre malhas
1	1,49E-02	439.327	1,13E-08	
2	1,49E-02	323.495	1,54E-08	1,36
3	1,49E-02	242.174	2,05E-08	1,34

### 3.2.3 Condições de contorno

Para a simulação vigente, não foram consideradas variações de temperatura sendo definida a condição de modelo isotérmico. O regime do escoamento foi permanente.

Como o combustível foi definido como fluido disperso, é requerido um tamanho de gota. Na literatura, foram encontrados trabalhos que citavam o tamanho de gota do biodiesel, sendo que os valores encontrados estavam entre 20 e 50 micrômetros. Bolszo; McDonell (2009) ao investigarem a atomização do biodiesel, conseguiram tamanhos de gota entre 24 e 32 micrômetros. Reddy et al. (2014), ao compararem a combustão entre misturas de biodiesel, encontraram o tamanho de gota entre 36 e 39  $\mu\text{m}$ . Silva (2016) ao estudar um queimador sem chama visível operando com biodiesel, utilizou tamanho de gota 35  $\mu\text{m}$ . Assim, o presente trabalho utilizará o valor de 35 micrômetros por considerar representativo diante da literatura pesquisada.

Na Figura 22 são mostradas as condições de contorno de entradas, de combustível e ar, e saída. As superfícies das pás e toda as superfícies externas foram consideradas como parede sem deslizamento.



O parâmetro utilizado nas duas entradas foi velocidade e os valores definidas foram retirados da pesquisa bibliográfica. Para o valor de velocidade de entrada de injeção das gotas de biodiesel foi utilizado o mesmo valor que Silva (2016) usou em seu modelo experimental, de  $23 \text{ m.s}^{-1}$ . Reddy et al (2014) também variaram a velocidade de entrada entre  $20$  e  $27 \text{ m.s}^{-1}$ , valores próximos ao de Silva (2016). A partir deste e considerando que a quantidade de ar em relação à de combustível deve obedecer a razão estequiométrica de 1,52, valor apresentado por Venturi et al. (s.d.), foi calculada a velocidade do ar. Os valores utilizados para as condições de contorno estão explicitados na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de contorno utilizadas.

<b>Superfície de contorno</b>	<b>Condição especificada</b>
Entrada de ar	$65 \text{ m.s}^{-1}$
Entrada de biodiesel	$23 \text{ m.s}^{-1}$
Saída	Pressão estática manométrica de $0 \text{ Pa}$ .

Em relação à caracterização do biodiesel, Zuniga et al. (2011) fizeram uma revisão da literatura das propriedades físico-químicas do biodiesel. Com base nas propriedades mostradas por eles, foram utilizados para a caracterização do biodiesel na simulação, os valores  $870 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $3,48 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ , referentes à massa específica e à viscosidade dinâmica, respectivamente (Tabela 4). Foi escolhido este valor de massa específica, pois de acordo com Zuniga et al. (2011), a Agência Nacional de Petróleo determina que o valor de massa específica do biodiesel está entre  $850$  e  $900 \text{ kg.m}^{-3}$ . O valor de viscosidade corresponde à viscosidade do biodiesel de soja, que é o mais utilizado no Brasil. A viscosidade do ar foi de  $1,185 \text{ kg/m}^3$ .

Tabela 4 – Propriedades do biodiesel baseadas na literatura..

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>	<b>Referência</b>
Massa específica	$870 \text{ kg.m}^{-3}$	Zuniga et al. (2011)
Viscosidade	$3,48 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$	Zuniga et al. (2011)
Razão ar-combustível	1,52	Venturi et al. (s.d.)

### 3.2.4 Processamento

A etapa de processamento do método numérico é onde ocorre a solução das equações. As equações governantes são integradas nos volumes de controle a fim de se obter as equações discretizadas. Essas equações são postas em um sistema que para resolvê-lo, é necessário utilizar um método específico. Neste caso, foi utilizado o método iterativo de fatoração LU incompleta.

As simulações foram realizadas no supercomputador Yemoja, cedido pelo SENAI CIMATEC. Cada simulação utilizou em média 20 núcleos e o tempo médio de processamento foi em torno de 3h.

### 3.2.5 Avaliação dos resultados

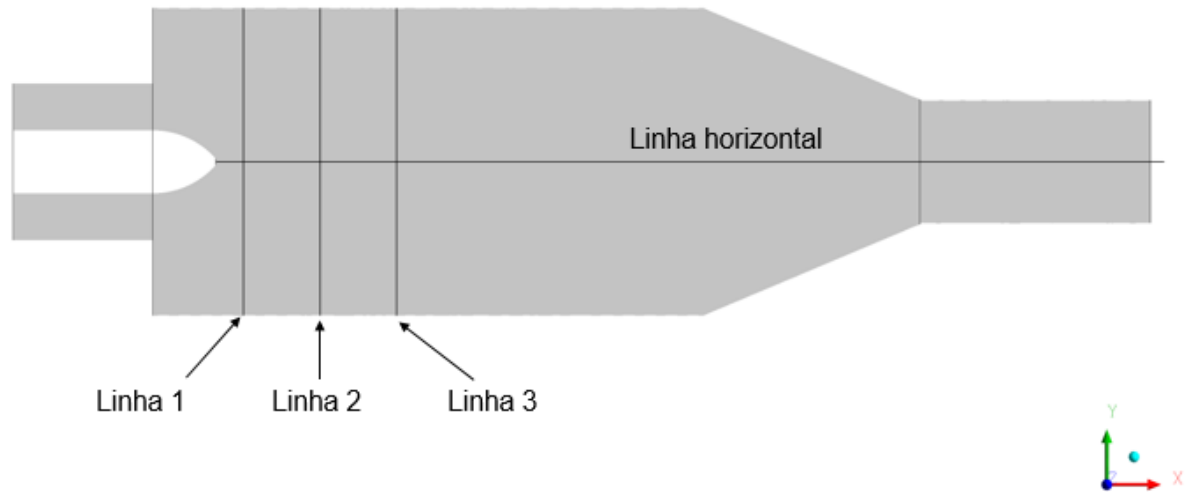
No pós-processamento, são avaliados e observados os resultados da solução. É possível visualizar diversos parâmetros acerca do escoamento como perfis de velocidade, pressão e outras variáveis, linhas de corrente, realizar alguns cálculos e elaborar os gráficos. Os resultados para as simulações aqui apresentadas serão abordados com detalhe no capítulo 4.

A análise da simulação será feita separadamente para cada geometria. A avaliação qualitativa se dará através do estudo das linhas de corrente e perfis de fração volumétrica. Em termos quantitativos serão elaborados gráficos da variação da fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X e eixo Y. Os gráficos serão baseados em quatro linhas no plano central do domínio, três verticais e uma horizontal como mostra a Figura 23. Esses valores nos darão uma noção do tamanho da pluma de biodiesel dentro da câmara.

Além disso, os resultados do estudo de convergência de malha abordado no item 3.2.2, serão mostrados no capítulo de resultados sendo baseados na diferença de pressão.



Figura 23 – Linhas para apresentação gráfica dos resultados.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

O estudo de convergência de malha tem como objetivo avaliar se o resultado independe da malha, ou seja, a malha precisa ter o mínimo de refinamento para que não influencie o resultado. Essa avaliação é feita a partir de uma propriedade física. A geometria utilizada para o estudo foi o *Swirler 2*, porque tem o maior ângulo de pá sendo o caso mais crítico.

A análise é feita através do desvio de propriedades físicas de uma malha em relação a outra. Foi escolhida a perda de pressão, por se tratar de uma propriedade que reflete em todo domínio. A Tabela 5 mostra os resultados do estudo que incluem a perda de pressão e o desvio entre as perdas. Observa-se que os desvios foram pequenos, em torno de 1%, atestando a utilização da malha 2. Portanto, a malha 2 foi a malha escolhida para avaliação dos resultados da geometria do *Swirler 2* e para simulação das outras geometrias.

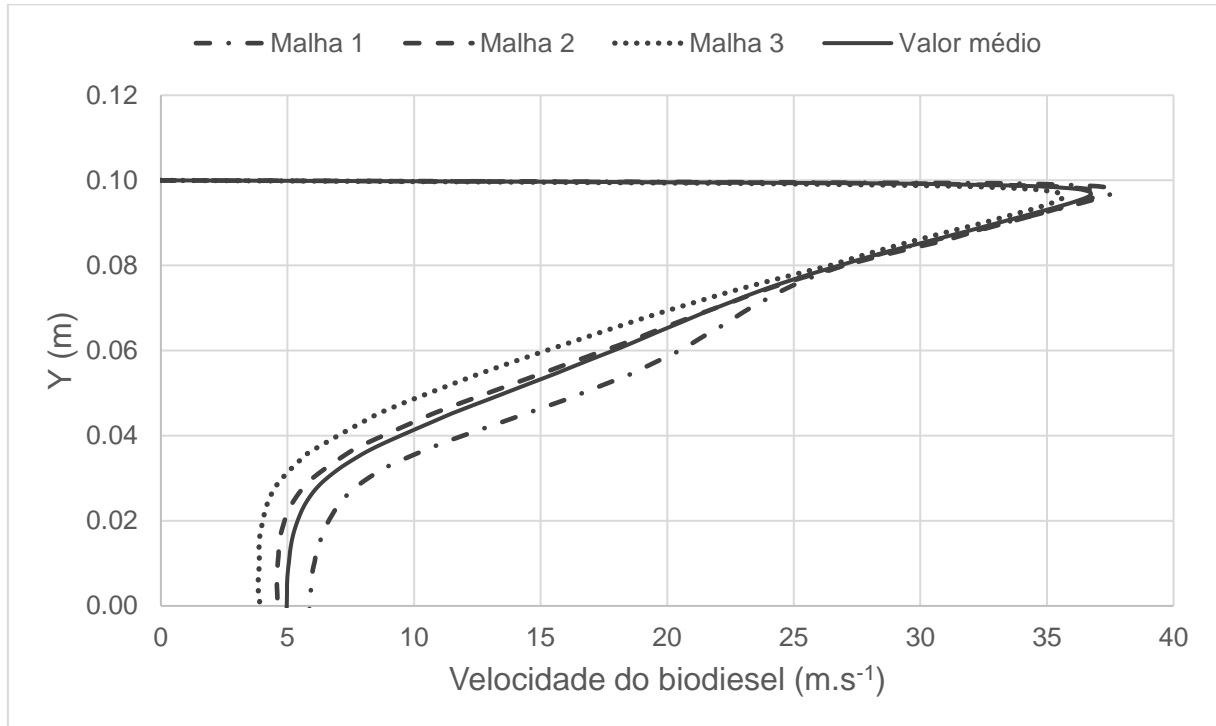
Tabela 5 – Resultados do estudo de convergência de malha.

Malha	Volume do Domínio(m <sup>3</sup> )	N° de nós	Tamanho Médio (m)	Perda de pressão (Pa)	Desvio relativo
1	1,49E-02	439.327	1,13E-08	1,218E+04	
2	1,49E-02	323.495	1,54E-08	1,210E+04	0,7%
3	1,49E-02	242.174	2,05E-08	1,196E+04	1,2%

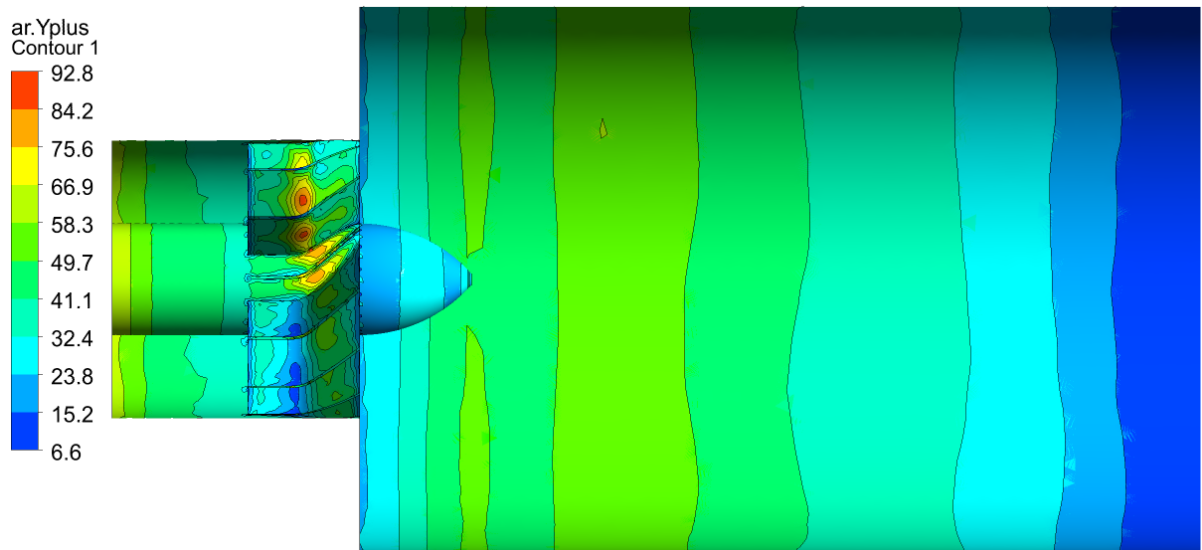
Outro resultado que pode ser considerado para balizar a utilização da malha 2 é a comparação do perfil de velocidade entre as malhas apresentado na Figura 24. Os dados coletados são referentes à linha 3, por ser mais representativa na diferença de fração volumétrica do biodiesel pois está mais afastada da entrada de biodiesel, e mostra a diferença que a mudança da malha pode proporcionar ao resultado, apesar dessa diferença ser pequena. A curva com a linha preenchida apresenta o valor médio

dessa diferença, que está mais próximo da curva referente ao valor de velocidade da malha 2.

Figura 24 – Gráfico comparativo do perfil de velocidade entre as malhas.



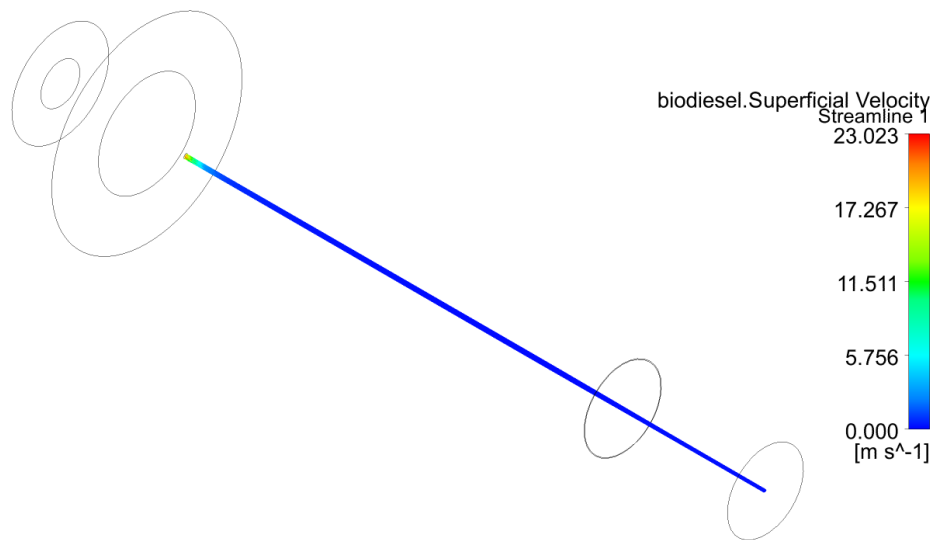
Um parâmetro comum em CFD que ajuda na verificação da malha é o  $y^+$  que é a distância adimensional do primeiro nó à parede. A média do  $y^+$  nas paredes da região de interesse da câmara de combustão foi em torno de 38, este valor é condizente com os valores de  $y^+$  abrangidos pelo modelo  $k-\epsilon$  (CFX, 2009; WILCOX, 1993). A Figura 25 apresenta a distribuição do  $y^+$  nas paredes do queimador e câmara de combustão.

Figura 25 - Distribuição do  $y^+$  nas paredes do domínio.

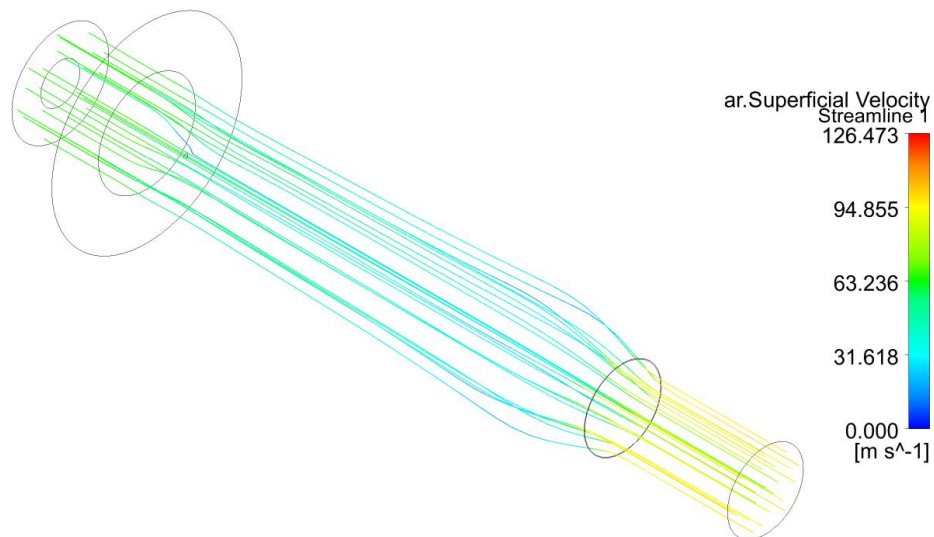
## 4.2 GEOMETRIA SEM SWIRLER (SEM PÁS)

A fim de evidenciar a trajetória do escoamento e avaliar a formação do *swirl*, as Figuras 26a e 26b, mostram as linhas de corrente do ar e do combustível, respectivamente. A geometria sem *swirler*, por não apresentar as pás direcionadoras, proporciona um escoamento reto sem. As linhas de corrente para o biodiesel estão agrupadas na região central da geometria formando uma linha e as linhas para o ar são retas e o escoamento é uniforme sem regiões de perturbação.

Figura 26 – Linhas de corrente do combustível (a) e do ar (b)



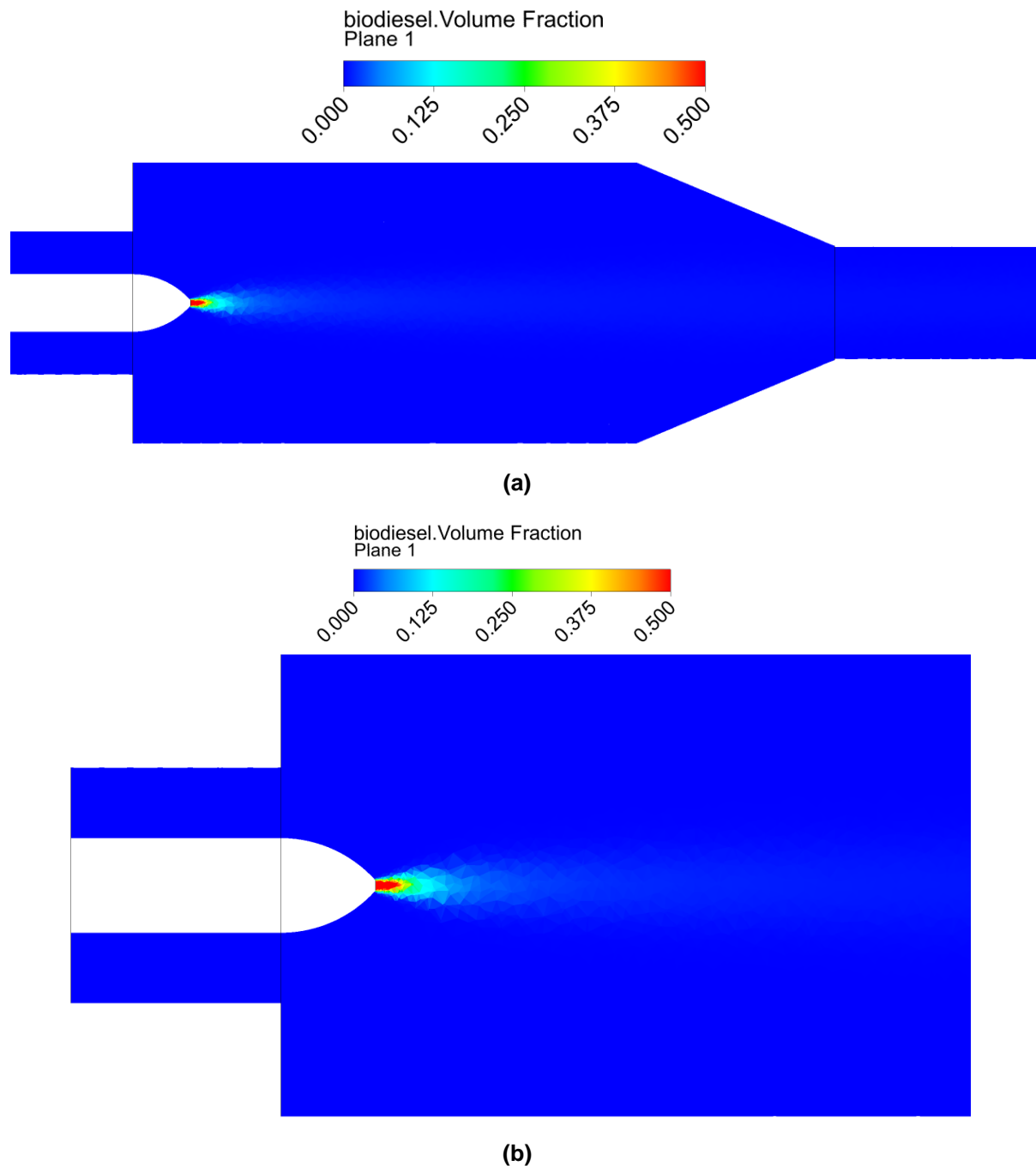
(a)



(b)

Em relação à fração volumétrica do biodiesel, a Figura 27 mostra sua distribuição ao longo da câmara. Nota-se que o combustível fica concentrado muito próximo da região de entrada (Figura 27b). A transição da região de alta concentração de biodiesel para a região onde ele está ausente ocorre de forma brusca e prematura devido à aglomeração de biodiesel no início da câmara e falta de rotação do escoamento.

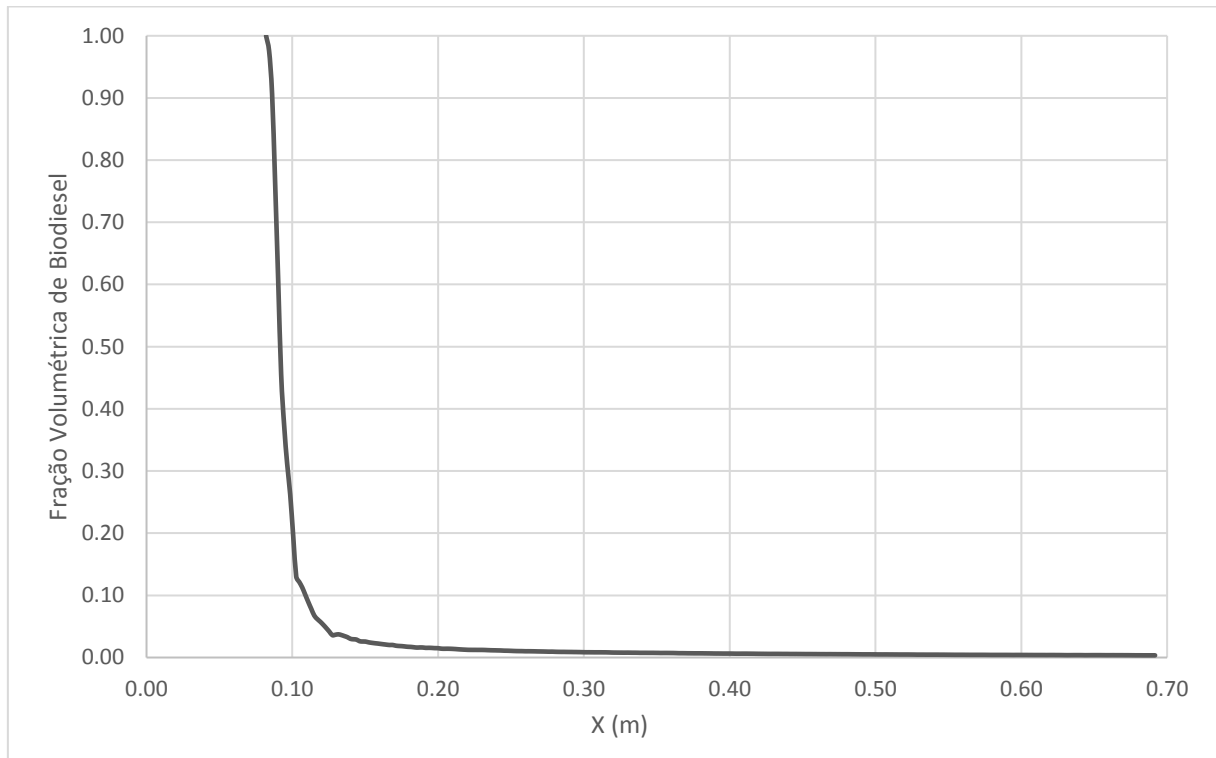
Figura 27 – Contorno de fração volumétrica de biodiesel ao longo da câmara.



As Figuras 28 e 29 apresentam os valores de fração volumétrica nas linhas mostradas na seção 3.2.5. Na Figura 28, a posição no eixo X um pouco antes de 0,1m, na qual a fração volumétrica de biodiesel é máxima, corresponde à entrada de biodiesel na câmara. Conforme este se afasta da entrada, a fração volumétrica do biodiesel diminui bruscamente até atingir 0,1m e a fração volumétrica diminuir de uma forma mais suave. Um ponto a se observar é a coordenada em X que o valor de fração

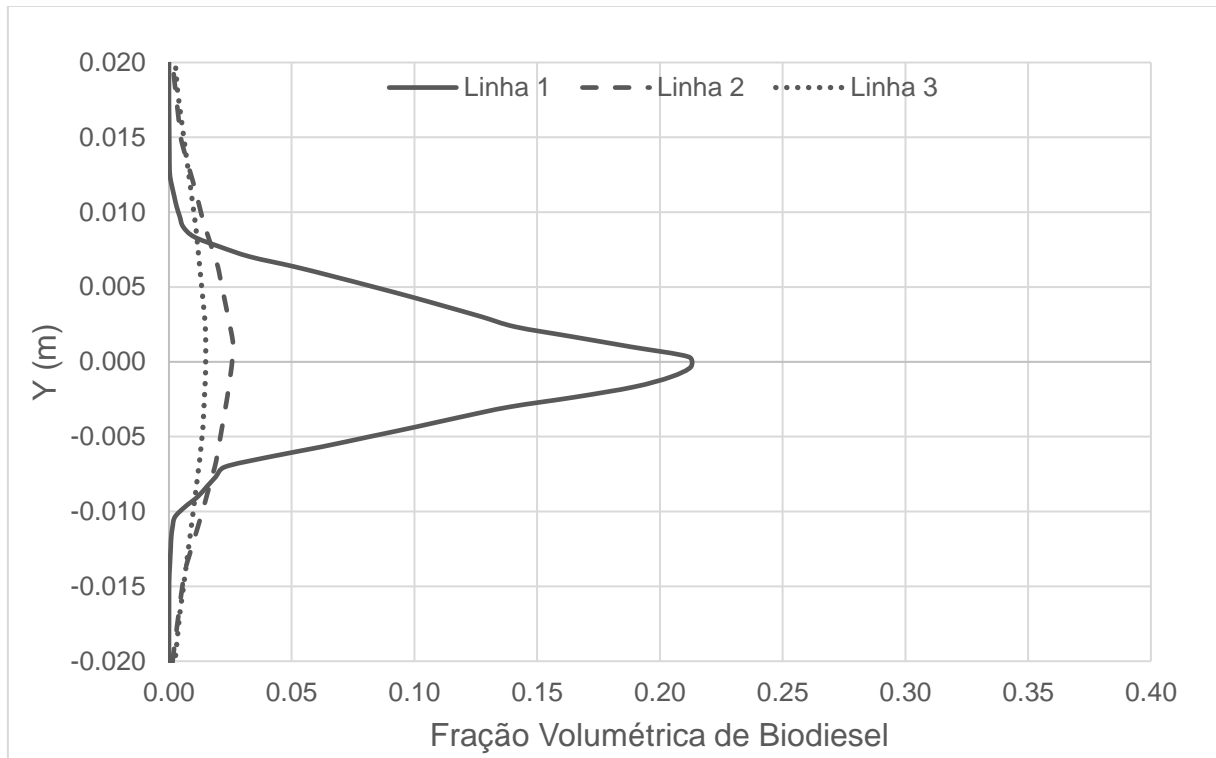
volumétrica do gráfico da figura 28 fica igual a zero comprovando que o comprimento da pluma, em relação ao eixo X, é pequeno havendo baixa propagação do combustível ao longo da câmara.

Figura 28 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal na geometria sem *swirler*.



No gráfico da fração volumétrica variando com o eixo Y (Figura 29), nota-se na linha 1, que é a mais próxima da injeção de combustível, uma concentração maior de combustível que nas outras linhas cujos valores são baixos, devido ao distanciamento das linhas 2 e 3 da região de entrada e à dificuldade de escoamento deste fluido. Pelo fato do escoamento desta geometria ser uniforme, nota-se uma simetria dos gráficos em relação ao ponto central que corresponde à posição 0 em Y.

Figura 29 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo das linhas 1, 2 e 3 na geometria sem *swirler*.

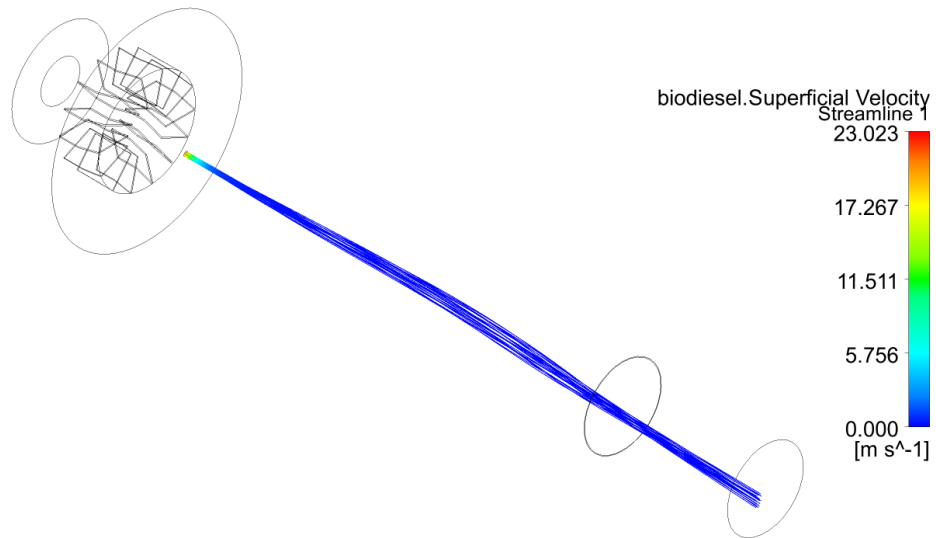


### 4.3 GEOMETRIA SWIRLER 1

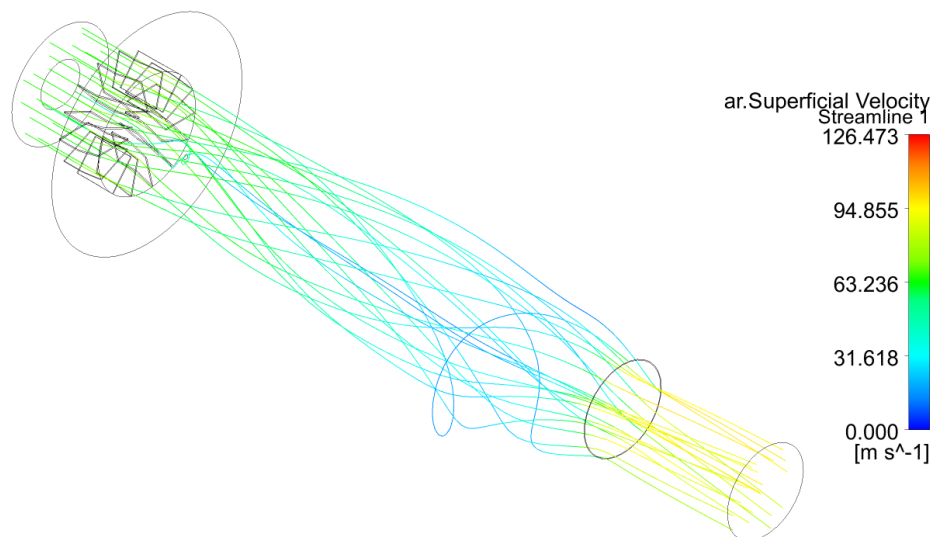
Por conta do ângulo da pá ser muito pequeno nesta geometria, o escoamento é quase reto apresentando quase nenhuma rotação, como se observa nas Figuras 30a e 30b referente às linhas de corrente do ar e do combustível, respectivamente, reduzindo com isso a condição de melhor mistura entre combustível e comburente na câmara, já que há pouca formação de recirculações e vorticidade. Observa-se que o escoamento do ar (Figura 30b) apresenta alguns pontos de desequilíbrio e instabilidade. As linhas de corrente do biodiesel não são tão unidas como na Figura 26a, deixando de estarem totalmente agrupadas no centro, havendo uma certa distinção entre elas. Em síntese, a avaliação da formação do *swirl* através do direcionamento das linhas de corrente para o ar e biodiesel mostra um indício de formação da espiral, porém o ângulo da pá não é agudo suficiente.



Figura 30 – Linhas de corrente do combustível (a) e do ar (b)



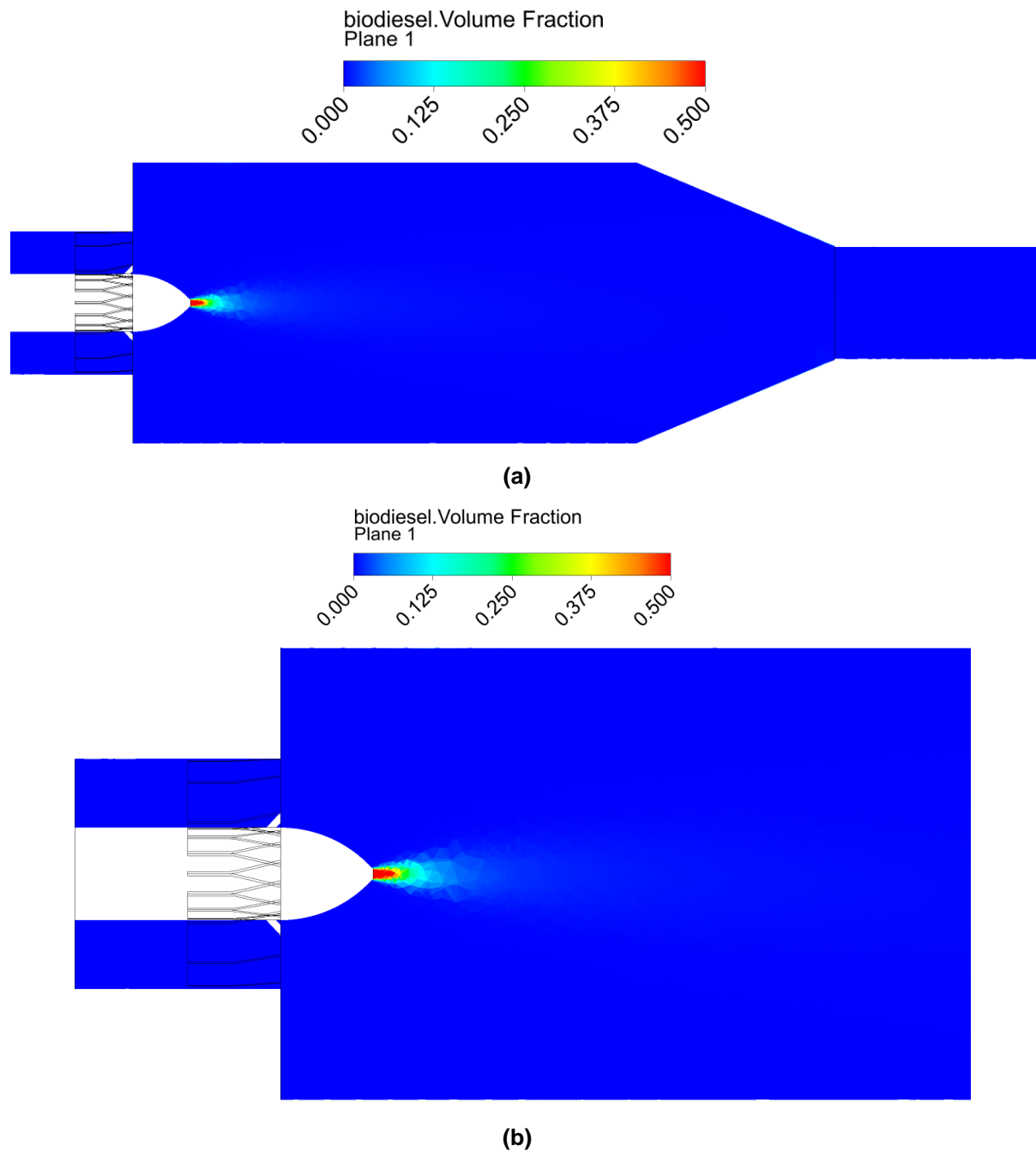
(a)



(b)

A Figura 31 mostra o plano central do domínio, colorido através da fração volumétrica do biodiesel. O range da escala está entre de 0% a 50% ou mais de fração volumétrica de biodiesel. Nota-se que o combustível fica concentrado muito próximo da região do bico do queimador (Figura 31b). Semelhante ao que ocorre à geometria Sem *Swirler*, a transição da região de alta concentração de biodiesel para a região onde ele está ausente, ocorre de forma brusca e prematura devido à baixa fluidez.

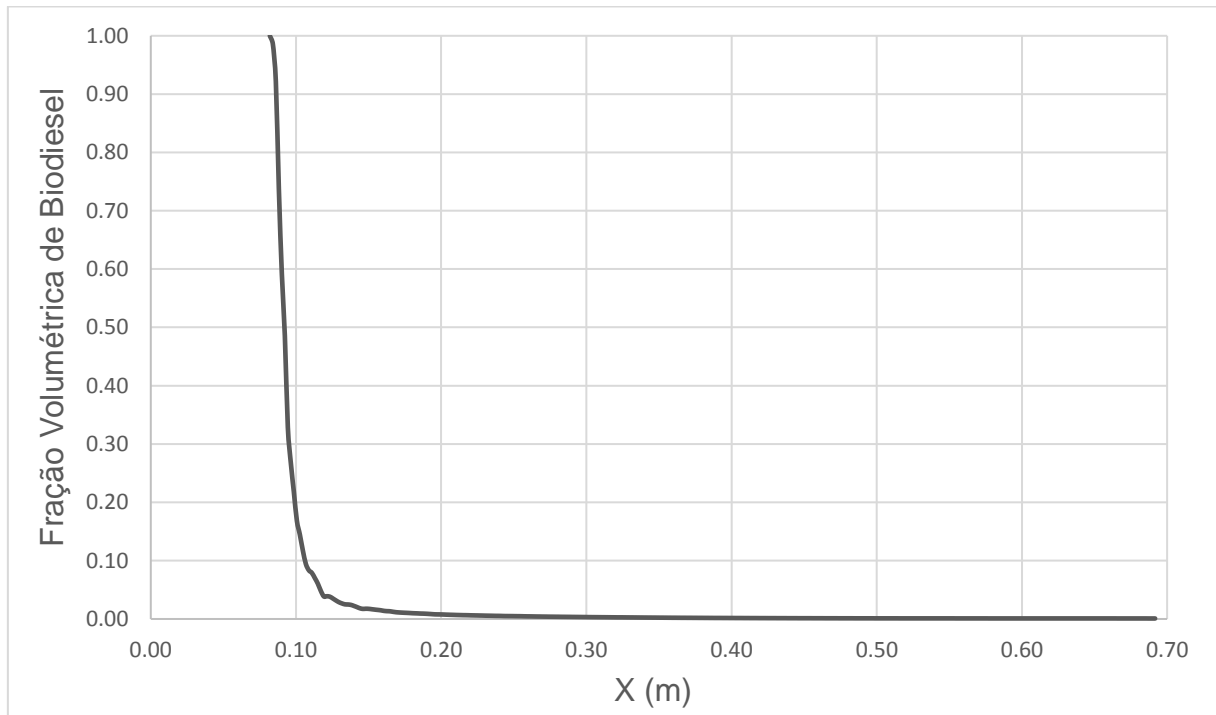
Figura 31 – Contorno de fração volumétrica de biodiesel ao longo da câmara.



Os gráficos presentes na Figuras 32 e 33 apresentam os valores de fração volumétrica nas linhas mostradas na seção 3.2.5. Assim como na geometria anterior, a posição no eixo X um pouco antes de 0,1m, na qual a fração volumétrica de biodiesel é máxima, corresponde à entrada de biodiesel na câmara. Conforme este se afasta da entrada, a fração volumétrica do biodiesel diminui bruscamente até atingir 0,1m e a fração volumétrica diminuir de uma forma mais suave. Um ponto a se observar é a

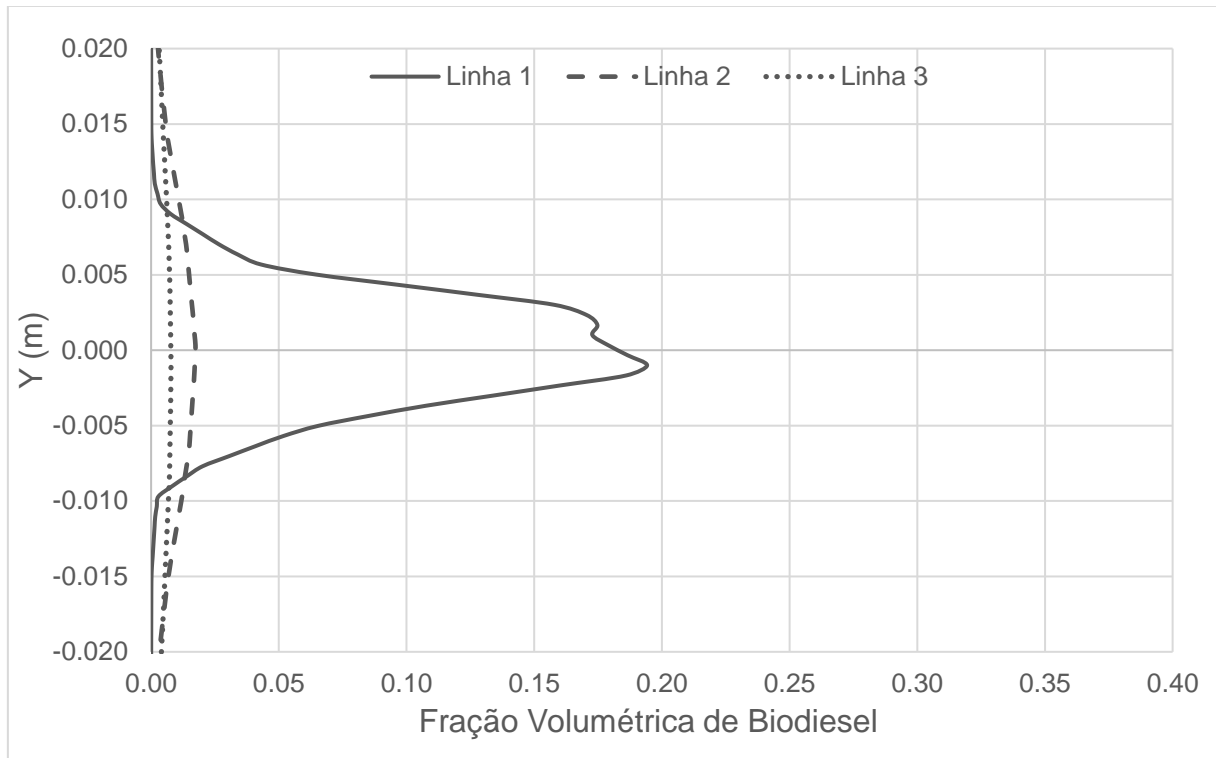
distância que a curva do gráfico da figura 32 começa a se fechar comprovando que o comprimento da pluma, em relação ao eixo X, é pequeno havendo baixa propagação do combustível ao longo da câmara.

Figura 32 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal na geometria *Swirler* 1.



No gráfico da fração volumétrica variando com o eixo Y (Figura 33), nota-se na linha 1, que é a mais próxima da injeção de combustível, uma concentração maior de combustível que nas outras linhas cujos valores são baixos, devido à dificuldade de escoamento deste fluido. Há uma falta de simetria na Linha 1, próximo à posição 0m, sutil para ser percebida visualmente a partir da Figura 31, porém pode ser explicada pelas irregularidades do escoamento (observadas na Figura 30). O escoamento não é linear nem rotacional, com regiões de instabilidade, o que provoca essa falta de simetria.

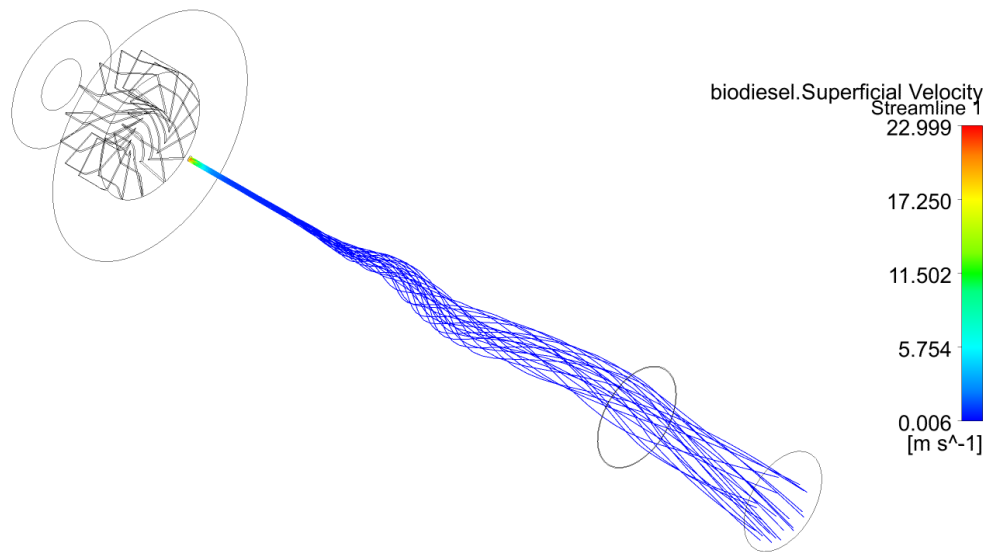
Figura 33 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo das linhas 1, 2 e 3 na geometria *Swirler* 1.



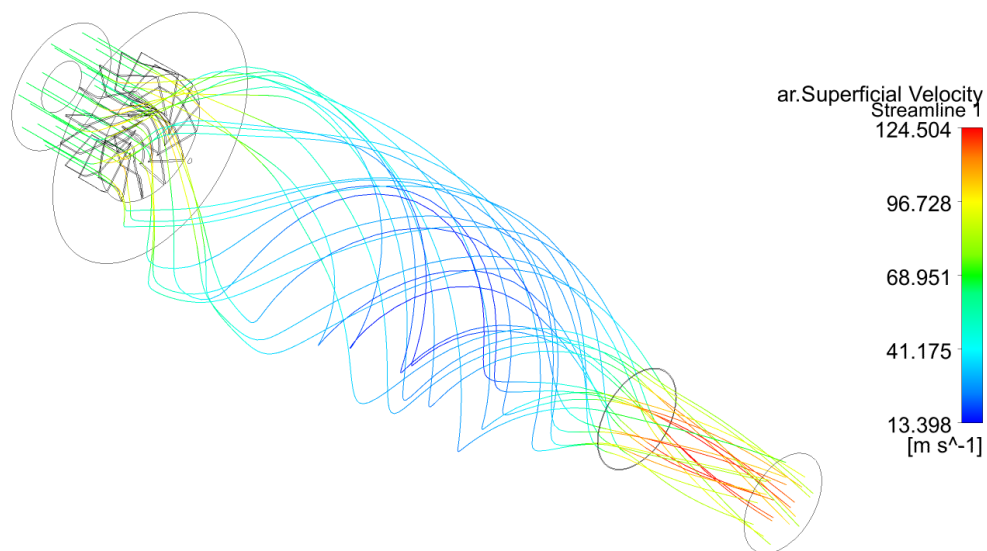
#### 4.4 GEOMETRIA SWIRLER 2

Esta é a geometria que apresenta o ângulo das pás mais acentuado, o que dá um efeito rotacional bem definido como se observa nas Figuras 34a e 34b referente às linhas de corrente do ar e do combustível, respectivamente. Este efeito permite uma maior vorticidade dos escoamentos e recirculação para uma melhor interação entre combustível e comburente para uma possível melhor combustão. As linhas de corrente para o biodiesel inicialmente agrupadas, divergem e começam a rotacionar. As linhas de corrente do ar estão em forma de redemoinho bem definido. As linhas de corrente mostram o formato espiralado do *swirl*, por conta do ângulo acentuado da pá.

Figura 34 – Linhas de corrente do combustível (a) e do ar (b)



(a)

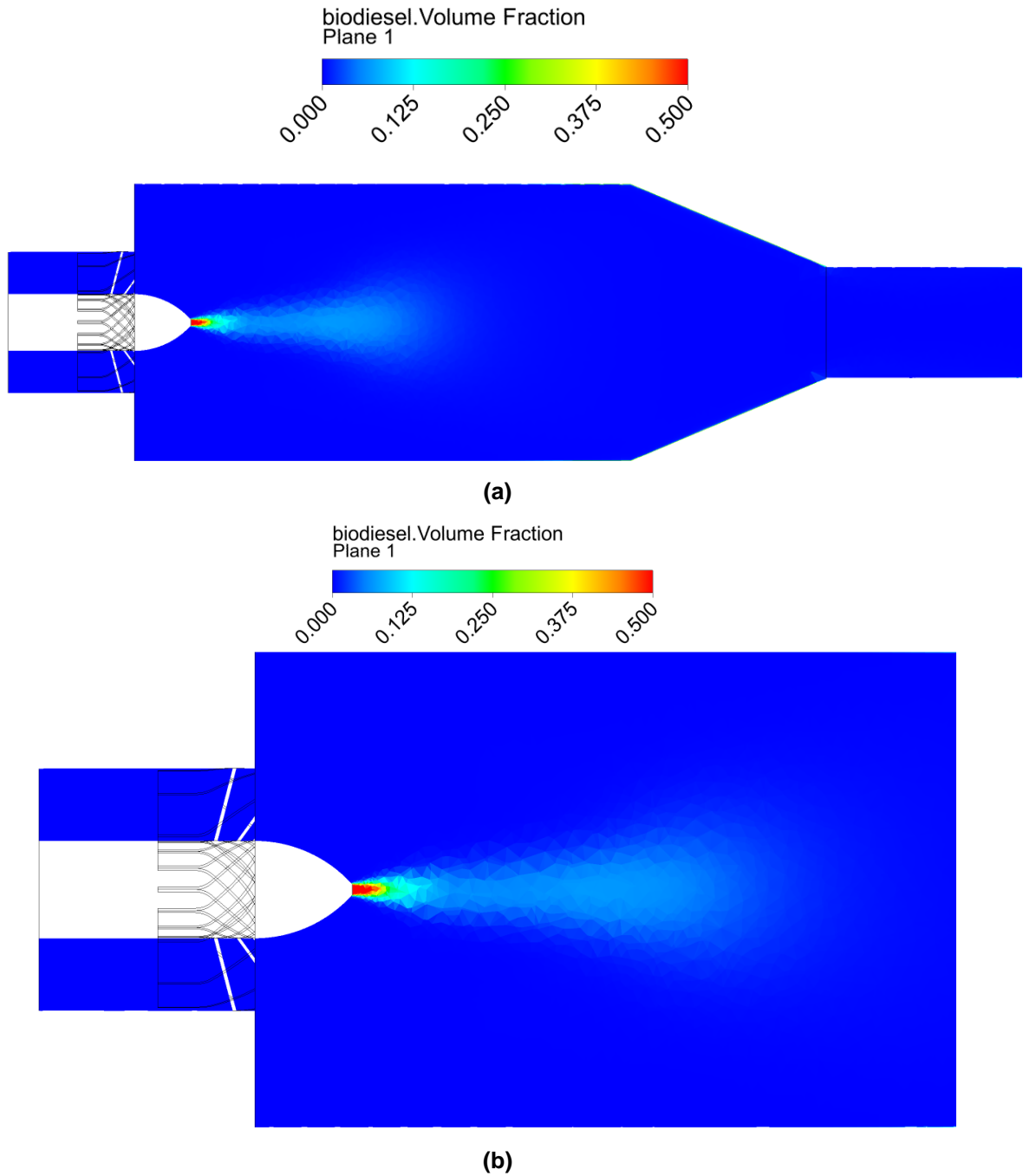


(b)

Em relação à distribuição de fração volumétrica do biodiesel (Figura 35), as análises a seguir mostram a distribuição ao longo da câmara por meio da escala de cores, cujo valor máximo representa 50% ou mais de fração volumétrica do biodiesel. Neste caso o escoamento do combustível não fica tão concentrado na região próxima ao bico do queimador, havendo uma distância considerável e uma melhor fluidez do biodiesel. Diferente do que acontece para os casos anteriores, a transição da região de alta concentração de biodiesel para a região onde ele está ausente, ocorre de forma mais suave. É notório que o biodiesel consegue dispersar melhor formando um

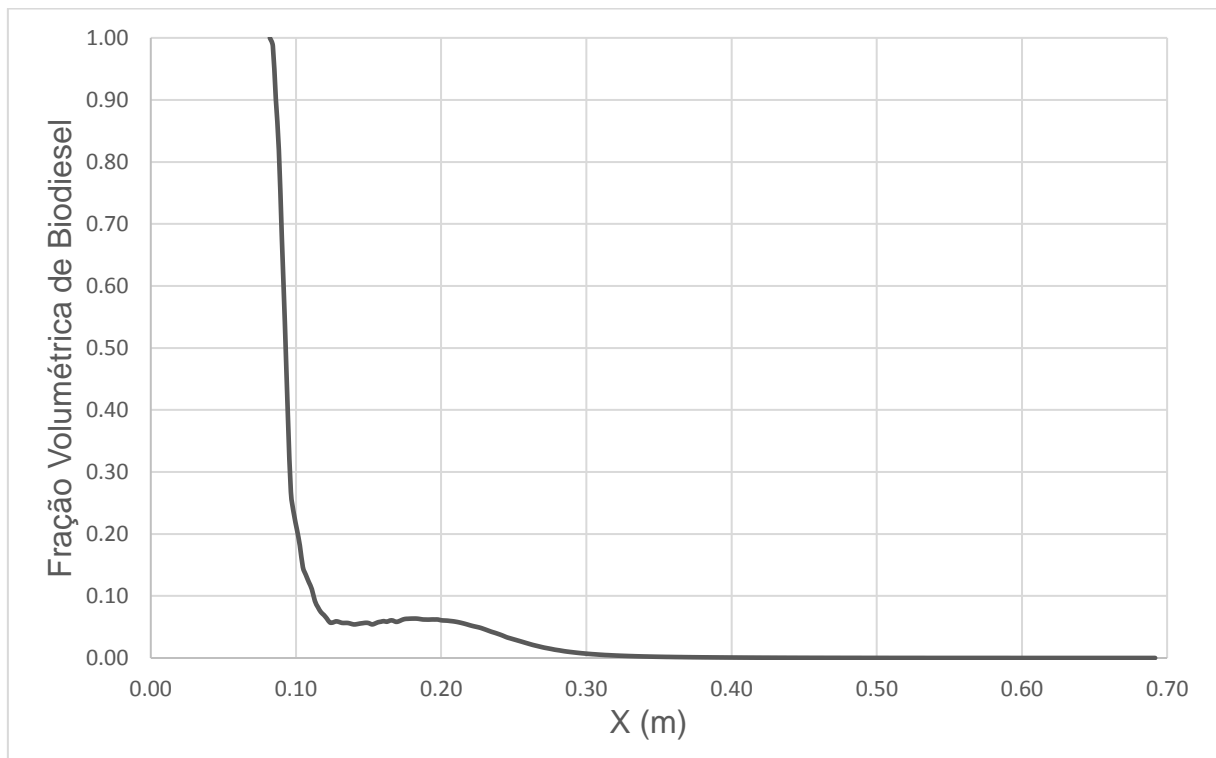
cone mais definido e um ângulo de abertura maior para esta geometria do que para as outras.

Figura 35 – Contorno de fração volumétrica de biodiesel ao longo da câmara.



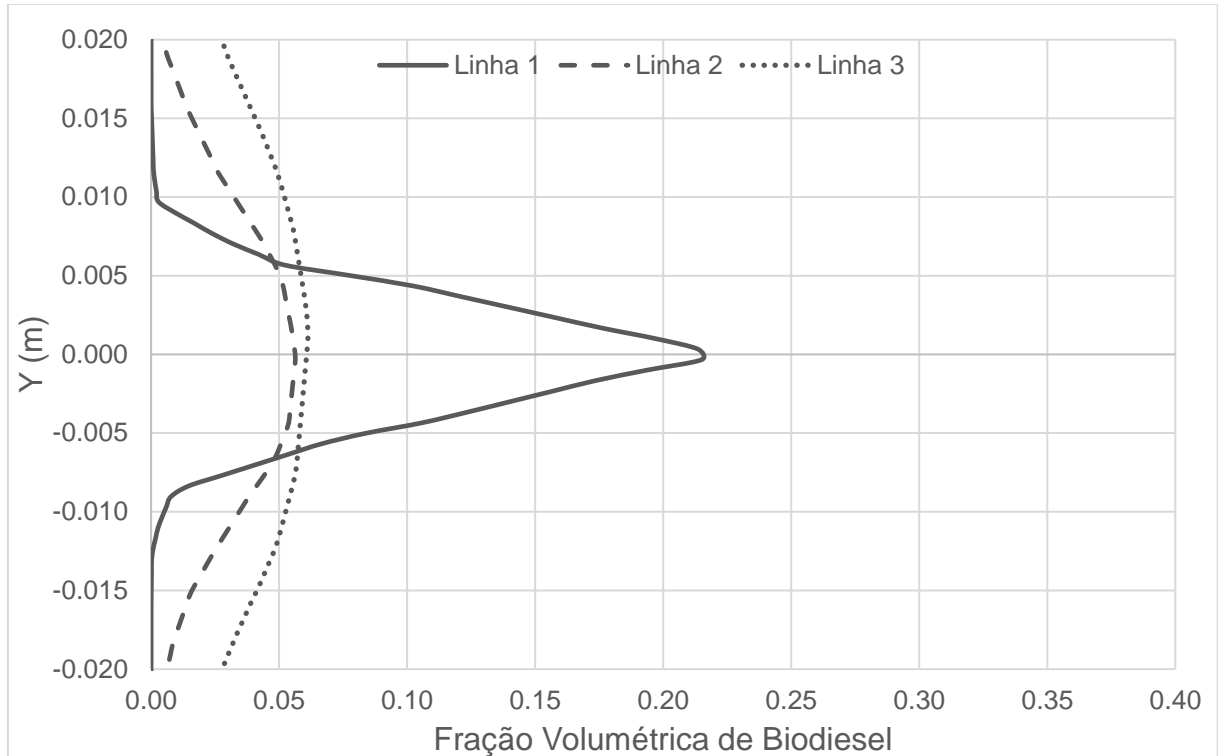
Os gráficos presentes na Figuras 36 e 37 apresentam os valores de fração volumétrica nas linhas mostradas na seção 3.2.5. Na Figura 36, a posição no eixo X um pouco antes de 0,1m, na qual a fração volumétrica de biodiesel é máxima, corresponde à entrada de biodiesel na câmara. Conforme este se afasta da entrada, a fração volumétrica do biodiesel diminui bruscamente até atingir 0,1m e a fração volumétrica diminuir de uma forma mais suave. Nota-se que a curva tem uma estabilização da fração volumétrica antes de igualar a zero, mostrando que há uma dispersão do escoamento. Além disso, há um comprimento de pluma bem definido.

Figura 36 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal na geometria *Swirler 2*.



No gráfico da fração volumétrica variando com o eixo Y (Figura 37), nota-se na linha 1, que é a mais próxima da injeção de combustível, com uma concentração maior de combustível. Já nas linhas 2 e 3, que são mais distantes da entrada de combustível, os valores são mais baixos. Há uma simetria do gráfico em relação à posição 0 em Y que pode ser explicada pelo fato do jato ser completamente rotacional sem instabilidades radiais.

Figura 37 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linhas 1, 2 e 3 na geometria *Swirler 2*.



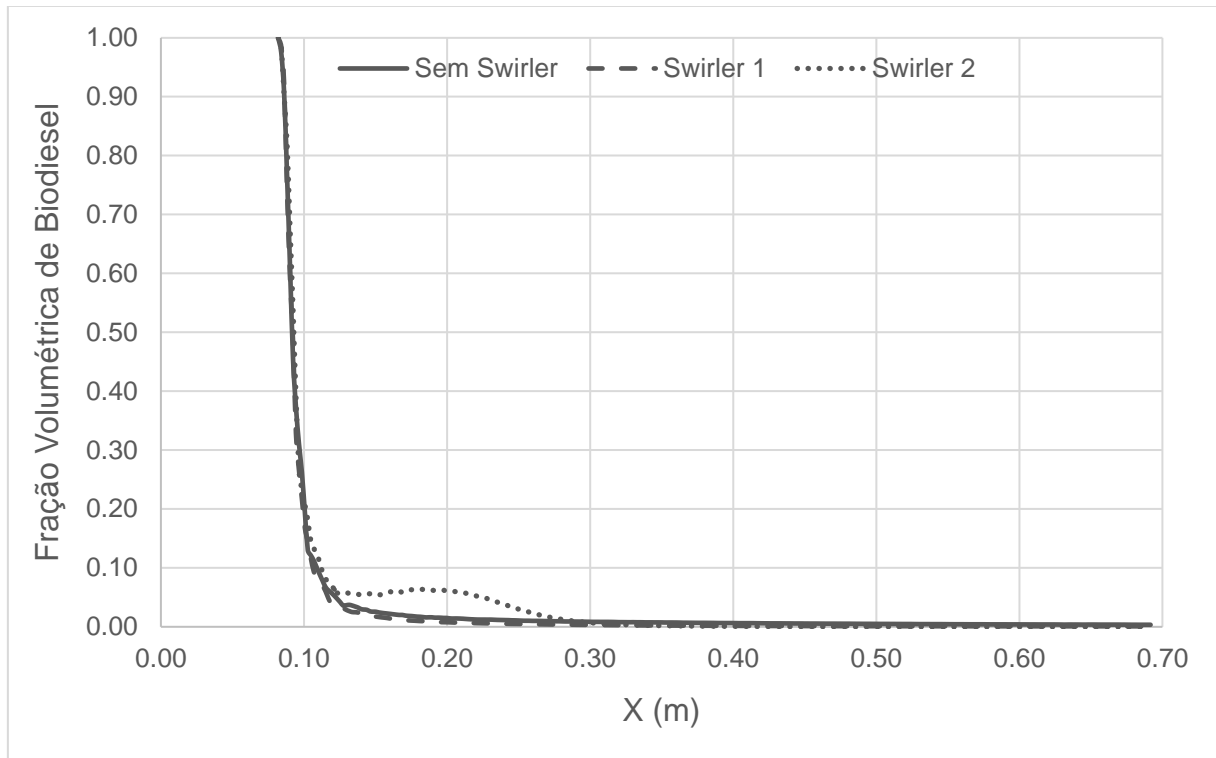
#### 4.6 ANÁLISE COMPARATIVA

A seguir são apresentados os gráficos separadamente para cada linha mostrada na seção 3.2.5, afim de comparar quantitativamente o escoamento de biodiesel nas três geometrias.

Em relação à linha horizontal (Figura 38), observa-se que o comportamento do gráfico para as geometrias Sem *Swirler* e *Swirler 1* é semelhante, sendo que as curvas estão quase unidas. Deve-se atentar para o ponto em que os gráficos tocam o eixo X, ou seja, a posição que a fração volumétrica do biodiesel passa a ser zero. Na geometria *Swirler 2*, a fração volumétrica se iguala a zero numa posição mais avançada do eixo X, o que representa um comprimento da pluma maior que as outras geometrias, mostrando uma melhor dispersão em relação ao eixo X.



Figura 38 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo X, ao longo da linha horizontal para as três geometrias.



Em relação às linhas verticais, observa-se pouca diferença das três geometrias ao longo da linha 1 (Figura 39), exceto pela falta de simetria da curva do *Swirler 1* como mostrado no item 4.3, pois se trata de uma região próxima à saída de combustível com concentração elevada deste. Os gráficos das linhas 2 (Figura 40) e 3 (Figura 41) mostram numericamente que há uma dispersão maior de biodiesel para geometria *Swirler 2*.

Figura 39 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linha 1 para as três geometrias.

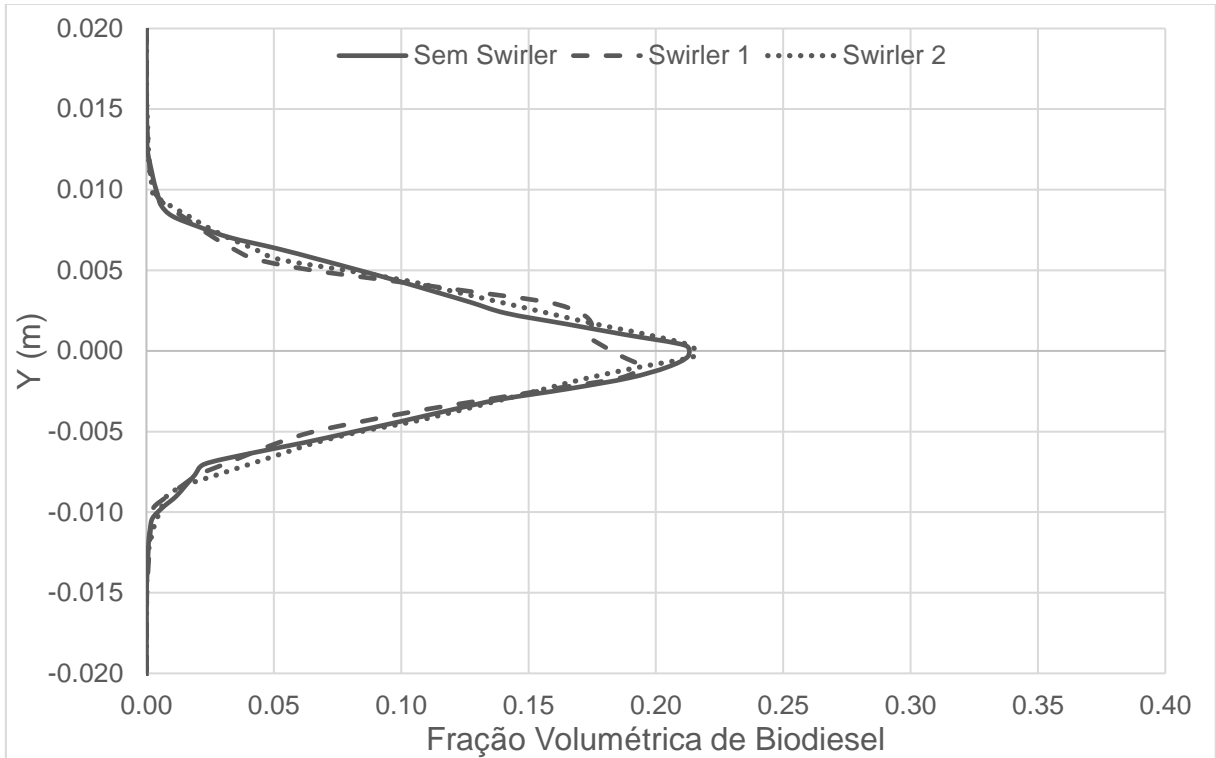


Figura 40 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linha 2 para as três geometrias.

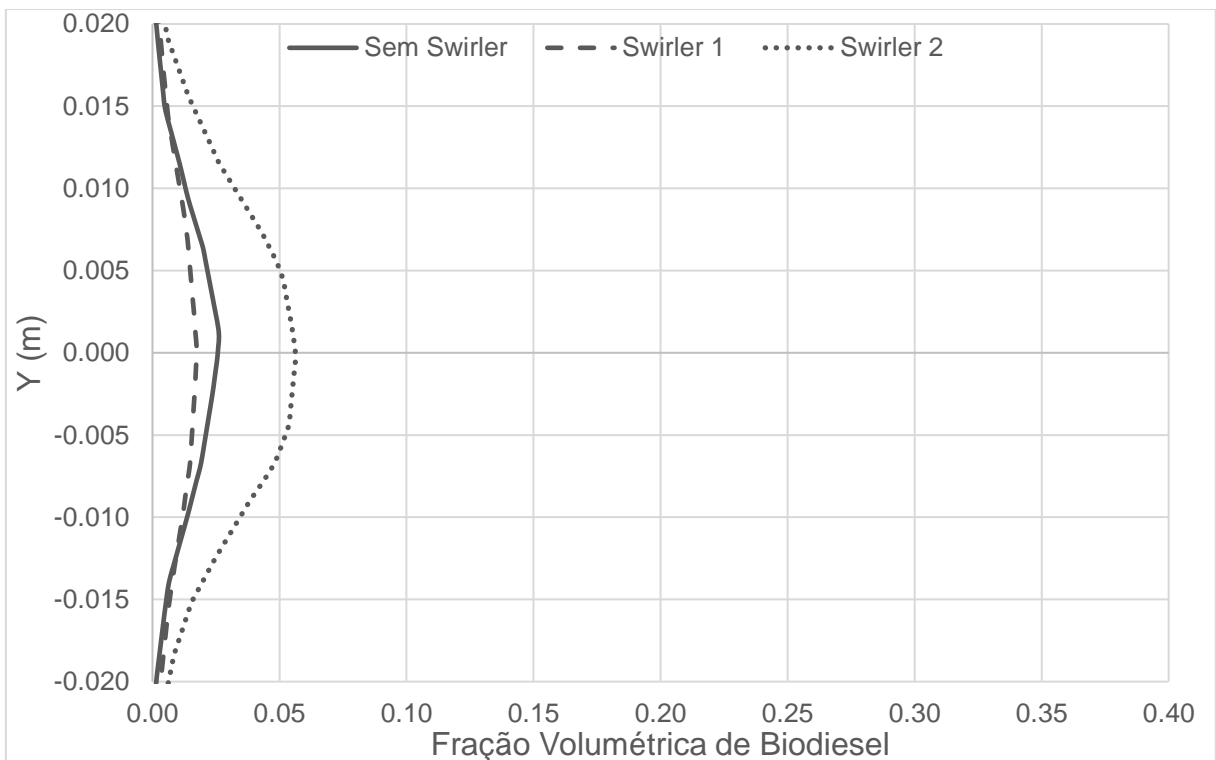
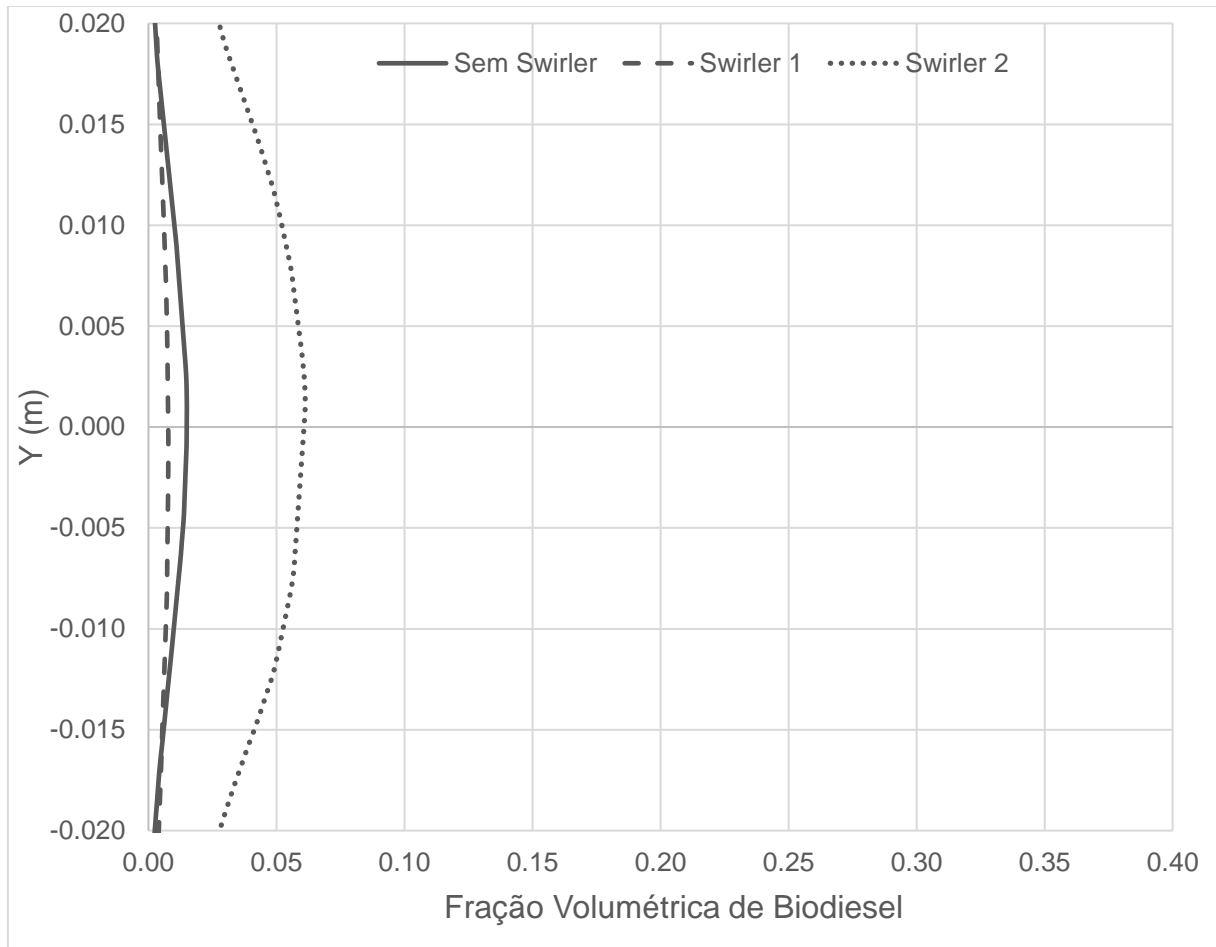


Figura 41 – Fração volumétrica do biodiesel em relação ao eixo Y, ao longo da linha 3 para as três geometrias.



Por fim, são apresentados na Figura 42, perfis bidimensionais de linhas de corrente no plano XY, onde são evidenciados os vórtices dos três casos. Para as três geometrias observa-se zonas externas localizadas próximas a parede da câmara. Nota-se que na Figura 42a, o escoamento formado na geometria sem *Swirler* é simétrico. Já na figura 42b as zonas externas para a geometria do *Swirler 1* não são simétricas em relação ao eixo central da câmara, o que coincide com o comportamento irregular e assimétrico citado anteriormente. Porém somente para o *Swirler 2* são observadas zonas de recirculação centrais (ZCR) semelhantes às apresentadas na Figura 43, referente ao trabalho de Syred e Beér como mostrado no item 2.2. Nota-se que as ZCR do *Swirler 2* (Figura 42c) são parecidas com o exemplo para escoamento rotacional mostrado na Figura 43 caracterizando o *swirl*. De acordo com Syred; Beér, as zonas de recirculação externa não são tão relevantes para a estabilização do escoamento e o tamanho delas vai depender da intensidade do *swirl*.

Figura 42 – Linhas de corrente bidimensionais no plano XY das geometrias: (a) Sem *Swirler*, (b) *Swirler 1* e (c) *Swirler 2*.

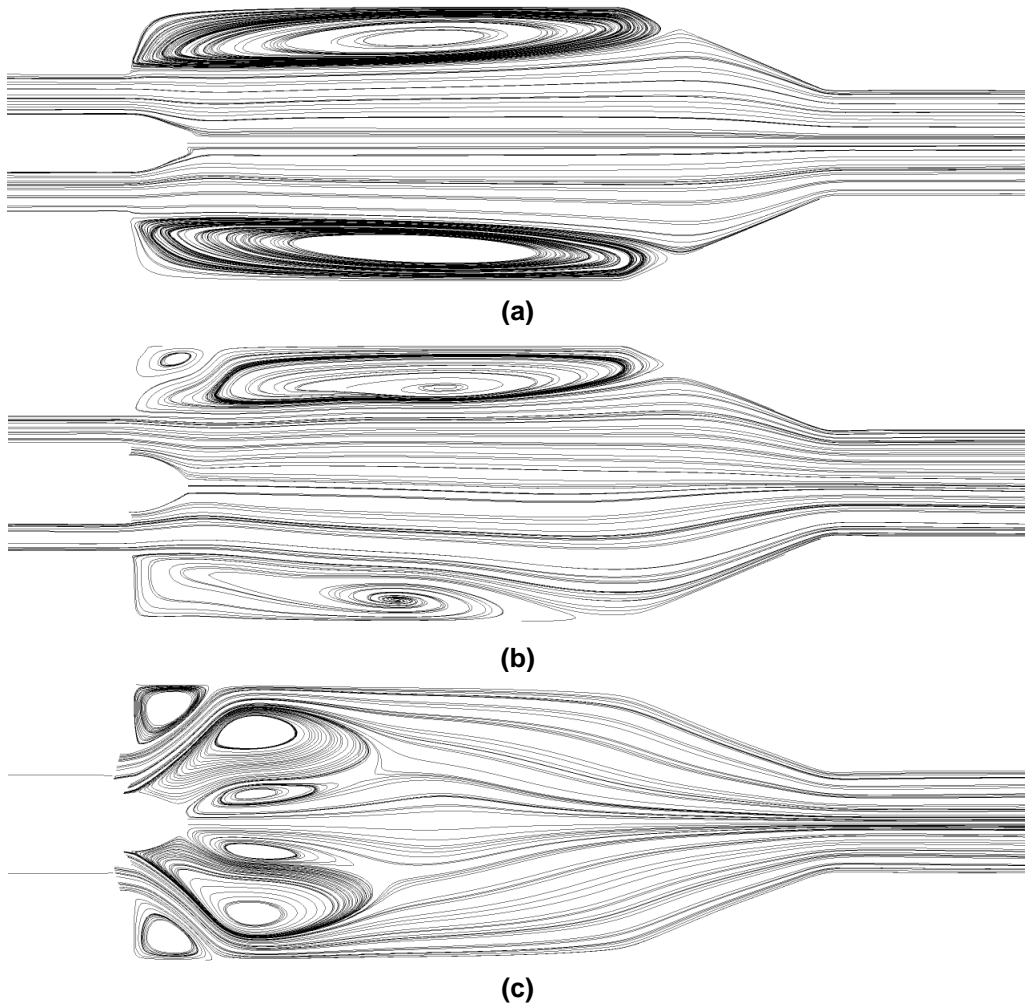
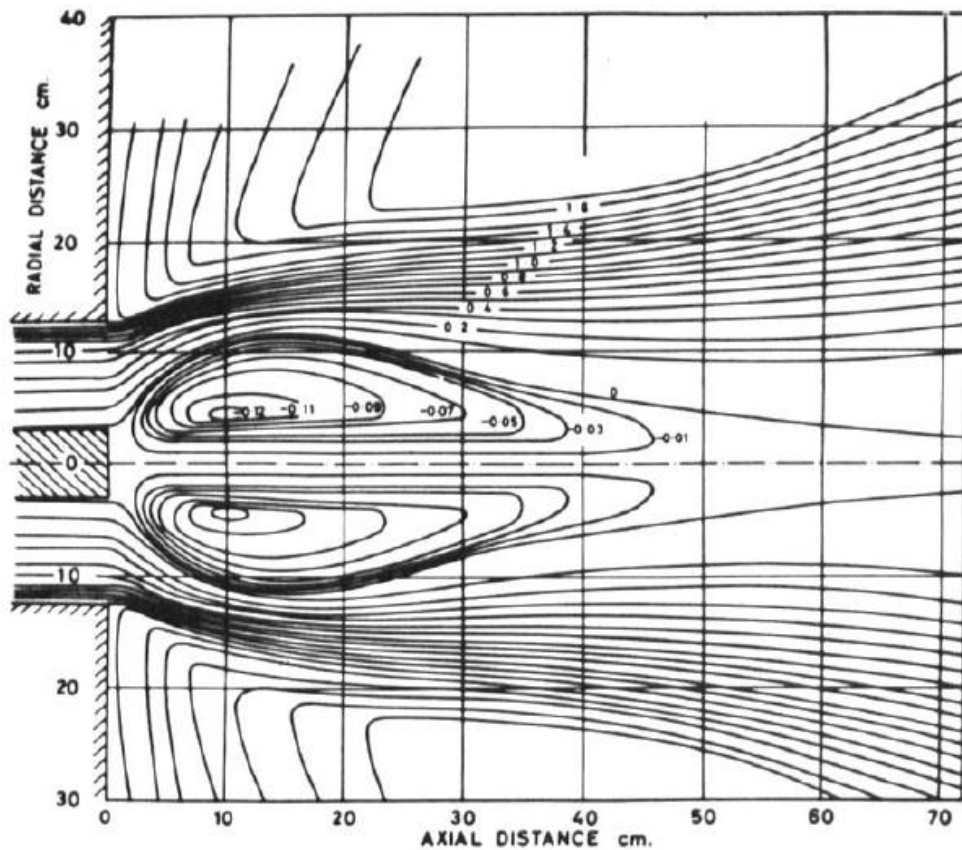


Figura 43 – Zona de recirculação mostradas através de linhas de corrente.



Fonte: Adaptado de Syred; Beér (1974).

#### 4.7 ASPECTOS DE INOVAÇÃO DO BIODIESEL NA CADEIA INDUSTRIAL

Como dito anteriormente, além do apelo climático, a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia limpa tem apelo estratégico devido à probabilidade futura das fontes oriundas dos combustíveis fósseis não atenderem a crescente demanda energética (WANG et al., 2015). Segundo Melo (2018), a curto e médio prazo, a alternativa mais viável para a produção contínua de combustíveis é utilizar as fontes renováveis como matéria-prima.

Contudo aumentar a produção de biodiesel requer iniciativas governamentais e políticas públicas mais efetivas. Um exemplo é o Programa Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB) que apesar de não ter atingido a mete planejada, incentivou o

cultivo de matérias-primas para o biodiesel por parte da agricultura familiar mostrando que a produção de biodiesel pode ter vantagens sociais. (VIEGAS; ARANTES, 2018)

Em contraponto, as desvantagens relacionadas com a produção de biodiesel como o custo alto e a formação de glicerol como subproduto do processo, dificultam o aumento da produção. Essa perspectiva levanta a necessidade de novas tecnologias e formas de produzir biodiesel (SILVA, 2018). Trabalhos nesse âmbito já vem sendo desenvolvidos (AJALA et al., 2017; ARANSIOLA et al., 2014; YAAKOB et al., 2013).

Todos os esforços até agora realizados, ainda não foram suficientes para aumentar a produção do biodiesel a um nível que seja relevante no consumo de energia total. Por isso há necessidade de se criar novas demandas para elevar a relevância do biodiesel e justificar investimentos em novos processos.

A importância de se inserir o biodiesel no setor industrial está no fato deste setor ser o maior consumidor de energia e o que menos utiliza o biodiesel entre os setores da economia, de acordo com o Balanço Energético Nacional (2018). Como aspectos de inovação é necessário criar alternativas de uso do biodiesel dentro da indústria ajudará a aumentar a relevância deste combustível a fim de justificar o investimento no desenvolvimento de novas formas de produzi-lo, visando a diminuição da dependência dos combustíveis fósseis e conseqüentemente, diminuição das emissões. As geometrias desenvolvidas no trabalho procuraram trazer alternativas do uso do biodiesel em queimadores industriais, abrindo novas rotas de utilização deste combustível.

## 5 CONCLUSÃO

A fim de analisar o escoamento rotacional do biodiesel, foi desenvolvido um *swirler* baseado em modelos existentes na literatura. O modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\epsilon$ , pois, de acordo com pesquisa bibliográfica realizada, descreve o escoamento rotacional de forma satisfatória sem exigir tanto do recurso computacional. Três geometrias foram simuladas, sem pás, com ângulo de pá suave e outra com ângulo de pá mais agudo.

A partir do trabalho desenvolvido, observou-se que a geometria de entrada do queimador pode induzir o escoamento e aumentar a área de dispersão do biodiesel dentro da câmara. Assim, um design adequado pode interferir no escoamento do oxidante e combustível dentro da câmara de combustão, melhorando a mistura entre eles. A geometria *Swirler 1* não é eficiente para a formação do *swirl*. Já com o *Swirler 2*, o efeito de *swirl* é atingido para as velocidades de entrada utilizadas. A formação do *swirl* pode ser comprovada através da presença da ZCR, zona de recirculação central característica deste escoamento.

Pôde-se perceber que a modificação do escoamento provocada pela geometria *Swirler 2* induz o escoamento em forma de espiral, ou seja, o *swirl* como se nota na Figura 33. Ademais, notou-se por meio dos gráficos de fração volumétrica do item 4.6 que há um aumento da região de abrangência do combustível, isto é, para esta geometria o biodiesel apresentou um maior comprimento da pluma. A formação do *swirl* é comprovado por definitivo pela presença das zonas de recirculação centrais mostradas na Figura 41 e que são uma característica singular deste tipo de escoamento. Por isso, a partir destes pontos observados, pode-se afirmar que a geometria *Swirler 2* proporciona uma melhora na dispersão do combustível e na mistura dos reagentes através da geração do *swirl*.

Além disso, este trabalho aponta para uma nova direção em relação à aplicação de biodiesel, o que pode justificar o aumento da produção de biodiesel e a busca por novas formas de matéria-prima e novos meios de produzi-lo a fim de atender a indústria.

Por outro lado, apesar do biodiesel ter índices de poluição menores para algumas substâncias poluidoras, as emissões de NO<sub>x</sub> são maiores que outros combustíveis como diesel, por isso a utilização de um dispositivo como o *swirler* que possibilita a redução das emissões de NO<sub>x</sub>, é apresentado como uma forma de melhorar as características de combustão e aumentar a relevância deste combustível.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho analisou a influência da geometria da entrada de um queimador industrial no escoamento de biodiesel através de Fluidodinâmica Computacional, sem considerar queima ou reações. Seria então relevante o estudo de outras geometrias geradoras de *swirl*.

Futuramente é interessante que simulações que considerem a queima e reações envolvidas na combustão do biodiesel sejam realizadas para uma descrição mais detalhada do fenômeno físico e químico. Para uma total validação do método numérico e para uma ampliação no campo de estudos, sugere-se que procedimentos experimentais da queima do biodiesel em queimadores, avaliando nível de *swirl* e emissões, sejam também realizados. Assim como modificações nas proporções de entrada dos reagentes e adição de Nitrogênio.



## REFERÊNCIAS

- AJALA, E. O. et al. Optimization of a two stage process for biodiesel production from shea butter using response surface methodology. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 26, n. 4, p. 943–955, 2017.
- ALVISO, D. (ECOLE C. P. DE I.-U. et al. **CHARACTERIZATION OF THE BIODIESEL COMBUSTION WITH LDV AND EMISSION SPECTROSCOPY IN A. FLUVISU 14 / Ecoulements diphasique. Anais...Lille: 2011**
- ANSYS INC. ANSYS CFX – Solver Theory Guide. [S.l.], 2009.
- ARANSIOLA, E. F. et al. A review of current technology for biodiesel production: State of the art. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 276–297, 2014.
- BAUKAL, C. E.; GERSHTEIN, V. Y.; LI, X. (Ed.). **Computational fluid dynamics in industrial combustion**. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- BAUKAL JR, C. E. (Ed.). **Industrial Burners Handbook**. Boca Raton: CrC Press, 2003.
- BAUKAL JR, C. E. (Ed.). **Industrial Combustion Testing**. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- BEÉR, J. M.; CHIGIER, N. A. **Combustion aerodynamics**. Barking: Applied Science Publishers Ltd, 1972.
- BOLSZO, C. D.; MCDONELL, V. G. Emissions optimization of a biodiesel fired gas turbine. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 32, n. 2, p. 2949–2956, 2009.
- CELIK, I. et al. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, 2008.
- CHONG, C. T. **Combustion Characteristics of Alternative Liquid Fuels**. 2011. Tese (Doctorate of Philosophy) - Department of Engineering, University of Cambridge, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.17863/CAM.14037>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- CHONG, C. T.; HOCHGREB, S. Flame structure, spectroscopy and emissions quantification of rapeseed biodiesel under model gas turbine conditions. **Applied Energy**, v. 185, p. 1383–1392, 2017.
- CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- DAVIDSON, P. A. **Turbulence: an introduction for scientists and engineers**. Oxford University Press, 2004.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2018: ano base 2017. Balanço Energético Nacional, p. 292, 2018. Disponível em: [http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_\\_Int.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf). Acesso em: 20 fev. 2019.

FAN, Y. et al. Spray characterization of an air-assist pressure-swirl atomizer injecting high-viscosity *Jatropha* oils. **Fuel**, v. 121, p. 271–283, 2014.

FU, Y. **Aerodynamics and Combustion of Axial Swirlers**. 2008. Tese (Doctorate of Philosophy) - Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, University of Cincinnati, 2008. Disponível em: [http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=ucin1204551619](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ucin1204551619). Acesso em: 20 fev. 2019.

FUDIHARA, T. J.; GOLDSTEIN, L.; MORI, M. The three-dimensional numerical aerodynamics of a movable block burner. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 20, n. 4, p. 391–401, 2003.

FUDIHARA, T. J.; GOLDSTEIN, L.; MORI, M. A numerical investigation of the aerodynamics of a furnace with a movable block burner. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 2, p. 233–248, 2007.

GOLDEMBERG, J. Energia e Sustentabilidade. **Revista de Cultura e Extensão USP**, v. 14, p. 33, 30 nov. 2015.

ISHAK, M. S. A. et al. Numerical and experimental study on droplet size of kerosene fuel. **International Review of Mechanical Engineering**, v. 6, n. 7, p. 1593–1600, 2012.

ISHAK, M. S. A.; JAAFAR, M. N. M.; ELDRAINY, Y. A. The Effect of Radial Swirl Generator on Reducing Emissions from Bio-fuel Burner System. **Modern Applied Science**, v. 3, n. 6, p. 45, 2009.

LIU, T. et al. Large Eddy Simulation Analysis on Confined Swirling Flows in a Gas Turbine Swirl Burner. **Energies**, v. 10, n. 2081, p. 1–18, 2017.

LOFRANO, R. C. Z. Uma revisão sobre biodiesel. **Pensamento Plural**, v. 2, n. 2, p. 83–89, 2008.

MAHMUDUL, H. M. et al. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. April 2016, p. 497–509, 2017.

MALIK, M. S. A. et al. Combustion and Emission Characteristics of Coconut-Based Biodiesel in a Liquid Fuel Burner. **Energies**, v. 10, n. 4, p. 458, 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2004.

MARKATOS, N. C. The mathematical modelling of turbulent flows. **Applied Mathematical Modelling**, v. 10, n. 3, p. 190–220, 1 jun. 1986.

MELO, M. C. DE R. **Políticas públicas brasileiras de biocombustíveis: estudo comparativo entre os programas de incentivos à produção, com ênfase em etanol e biodiesel**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis) - Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/22325>. Acesso em: 01 mar. 2019.

NOVELLA, R. et al. The role of detailed chemical kinetics on CFD diesel spray ignition

and combustion modelling. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 7–8, p. 1706–1719, 2011.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Biomass in the generation of electricity in Portugal: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. February 2016, p. 373–378, 2017.

OLIVEIRA, T. D. et al. **Simulação computacional da influência do swirl em projetos de queimadores para aplicações industriais**. In: VIII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM 2014. Uberlândia: ABCM, 2014.

PINTO, A. C. et al. Biodiesel: An Overview. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 16, n. 6B, p. 1313–1330, 2005.

PUIGJANER, L.; PÉREZ-FORTES, M.; LAÍNEZ-AGUIRRE, J. Towards a Carbon-Neutral Energy Sector: Opportunities and Challenges of Coordinated Bioenergy Supply Chains-A PSE Approach. **Energies**, v. 8, n. 6, p. 5613–5660, 2015.

RAGHAVAN, V. **Combustion Technology: Essentials of Flames and Burners**. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.

RAHIM, N. A. et al. Effect on particulate and gas emissions by combusting biodiesel blend fuels made from different plant oil feedstocks in a liquid fuel burner. **Energies**, v. 9, n. 8, 2016.

REDDY, V. M. et al. Combustion characteristics of biodiesel fuel in high recirculation conditions. **Fuel Processing Technology**, v. 118, p. 310–317, 2014.

RHIE, C. M.; CHOW, W. Li. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. **AIAA journal**, v. 21, n. 11, p. 1525-1532, 1983.

SILVA, E. O. DA. **DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA PARA COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS, OPERANDO SOB REGIME DE COMBUSTÃO SEM CHAMA VISÍVEL**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/138140>. Acesso em: 01 fev. 2019.

SILVA, R. V. P. DA. **AVALIAÇÃO TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE BIORREFINARIAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL E COPRODUTOS VIA TRANSESTERIFICAÇÃO DE ÓLEO DE FRITURA RESIDUAL**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/28532>. Acesso em: 01 mar. 2019.

SYRED, N.; BEÉR, J. M. Combustion in swirling flows: A review. **Combustion and Flame**, v. 23, 1974.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics : a practical approach**. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2008.

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion**. Nova York: McGraw-Hill, 1996.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; VASSILEV, V. S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. **Fuel**, v. 158, p. 330–350, 2015.

VENTURI, V. et al. Relação ar / combustível e consumo específico para formulações de diesel / biodiesel Resultados e Discussão. **Sociedade Brasileira de Química (SBQ)**, v. 1, n. 1c, p. 1–2, [s.d.].

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Harlow: Pearson Education Limited, 2005.

VIEGAS, T. DE O. C.; ARANTES, L. S. Políticas públicas para a ampliação da produção de biodiesel no Brasil. **Revista Observatorio de la economía latinoamericana**, 2018.

WANG, J. et al. The implications of fossil fuel supply constraints on climate change projections: A supply-side analysis. **Futures**, v. 86, p. 58–72, 1 fev. 2015.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. McGraw Hill Brasil, 1962.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3. ed. DCW Industries, Inc., 1993.

YAAKOB, Z. et al. Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 184–193, 2013.

YASIN, M. F. M. et al. Discrete multicomponent model for biodiesel spray combustion simulation. **Fuel**, v. 126, p. 44–54, 2014.

ZUNIGA, A. D. G. et al. REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BODIESEL. p. 55–72, 2011.