

UNESP



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

RAPHAEL BLANCO

**ANÁLISE DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO EM ESCALA
PILOTO ATRAVÉS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Guaratinguetá
2013

RAPHAEL BLANCO

ANÁLISE DE UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO EM ESCALA PILOTO ATRAVÉS
DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Trabalho de Graduação apresentado
ao Conselho de Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica da
Faculdade de Engenharia do Campus
de Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, como parte dos
requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior
Co-Orientador: Prof. Dr. Anton Skyrda Veríssimo

Guaratinguetá
2013

	Blanco, Raphael
B641a	Análise de uma câmara de combustão em escala piloto através de fluidodinâmica computacional / Raphael Blanco – Guaratinguetá: [s.n], 2013. 66 f : il. Bibliografia: f. 62-66 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013. Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior Coorientador: Prof. Dr. Anton Skyrda Veríssimo 1. Combustão 2. Métodos de simulação I. Título
	CDU 662.9

UNESP



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

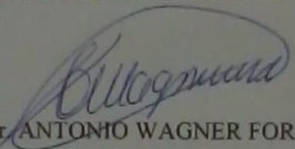
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

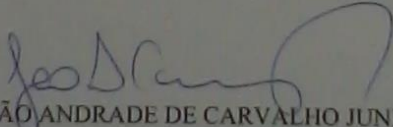
RRAPHAEL BLANCO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

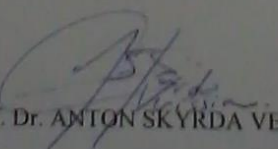
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



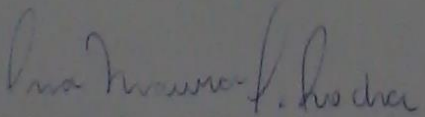
Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador



Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR



Prof. Dr. ANTON SKYRDA VERÍSSIMO



Profa. Dra. ANA MAURA ARAUJO ROCHA

DADOS CURRICULARES

RAPHAEL BLANCO

NASCIMENTO 19.05.1988 – PINDAMONHANGABA / SP

FILIAÇÃO Célio Blanco
Ana Maria Mendes Blanco

2007/2013 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

A meus familiares.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte da vida e da graça, que me deu forças, saúde e sabedoria para superar os desafios em minha vida. E a Nossa Senhora, pela proteção e intercessão. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, os dons e ensinamentos que recebi.

Aos meus queridos pais e querida irmã, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos, me orientaram e me deram todo suporte, e sacrificaram os seus sonhos para que eu pudesse realizar os meus,

Aos meus orientadores, *Prof. Dr. João Andrade*, por esta oportunidade única, e *Prof. Dr. Anton Verissimo* que, sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos funcionários do INPE e da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

Aos meus amigos, colegas da república Mocó, colegas de faculdade, colegas de trabalho da TenarisConfab e Exall Alumínio, comissão de formatura, e a todos que fizeram parte desta jornada, pelos momentos de compreensão, aprendizado, crescimento e descontração,

Ao programa CNPq/PIBIC pelo financiamento do projeto de pesquisa e concessão da bolsa.

E a todos aqueles, que não foram mencionados neste texto, mas têm uma parcela de contribuição neste trabalho e na minha vida.

“Sem grandes esforços não se chega a grandes coisas,
por isto, deves estar pronto para tudo”
(autor desconhecido)

BLANCO, R. Análise de uma câmara de combustão em escala piloto através de fluidodinâmica computacional. 2013. 64 p. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Este trabalho procura examinar, através de uma simulação numérica, o comportamento de uma câmara de combustão em escala piloto, acoplada a um queimador regenerativo. Visa-se a obtenção de um domínio computacional capaz de suportar uma simulação dos regimes de combustão convencional e sem chama visível. A obtenção de uma malha de qualidade é a base para aplicação do método dos volumes finitos, modelos de turbulência e cinética química para combustão sem pré-mistura. Objetiva-se obter a independência de malha, análise dos campos de velocidade dos fluidos no interior da câmara, perfis de temperatura e concentração das espécies emitidas no processo de combustão.

PALAVRAS-CHAVE: câmara de combustão, combustão sem chama visível, fluidodinâmica computacional, simulação, malha

BLANCO, R. Analysis of a combustion chamber in pilot scale using computational fluid dynamics. 2013. 64 p. Graduate work in Mechanical Engineering – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

This work aims to examine, the behavior of a combustion chamber in pilot scale, coupled to a regenerative burner. The objective is to obtain a computational domain capable of supporting a simulation of conventional combustion and flameless combustion regimes. The objective is to obtain independence of mesh, analysis of the velocity fields of the fluid within the chamber, temperature and concentration profiles of the species emitted during the combustion process.

KEYWORDS: combustion chamber, flameless, computational fluid dynamics, simulation, mesh

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regimes de combustão: a) convencional b) sem chama visível	18
Figura 2 – Aparência do modo de combustão para diferentes valores do coeficiente de excesso de ar	20
Figura 3 – Volume elementar para os balanços de conservação	22
Figura 4 - Discretização estruturada (a), estruturada generalizada (b), e não estruturada (c)	25
Figura 5 – Câmara de combustão e queimador REGEMAT M250	33
Figura 6 – Desenho do modelo da câmara de combustão	34
Figura 7 – Malha proposta para a modelagem	40
Figura 8 – Perfis de velocidade no plano axial de simetria.	42
Figura 9 – Comparação das velocidades na direção axial	43
Figura 10 – Comparação das velocidades na direção radial	44
Figura 11 – Configuração do queimador Caso I em vista frontal	45
Figura 12 – Campo de Temperaturas (Caso I)	46
Figura 13 - Distribuição fração molar de CO (Caso I)	46
Figura 14 – Distribuição fração molar de CO₂ (Caso I)	47
Figura 15 – Distribuição fração molar de O₂ (Caso I)	48
Figura 16 – Perfil de temperatura e linhas de corrente (Caso I)	48
Figura 17 – Configuração do queimador Caso II – Injeção superior	49
Figura 18 – Campo de Temperaturas (Caso II)	50
Figura 19 – Distribuição fração molar de CO (Caso II)	50
Figura 20 – Distribuição fração molar de CO₂ (Caso II)	51
Figura 21 – Distribuição fração molar de O₂ (Caso II)	51
Figura 22 – Perfil de temperatura e linhas de corrente (Caso II)	52
Figura 23 – Configuração do queimador Caso III – Injeção intercalada	52
Figura 24 – Campo de Temperaturas (Caso III)	53
Figura 25 – Distribuição fração molar de CO (Caso III)	54
Figura 26 – Distribuição fração molar de CO₂ (Caso III)	54
Figura 27 – Distribuição fração molar de O₂ (Caso III)	55
Figura 28 – Perfil de temperatura e linhas de corrente (Caso III)	55

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Qualidade de elemento em função da assimetria.</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 2 – Dimensões principais do modelo</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 3 - Características do computador usado para a realização deste trabalho</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4 - Condições de contorno usados no estudo de malhas.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 5 - Condições de contorno usados na simulação da combustão convencional</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 6 – Resultados do estudo de malhas.....</i>	<i>41</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	MOTIVAÇÕES DO TRABALHO	12
1.2.	OBJETIVO DO TRABALHO	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1.	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA A COMBUSTÃO	14
2.2.	COMBUSTÃO SEM CHAMA VISÍVEL	17
3.	FUNDAMENTOS	21
3.1.	ABORDAGEM NUMERICA E SUAS ETAPAS	21
4.	METODOLOGIA	33
4.1.	DESCRIÇÃO FÍSICA DO PROBLEMA	33
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	57
6.1.	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

O domínio do fogo e processos de combustão, revolucionou a vida do homem, e possui presença marcante nos processos de transformação e fabricação atuais. Contudo, devido aos impactos ambientais, bem como os protocolos ambientais vigentes, e as regulamentações cada vez mais restritivas, houve a necessidade de buscar tecnologias alternativas as convencionais.

A manufatura responde por um terço do uso de energia global, e o potencial para economias de energia na indústria é particularmente grande em países em desenvolvimento. As oportunidades principais são a melhoria da eficiência do equipamento de uso intensivo de energia, como motores e as caldeiras, e de indústrias de uso intensivo de energia, como ferro, aço, cimento, produtos químicos e petroquímicos. Uma das medidas com melhor custo-benefício é combinar calor e energias. (Banco Mundial, Relatório sobre o desenvolvimento mundial 2010: desenvolvimento e mudança climática, 2010, p.585).

Nas últimas décadas, pesquisadores e setores industriais de geração de energia, petroquímica e siderúrgicas vêm desenvolvendo avanços, no campo da tecnologia da combustão e modelos fluidodinâmicos, para melhoria da eficiência energética e redução de poluentes e subprodutos indesejáveis ou nocivos ao homem. Os métodos em fluidodinâmica computacional, e o regime de combustão sem chama visível, são tecnologias inovadoras no que desrespeito a processos de combustão. Elas vem ganhando notável importância da comunidade científica e grupos industriais, pela sua contribuição na busca pela redução de emissões de gases poluentes, e maior eficiência energética de processos.

1.2. OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo geral desse trabalho é obter um domínio computacional capaz de suportar uma simulação numérica computacional do processo de combustão em uma câmara de combustão em escala piloto, que está acoplada a um queimador regenerativo, com queima de gás natural. Caso o modelo seja coerente, e confiável, poderá ser feita a verificação do comportamento das variáveis essenciais ao projeto, dos perfis de velocidade, bem como a análise dos campos de temperatura e concentração das espécies emitidas de forma a recomendar melhorias ao modelo proposto e indicar assim direções para a simulação completa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA A COMBUSTÃO

O estudo da dinâmica dos fluidos evoluiu muito e alcançou uma crescente mais acelerada com as simulações numéricas e computacionais. A aplicação de técnicas de simulação por computador para melhorar o processo de combustão tem se expandido rapidamente na última década. Essas técnicas oferecem previsões confiáveis sobre o efeito de vários parâmetros em relação ao desempenho da combustão. Além disso, a simulação computacional frequentemente apresenta informações sobre as quantidades físicas que são difíceis de medir.

“A solução numérica, das equações de conservação tem sido um tema de crescente interesse que tem ocupado a atenção de quase um terço dos pesquisadores em mecânica dos fluidos.” (FERZIGER e PERIC, 2002).

Existem diferentes métodos que podem ser empregados para avaliar câmaras de combustão. Dentre eles, a fluidodinâmica computacional, que baseia-se no método de volumes finitos, sendo uma ferramenta para o modelo numérico, onde se é possível resolver problemas de escoamento e reduzir o trabalho experimental de alto custo. Tem-se, amplamente, aproveitado esta abordagem para análise de câmaras de combustão e outros problemas de engenharia.

“A configuração dos reagentes e de exaustão puderam ser otimizadas estudando-se uma modelação em fluido dinâmica computacional” (SZEGÖ et al., 2003).

Devido, ao elevado custo dos ensaios experimentais e protótipos, a simulação numérica tornou-se cada vez mais importante para investigar a combustão turbulenta. A correta modelagem depende de muitos fatores, desde os modelos de turbulência adotados ao escoamento dentro de uma câmara de combustão, até os modelos de combustão e cinética química, sendo a simulação em combustão umas das mais complexas de se trabalhar.

Veríssimo et al. (2012b), realizaram uma simulação numérica utilizando o código comercial *Fluent*, objetivando modelar matematicamente uma câmara de combustão com jato de ar central, empregando o modelo k- ϵ realizável para modelar a turbulência e dois modelos de combustão o EDC (*Eddy Dissipation Concept*) e o modelo de transporte das PDFs (Probability Density Function). Verificou-se que, os modelos fornecerem boas previsões das espécies químicas e do campo de temperatura, porém o modelo de transporte das PDF's é o que tem melhor concordância com os resultados experimentais comparado ao modelo EDC.

He (2008), buscou validar os modelos de fluidodinâmica computacional para combustão sem chama visível, de gás natural, num forno de geometria com condição de simetria, e as simulações numéricas foram feitas também com o código comercial *Fluent*. Constatou-se que, os perfis de temperatura da parede do forno preditos concordaram bem com os dados experimentais obtidos em quatro locais de medição no forno, e as concentrações de óxidos de nitrogênio, NO_x , estimados, comparados frente os resultados experimentais, foram significativamente adequados. Isto demonstra a capacidade do *software* em prever as principais espécies de produtos e estimar algumas das emissões de poluentes.

Outro estudo, de Múnera et al. (2009), propôs também que o código o *Fluent*, é uma ferramenta fundamental para o estudo fenomenológico e otimização de projetos de combustão. De acordo com este trabalho, são reconhecidos que os

modelos mais adequados para a simulação de combustão – e, mesmo combustão sem chama visível - são os modelos de turbulência $k-\epsilon$ padrão e $k-\epsilon$ realizável, e os modelos de combustão, a taxas finitas (*Eddy Dissipation*), e o modelo EDC (*Eddy Dissipation Concept*).

“Embora, o conceito de combustão sem chama visível, tem sido extensivamente estudado experimentalmente e numericamente, ainda há o desafio de modelar com precisão este regime de combustão, que envolve um campo de mistura mais homogêneo e taxas de reação mais lentas. A tecnologia, de combustão sem chamas visíveis, ainda não está totalmente comercializado e bem adotada na indústria, portanto, é muito importante a realização de investigações.” (CAVALIERE et al, 2008; DANON, 2011; LI et al, 2011b; PARENTE et al. 2011).

Como, em qualquer teoria científica, a modelagem através de fluidodinâmica computacional por si só não é fundamentalmente robusta sem a validação de seus resultados com o trabalho experimental. Mesmo assim, devido as muitas vantagens empregadas nesta modelagem, principalmente em relação a recursos como tempo e dinheiro, e as boas aproximações da realidade que se pode conseguir através dos modelos físicos e químicos que se tem disponíveis, é justificável que se recorra a esta alternativa.

Nas duas últimas décadas, artigos sobre o regime de combustão sem chamas visíveis, e simulações numéricas computacionais ou assuntos correlatos, foram publicados e instituições de ensino e departamentos de investigação da indústria têm investigado esta nova tecnologia de forma experimentalmente e numérica. Embora, a tecnologia de combustão tenha avançado substancialmente nos últimos anos, ainda há a necessidade de trabalhos para melhor conhecimento dos fenômenos que caracterizam e envolvem os regimes, bem como mais apoio por parte de órgãos específicos em combustão para apoiar o desenvolvimento destas tecnologias.

2.2. COMBUSTÃO SEM CHAMA VISÍVEL

“A crise da década de 1970 causada pela desregulamentação do sistema monetário internacional, seguida de dois choques petrolíferos (1973 e 1979) fez com que o crescimento dos países industrializados se retraísse. Com o dólar desvalorizado, os países árabes membros da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo) aumentaram o preço do petróleo em resposta à decisão dos Estados Unidos da América de continuar a abastecer Israel com armas militares, numa altura em que os países produtores de petróleo estavam em guerra com Israel, e nacionalizaram as instalações ocidentais” (BARKSKY e KILIAN, 2004).

Assim, em meio a este contexto político e econômico, envolvido pela preocupação ambiental e os recursos limitados, principalmente de combustíveis, provocaram pesquisadores e fabricantes a projetarem sistemas de combustão mais eficientes e com menores índices de poluentes emitidos. Para, contornar estes fenômenos, uma boa alternativa seria otimizar a utilização de combustíveis. Inicialmente, foram feitos testes com pré-aquecimento do ar, porém o uso desta técnica, em geral, poderia aumentar significativamente a formação de óxidos de nitrogênio, não sendo viável em relação a melhor eficiência energética objetivada.

Desta forma, abriu-se espaço para o desenvolvimento de uma nova tecnologia em combustão, com o intuito de resolver este problema. Surgiu assim, em diferentes países, não necessariamente de forma concomitante, a técnica de combustão sem chama visível, que na literatura especializada possui várias abordagens e alternativas, sendo denominada por (WÜNNING, 1997) como *Flameless Oxidation* (FLOX ®), ou por (JOANNON, 2000; CAVALIERE e DE JOANNON, 2004; DALLY et al, 2002) como *Moderate or Intense Low Oxygen Dilution Combustion* (MILD), ou por (CAIN, 2000) como *Fuel Direct Injection* (FDI), ou por (MORITA e TANIGAWA, 2000) como *High Temperature Air Combustion* (HiTAC), ou ainda por (ARGHODE e GUPTA, 2010) como *Colorless Distributed Combustion* (CDC).

No início da década de 1990, trabalhos de natureza experimental na indústria alemã (WÜNNING, 1997; PLESSING et al, 1998; MANCINI et al, 2007; KIM et al, 2008; ZIEBA et al., 2010) e japonesa (KATSUKI e HASEGAWA, 1998; YUAN e NARUSE, 1999, TANAKA, 1995; YASUDA e UENO, 2000, NEWBY et al., 2000), e em laboratórios da Holanda (IFRF), observaram, algumas delas em escala semi-industrial, um regime de combustão estável, com alta recirculação dos produtos, distribuição uniforme de temperatura, melhor eficiência, identificando características do processo de combustão com pouca ou nenhuma visibilidade da chama, com alto fluxo de calor e uniformidade. Pode-se ter uma ideia mais clara, a partir da visualização da Figura 1, onde vê-se a diferença entre os regimes, convencional e sem chama visível, de combustão.

Figura 1 – Regimes de combustão: a) convencional b) sem chama visível



Fonte: (Krishnamurthy et al., 2009)

A combustão sem chama visível caracteriza-se, pela ausência de uma zona de combustão localizada, constituindo um processo volumétrico. Em contraste com as chamas usuais, não é possível enxergar a região de combustão a vista desarmada, e a ocorrência de labaredas não se visualiza porque a radiação emitida está fora do espectro visível.

O regime normalmente é alcançado com a entrada de combustível e ar pré-aquecido separadamente e em alta velocidade, havendo uma alta circulação,

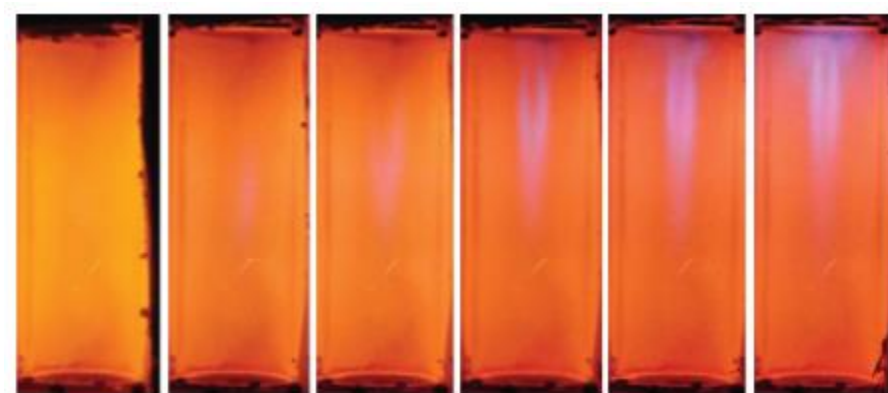
mistura e troca de calor, até ocorrer a reação. Quando ela ocorre, devido ao ar aquecer-se antes de se misturar ao combustível, onde os reagentes atingem uma temperatura de autoignição, as espécies acabam encontrando-se a temperaturas altas o suficiente para que haja essa combustão espontânea, sem necessidade de faísca.

“A temperatura de ignição é a temperatura a qual uma mistura entre combustível e oxidante (ou parte dela) tem que ser aquecida para que ocorra uma reação de combustão, sendo mínima para a mistura estequiométrica.” (CARVALHO JÚNIOR, 2007, p.38)

A reação acontece de forma homogênea e com gradientes de temperatura mais atenuados, sendo as concentrações de espécie químicas mais diluídas e distribuídas ao longo da câmara de combustão, estando o processo em toda a região da câmara de combustão. Este método, proporciona uma menor emissão de poluentes devida a menor temperatura de chama, comparado ao processo tradicional, podendo reduzir as quantidades de óxidos de nitrogênio emitidos. Por outro lado, há um cuidado em não comprometer a eficiência da combustão, e não aumentar a formação de monóxido de carbono. O ideal é que haja um equilíbrio, e que o calor esteja bem distribuído pela câmara, para que não se perca em eficiência com as menores temperaturas, como pode ser visto na figura 2.

A eficiência é muito importante para o processo de combustão, ela pode ser definida como a razão entre o calor conseguido na câmara de combustão e o calor que provém (potência útil) do fornecimento de energético no incinerador (sob a forma elétrica ou por abastecimento de combustível). Queimadores industriais precisam de uma chama estável e eficiente para um processo de aquecimento econômico e seguro. Em uma escala industrial, o processo de combustão com difusão ou sem pré-mistura das espécies vem a ser utilizada, devido à sua capacidade de controle e de segurança. (PETERS, 2000; TSUJI et al, 2003).

Figura 2 – Aparência do modo de combustão para diferentes valores do coeficiente de excesso de ar



Fonte: (Veríssimo, 2011)

3. FUNDAMENTOS

3.1. ABORDAGEM NUMERICA E SUAS ETAPAS

De forma geral, os problemas resolvidos por fluidodinâmica computacional seguem uma metodologia comum. Primeiramente, especifica-se o problema que está sendo estudado. Tem-se então, que gerar uma geometria, normalmente utilizando ferramentas de desenho computacional com tecnologia CAD (*Computer Aided Design*). Tendo sido gerada a geometria, se procede à discretização da mesma, dividindo o problema em inúmeros volumes de controle, afim de criar uma malha. Define-se então, as condições de contorno e os aspectos da modelagem. Por fim, deve-se resolver o problema, isto é, resolver os conjuntos de equações para cada volume de controle. Todas as etapas desta metodologia são importantes, e uma que seja mal formulada, acabaria por implicar em resultados não confiáveis.

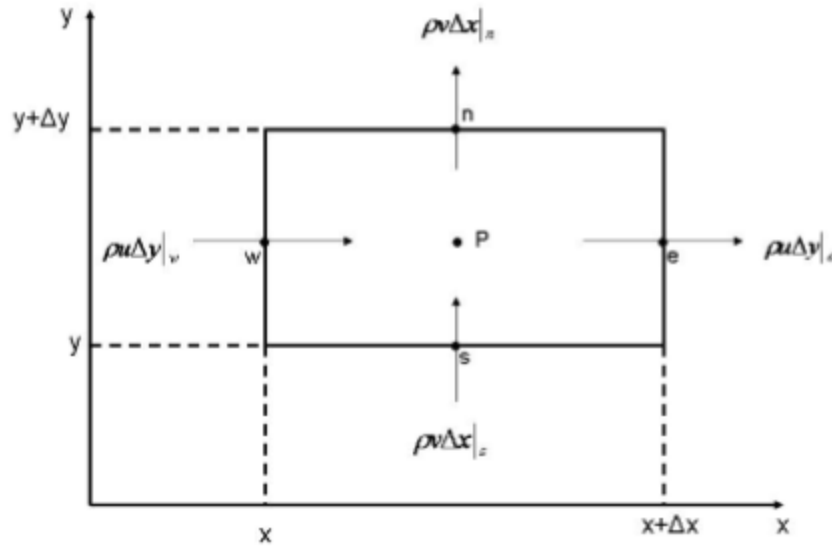
No caso do *software* comercial, *Ansys Workbench*, existem pacotes específicos a cada etapa, desde à geração da geometria, (*Ansys Design Modeler*) e à elaboração da malha (*Ansys Meshing*), até o pré-processamento, que inclui a modelagem e a definição das condições de contorno, juntamente à resolução matemática do problema (*Ansys Fluent*), e ainda um modulo dedicado à visualização dos resultados (*Ansys Results ou CFD-Post*).

Método dos volumes finitos, equações e geração de malhas

Entre os métodos numéricos tradicionais, sejam os métodos de diferenças finitas, de elementos finitos e de volumes finitos, este último normalmente aparece nos pacotes comerciais por sua robustez, e por conseguir satisfazer os princípios de conservação em nível discreto. (MALISKA, 2004, p.5). O método de volumes finitos consiste em dividir um volume de controle em vários volumes de controle menores, até quase atingir uma dimensão que torne as equações a serem

resolvidas dentro deste volume como uma função de ponto, sendo resolvida de forma iterativa ou simultaneamente todo o conjunto de equações diferenciais obtidas. Este método torna as equações governantes discretizadas dentro do domínio computacional (espaço-tempo), e pode ser melhor observado na figura 3.

Figura 3 – Volume elementar para os balanços de conservação



Fonte: (MALISKA, 2004)

Para estes volumes, são resolvidas equações diferenciais parciais, de conservação de massa, momento, energia e espécies químicas. No *Ansys Fluent*, de acordo com o guia do usuário (ANSYS Fluent 14.0 Theory Guide, ANSYS Inc., 2009) as equações são tratadas da seguinte forma, respectivamente, pelas equações:

- Equação de conservação da massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

onde S_m é a massa adicionada à fase continua pela fase dispersa, ρ é a massa específica [kg/m³], $\vec{v}$ é o vetor velocidade [m/s].

- Equações de conservação do momento

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \cdot \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T) - 2/3 (\nabla \cdot \vec{v} \cdot I) \right] \quad (3)$$

onde P é a pressão estática, $\bar{\bar{\tau}}$ é o tensor de tensões, $\rho \cdot \vec{g}$ e $\vec{F}$ representam a força gravitacional e de forças de campos externas, μ é a viscosidade e I é o tensor unitário.

- Equações de conservação da energia para o modelo de combustão sem pré-mistura.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot H) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot H) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \cdot \nabla \cdot H \right) + S_h \quad (4)$$

Assume-se, para esta formulação, que o número de Lewis (Le) é unitário. Sendo a entalpia total dada por:

$$H = \sum_j Y_j \cdot H_j \quad (5)$$

$$H_j = \int_{T_{ref,j}}^T c_{pj} \cdot dT + h_j^0 \cdot (T_{ref,j}) \quad (6)$$

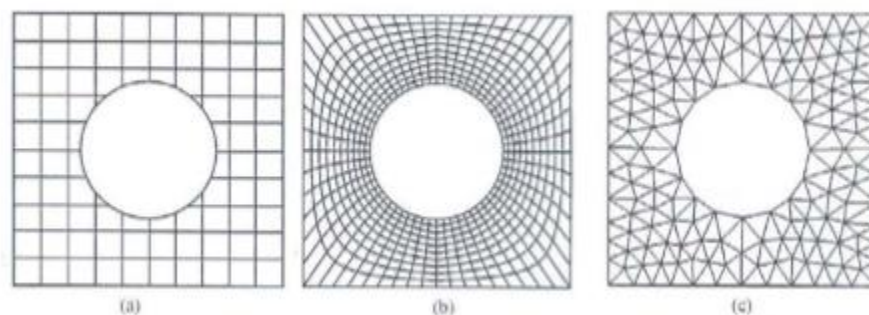
onde, S_h é o termo de fonte de calor volumétrica, que inclui o calor de reação química e qualquer outra fonte de calor volumétrica definida, k_t e c_p são constante de taxa de reação e calor específico respectivamente, Y_j é a fração mássica da

espécie j , o termo $h_j^0(T_{ref,j})$ é a entalpia de formação da espécie j na temperatura de referência.

A geração da malha é obtida da geometria e realizada através da discretização do domínio computacional. Para isso, são colocados diversos pontos na geometria original, denominados pontos nodais. Esses pontos passam a representar o centro de cada um dos volumes de controle que serão criados, uma vez que a face de cada volume de controle está localizada no ponto médio entre nós adjacentes. Uma vez gerada a malha, o ponto chave para o método de volumes finitos é a integração das equações que regem o problema sobre o volume de controle, de forma a garantir uma equação discretizada no ponto nodal. (MALALASEKERA et al., 1995).

A malha é provavelmente a etapa mais importante e que necessita de um tempo maior na sua preparação. Com uma malha bem representativa, pode-se chegar um modelo completo que forneça soluções precisas de forma mais ágil. Existem várias formas de modelar uma malha, e muitos *softwares* que trabalham com algoritmos para resolução e definição de malhas. Elas podem ser classificadas basicamente em malha estruturada ortogonal, que possui elementos regulares com ortogonalidade muito alta, não sendo indicadas para geometrias complexas ou em uma malha não-estruturada, onde as conexões entre os elementos ocorrem de forma irregular, mas possui maior adaptabilidade e, conseqüentemente, exigindo maior esforço do processo computacional. Também existe a malha estruturada não ortogonal, que permite variar a ortogonalidade. E, por fim, tem-se a malha híbrida, que mescla, em uma mesma malha, domínios estruturados e não estruturados. Os diferentes tipos de malha estão representados na figura 4, a seguir.

Figura 4 - Discretização estruturada (a), estruturada generalizada (b), e não estruturada (c)



Fonte: (MALISKA, 2004)

A malha deve se adequar corretamente ao escoamento que se pretende aplicar no modelo. Necessita-se compreender muito bem os fenômenos físicos envolvidos, avaliar a qualidade da malha em seus elementos e sua resolução nas partes de maior interesse, que normalmente recebem melhor tratamento e uma maior quantidade de volumes de controle.

Os atributos que dizem respeito a qualidade de uma malha são a assimetria do elemento, propriedade de qualidade ortogonal, e razão de aspecto. A assimetria está relacionada a perfeição geométrica do elemento, e seus intervalos de valores representativos estão mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Qualidade de elemento em função da assimetria.

Valor de assimetria	Qualidade do elemento
1	Inaceitável
0.9 – 1	Muito ruim
0.75 – 0.9	Ruim
0.5 – 0.75	Aceitável
0.25 – 0.5	Bom
0 – 0.25	Excelente
0	Equiângula

Já a qualidade ortogonal pode variar de 0, que corresponde a um elemento perfeitamente ortogonal, até 1, que representa um elemento imperfeito. A razão de aspecto é a razão entre a base e a altura do elemento.

Outro aspecto de muita importância a ser considerado na construção de uma malha é o seu refinamento. Quanto maior for o refinamento da malha, maior será a precisão dos resultados. Contudo, o tempo de processamento dessas respostas também aumenta. Numa malha mais grosseira, pode-se não conseguir obter resultados satisfatórios, de acordo com a necessidade requerida.

A maneira, mais adequada de verificar se a malha obtida comporta-se coerentemente com a situação analisada é a realização de testes em malhas com refinamentos diferentes, denominado teste de independência de malha. Se, é obtido resultados sem muitas diferenças para malhas com diferentes refinamentos, diz-se que a independência de malha foi alcançada.

Modelos de turbulência, cinética química e combustão

Escoamentos turbulentos são complexos e de difícil avaliação em simulações numéricas, principalmente através das equações originais de Navier–Stokes. (INCROPERA, 2008) Devido a essa restrição buscam-se soluções aproximadas dos efeitos da turbulência. Uma abordagem muito conhecida é a simulação numérica via equações médias de Reynolds, a RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*), ou também conhecida como modelagem clássica da turbulência, e descritas pelas equações (7), (8), (9) e (10). Estas equações são baseadas no conceito da viscosidade turbulenta e nas equações de transporte do tensor de Reynolds, onde as mesmas são avaliadas, considerando a média das médias sobre intervalos de tempo grande para a turbulência. Um aspecto importante desta média é que grande parte dos escoamentos turbulentos de interesse são estacionários e, assim nesses casos, a simulação numérica pode ser realizada para um único instante de tempo. Nas simulações numéricas via

RANS, utilizam-se modelos de turbulência para descrever o produto das flutuações.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \cdot u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \cdot v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \cdot w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \cdot u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho \cdot v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \cdot w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \cdot u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho \cdot v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho \cdot w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Tais equações, juntamente com a equação da continuidade, equação (10), formam um conjunto de quatro equações diferenciais parciais não lineares acopladas. Soluções analíticas para estas equações têm sido obtidas para muitos casos especiais, mas somente para geometrias e condições iniciais ou de contorno mais simples, para as quais muitos dos termos nas equações podem ser considerados iguais a zero (FOX, 2006).

O *software FLUENT* disponibiliza os seguintes modelos de turbulência (*FLUENT USER'S GUIDE*, 2011):

- *Spalart-Allmaras*
 - $k - \epsilon$
 - *Standard* $k - \epsilon$
 - *Renormalization-Group* (RNG) $k - \epsilon$
 - *Realizable* $k - \epsilon$
- $k - \omega$

- *Standard k – ω*
 - *Shear-Stress Transport (SST) k - ω*
- *Transition k - kl – ω*
- *Transition SST*
- *Reynolds Stress Models (RSM)*
 - *Linear pressure-strain RSM*
 - *Quadratic pressure-strain RSM*
 - *Low-Re stress-omega RSM*
- *Scale-Adaptive Simulation (SAS)*
- *Detached Eddy Simulation (DES)*
 - *Spalart-Allmaras RANS*
 - *Realizable k - ϵ RANS*
 - *SST k - ω RANS*
- *(LES) Large Eddy Simulation*
 - *Smagorinsky-Lilly subgrid-scale*
 - *WALE subgrid-scale*
 - *Dynamic Smagorinsky*
 - *Kinetic-energy transport subgrid-scale*
- *DNS (Direct Numerical Simulation)*

Basicamente pode-se dividi-los em três grupos principais. O DNS (*Direct Numerical Simulation*), que possui grande precisão de cálculo, mas exige recursos computacionais e de tempo muitíssimo elevados. O LES (*Large Eddy Simulation*) que resolvem apenas as estruturas de vórtices com maior relevância para o

escoamento, estes modelos produzem também bons resultados, contudo os recursos de processamento e tempo de cálculo são ainda muito elevados; e o modelo de turbulência RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) que resolve a turbulência por novas variáveis introduzidas. No caso do modelo $k-\epsilon$, que é um modelo de duas equações, ou seja, tem duas equações de transporte adicionais para representar a turbulência do escoamento, a variável k determina a energia da turbulência e a variável ϵ determina a taxa de dissipação da turbulência. Com estas duas variáveis é calculada uma outra variável denominada tensor de Reynolds. Os modelos de turbulência RANS são atualmente os mais utilizados, pois produzem bons resultados com baixos recursos computacionais.

O modelo $k-\epsilon$ realizável é o recomendado pelo manual do software dentro dos modelos deste nível disponíveis. Este modelo de turbulência deriva das mesmas equações de transporte do modelo $k-\epsilon$ padrão, e o termo realizável significa que as variáveis k e ϵ são derivadas de equações exatas, ao contrário do modelo padrão onde a variável k provem de equações exatas e a variável ϵ de formulações empíricas. Esta nova formulação do modelo $k-\epsilon$ realizável, permite resultados mais precisos na separação da camada limite, em escoamentos que envolvam rotação, gradientes de pressão adversos e zonas de recirculação.

Dentro os modelos de combustão disponíveis existem os de química rápida com o modelo PDF (*Probability Density Function*), e o modelo de chama laminar LFM (*Flamelet Laminar Model*). Também existem os modelos de dissipação dos vórtices EDM (*Eddy Dissipation Model*), e o modelo da taxa química finita FRCM (*Finite Rate Chemistry Model*), entre outros. Deve-se escolher os modelos de acordo com a situação estudada. Para casos onde a chama é difusiva, ou seja, não há uma mistura previa entre o combustível e o oxidante, um modelo adequado é o LFM. Porém se a mistura é formada antes da zona de combustão, ou é pré-misturada, um modelo adequado é o EDM. Há a possibilidade ainda de utilizar-se de esquemas passo único ou multipassos, onde para qual a reação, acontece em única etapa, permitindo uma convergência mais rápida e menor tempo

computacional, e o de várias etapas que permite prever um grande número de espécies intermediárias, como monóxido de carbono, CO , por exemplo.

As hipóteses formuladas na construção desses modelos podem ser agrupadas em dois grupos principais: cinética química infinitamente rápida e cinética química de taxa finita. Pode-se tomar um modelo de cinética química infinitamente rápida, conhecido como modelo de fração de mistura PDF (*Probability Density Function*) presumida, onde a combustão é descrita como uma reação irreversível de única etapa entre combustível e oxidante gerando produtos de combustão. O modelo faz uma abordagem estatística para o problema, a fim de levar em conta a interação turbulenta na combustão.

Modelagem dos poluentes e outras considerações

Existem também dentro da modelagem da combustão componentes que calculam ou preveem as quantidades dos componentes poluidores. O termo NO_x identifica as espécies químicas de óxidos de nitrogênio. Estas são formadas quando ocorre o processo de combustão, pela reação química do oxigênio presente no ar ou na composição do combustível. A formação de NO_x depende da composição do combustível, modo de operação e projeto de queimadores e câmaras de combustão, podendo ser associado a ocorrência de altas temperaturas.

Em geral, nos processos de combustão, a formação do NO é bem mais significativa do que a do NO_2 . No entanto, ao ser liberado para atmosfera o NO é totalmente convertido em NO_2 . (LACAVA, 2000).

Os componentes formados podem ser classificados de acordo com o seu mecanismo de formação, sendo basicamente:

- NO Térmico, produzido por oxidação do nitrogênio atmosférico nos gases depois da chama, cuja reações dominantes são dadas por:



- *NO Prompt*, produzido por reações de altas velocidades na frente da chama, representadas pelas seguinte equações:



- *NO* do Combustível, forma-se a partir da reação do nitrogênio existente no combustível.
- *NO* via N_2O , mecanismo do oxido nitroso intermediário.

Alguns outros pontos importantes merecem ser comentados sobre aspectos que envolvem a soluções computacionais dos modelos e problemas com os quais se podem trabalhar com o programa *Ansys Fluent*. Por exemplo, as equações de conservação de quantidade de movimento linear, envolvem gradientes de pressão, porém, não existe uma equação de conservação desta propriedade. Assim, pressão é especificada indiretamente através da equação de continuidade, recorrendo-se então a esquemas de acoplamento velocidade-pressão. Um esquema de uso geral com resultados satisfatórios foi resolvido utilizando-se o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) de correção de pressão (*FLUENT USER'S GUIDE*, 2011).

Outro ponto fundamental de uma solução numérica é que ela deve conter erros de truncamento tendendo a zero, quando a malha tender a um número infinito de pontos. Todo modelo numérico desenvolvido a partir das equações na forma conservativa usando volumes finitos é consistente. Recomenda-se observar os aspectos da convergência. Em primeira vista, pela estabilidade, que é a característica onde a solução numérica obtida é a solução exata das equações discretizadas, além da consistência, que juntamente à estabilidade, correspondem a condições necessárias e suficientes para a convergência. Uma solução numérica é convergente quando é estável e tende para a solução das equações diferenciais quando a malha é refinada.

4. METODOLOGIA

4.1. DESCRIÇÃO FÍSICA DO PROBLEMA

A metodologia adotada no presente trabalho se deu inicialmente pela revisão bibliográfica sobre os assuntos pertinentes à proposta do mesmo. Em seguida tomou-se conhecimento dos equipamentos (figura 5) presentes no LCP (Laboratório de Combustão e Propulsão) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), no município de Cachoeira Paulista, estado de São Paulo. Pode-se perceber que o modelo baseia-se, na geometria e condições de operação, da câmara de combustão em escala piloto e do queimador regenerativo REGEMAT M250, com capacidade nominal de 120 kW, e condicionado a atuar em regimes de combustão à baixas emissões de gases poluentes.

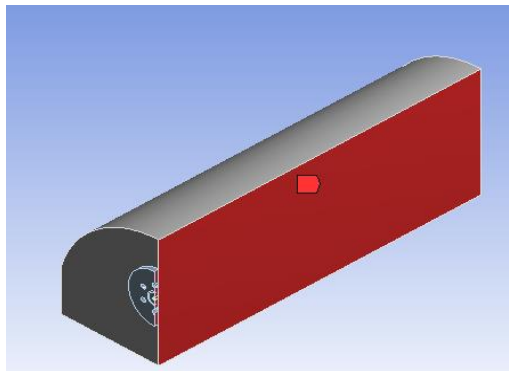
Figura 5 – Câmara de combustão e queimador REGEMAT M250



Fonte: Próprio autor

A geometria foi modelada, pelo Prof. Dr. Anton Sskyrdá Verissimo, no *software*, de tecnologia CAD (*Computer Aided Design*), chamado *SolidWorks*. Ela consta dos bocais do queimador e de toda a extensão da câmara de combustão. Posteriormente a geometria foi importada para o programa *Ansys Workbench* 14.5. A tabela 2 detalha as dimensões principais do modelo, e o desenho pode ser visto na figura 6.

Figura 6 – Desenho do modelo da câmara de combustão



Fonte: Próprio autor

Tabela 2 – Dimensões principais do modelo

Dimensão	Valor
Altura	720 mm
Largura	1780 mm
Diâmetro externo	530 mm
Diâmetro da entrada do queimador	140 mm
Diâmetro dos bocais do queimador	24 mm

Para, realizar a geração de malhas, e resolver as simulações, foi utilizado um computador, adquirido com o propósito de realizar este trabalho. As características técnicas do computador usado estão descritas na tabela 3.

Tabela 3 - Características do computador usado para a realização deste trabalho

Itens de configuração	Configuração
Processador	Intel Core i7 2,00 GHz
Memória RAM	8,00 Gb
Disco rígido	700 Gb
Sistema operacional	Windows 8 (64 bits)

O *software* escolhido para trabalhar será o *Ansys Workbench*, versão 14.5, sendo usados os módulos *Design Modeler* e *Meshing* para alterações no desenho e criação da malha, e o módulo *Fluent*, para modelagem e simulação dos escoamentos, turbulências e processos de combustão, além do módulo *Results*, ou *CFD-Post*, para melhor tratamento dos dados de saídas obtidos.

A etapa seguinte é a criação da malha e sua análise por critérios de seleção de malha ideal. Foram criadas diferentes malhas com diferentes quantidades de elementos e refino, com o intuito de testar e comparar malhas mais grosseiras com malhas mais refinadas. A geometria da câmara de combustão permite uma situação de simetria, e esta foi usada para diminuir o esforço computacional.

A solução de um problema via fluidodinâmica computacional está fortemente ligada a malha utilizada na discretização do domínio. Assim, um dos passos mais importantes deste trabalho é o estudo de malhas. Com esse estudo, é possível determinar qual a influência da malha sobre o resultado e qual seria o tamanho de um elemento de malha adequado para o problema. O teste de malha chega ao fim quando se encontra um resultado que varie muito pouco com o aumento do refino da malha. A velocidade do escoamento é monitorada, e analisa-se os resultados obtidos com as diferentes malhas, comparando-os entre si. A malha ideal será aquela, que, a partir da qual, o valor da velocidade, permanecer praticamente constante. As condições empregadas na configuração para as soluções de independência de malha podem ser vistas na tabela 4.

Tabela 4 - Condições de contorno usados no estudo de malhas

Condições do <i>solver</i>	Configuração
Modelo de Turbulência	<i>K-ε realizável</i>
Fluido	Ar
Velocidade inlet_1 e inlet_2	162,4 [kg/h] ou 30 [m/s])
Outlet_1 e outlet_2	0 [Pa]

Os fatores de sub-relaxamento podem ser alterados para contribuir no processo iterativo. Estes fatores são usados nas resoluções das equações onde cada cada equação, que o *software* tenta resolver, sendo muitas vezes não lineares, necessitando controlar as alterações das variáveis, produzida por cada iteração. Utilizou-se inicialização padrão para as variáveis no processo de simulação.

Os residuais aceitáveis, para que se declare que a convergência foi atingida são da ordem de $1,0 \times 10^{-06}$. Quanto menor for o resíduo, melhor convergência e, uma solução mais adequada podem ser atingidas.

O *software* comercial *Ansys Fluent*, como já foi citado anteriormente, foi utilizado para realizar as simulações. Adotou-se trabalhar com modelo tridimensional, de dupla precisão e em processamento paralelo, que ajudam na redução do tempo de simulação. O modelo de turbulência adotado foi o K-ε realizável, conforme revisão bibliográfica, por sua robustez, e por demandar menor capacidade de hardware comparado como os outros modelos existentes. O tratamento padrão para funções próximas as paredes do modelo foi adotado. O acoplamento pressão-velocidade foi feita com o algoritmo *SIMPLE*, e a discretização da pressão através do sistema *Standard*, para todas as simulações. A discretização do momento, da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação específica foi feita considerando o modelo *First Order Upwind*, num primeiro momento, e posteriormente o modelo *Second Order Upwind*, baseados em esquemas de discretização embutidos no modulo *Fluent*. Já em trabalho com

a malha considerada ótima para o estudo do modelo apresentado, procede-se a modelagem da combustão, primeiro na forma convencional e, posteriormente, em combustão sem chama visível.

A modelagem da combustão foi realizada através do modelo sem pré-mistura, onde a composição do ar consistia de 79% de nitrogênio (N_2) e 21% de oxigênio (O_2), reagindo com metano (CH_4) 100%. O modelo foi simulado em regime permanente, como sistema adiabático, utilizando o modelo de gás perfeito e o modelo de ignição por *Flamelets* entre as espécies. As configurações utilizadas podem ser visualizadas na tabela 5.

Tabela 5 - Condições de contorno usados na simulação da combustão convencional

Configuração do solver	Item selecionado
Modelo de turbulência	k- ϵ realizável
Modelo de combustão para ignição	Ignição <i>Flamelets</i>
Modelo de combustão	EDC (<i>Eddy Dissipation Concept</i>)
Entrada de Ar	192,0 [kg/h]
Entrada de Combustível	9,5 [kg/h]
Saída	0 [Pa]
Excesso de ar	30 %
Temperatura de pré-aquecimento do ar	800 [°C]

A estratégia proposta é a de modelar inicialmente a combustão convencional, por meio do modelo de *flamelets*, junto ao tratamento das PDFs (*Probability Density Function*). Uma vez obtida a combustão convencional e, com o modelo convergido para muitas iterações, pode-se implementar as condições e os modelos de combustão recorrendo ao EDC (*Eddy Dissipation Concept*) com reação química em etapa única e, num outro momento com reação química no esquema em dois passos. Na combustão, é preciso simular primeiramente os escoamentos isotérmicos, seguido após a com a situação adiabática e por fim o

modelo reativo completo. O processo de reação química em único passo se dá pela seguinte forma:



A simplificação do complexo fenômeno da combustão a um mecanismo de um único passo envolve a transformação de uma espécie química característica do combustível (metano) num produto característico da combustão, (dióxido de carbono), podendo ser escrita segundo um esquema de um único passo. Por ser a aproximação mais simples que pode ser feita, este mecanismo deve traduzir a reatividade média do combustível no interior da câmara. Tratando-se de uma reação heterogênea altamente exotérmica, onde existe um oxidante e uma espécie combustível.

Sendo que todas as espécies são gasosas não se justifica um controle cinético, uma vez que, neste caso, as limitações de difusão à transferência de massa são dominantes sobre as limitações cinéticas. Os mecanismos de um único passo tendem a produzir temperaturas adiabáticas de chama muito elevadas, uma vez que todo o calor gerado pelo combustível é libertado numa única etapa. Já o processo de reação química em duplo passo pode ser representados por:



Ao se considerar a existência de duas etapas na modelação da combustão do gás natural, torna-se necessário introduzir uma nova espécie química intermediária - o monóxido de carbono. Em relação ao modelo de passo único, este sistema caracteriza-se, fundamentalmente, pela transferência de parte do calor libertado na combustão, para zonas mais ou menos afastadas da zona direta de combustão. O mecanismo formulado desta forma só terá significado ao se

garantir que as reações que envolvem os reagentes ou os produtos ocorrem com cinéticas muito mais lentas.

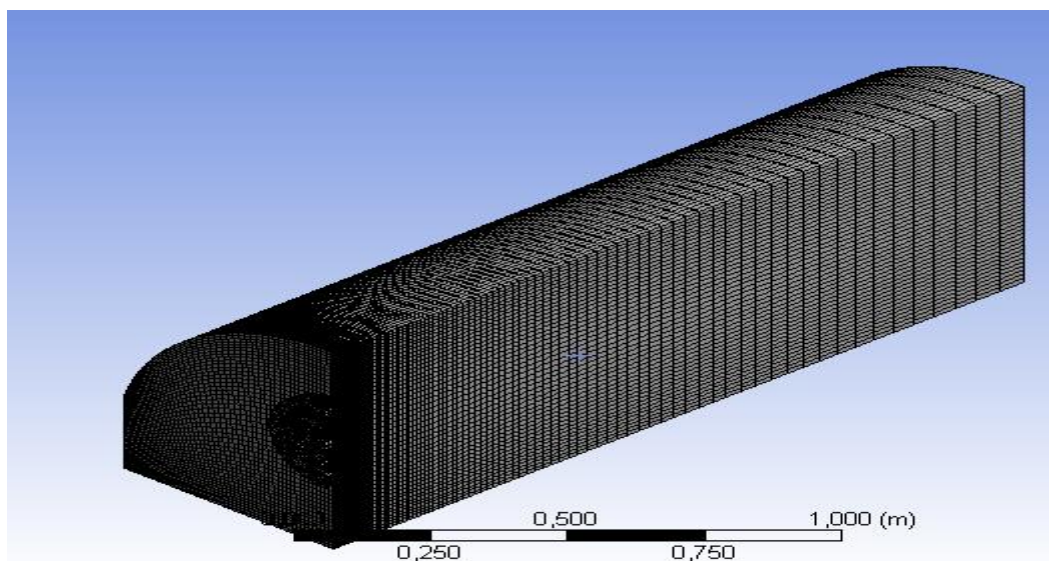
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos, neste presente trabalho. Para cada análise, serão apresentadas os resultados das simulações numéricas encontradas para os seguintes casos:

- Estudo da independência de malha
- Simulação da combustão convencional (estratégia para ignição)
- Simulação da combustão sem chama visível

Após análise da física do problema apresentado, pensou-se numa malha mista, de forma estruturada na extensão da câmara de combustão, e não estruturada, devido à complexidade da geometria, na parte do queimador. Optou-se por elementos hexaédricos e tetraédricos. Foi adicionado os elementos de coordenadas cilíndricas, simetria e topologia virtual para melhorar a qualidade da malha. Também foi colocado durante a confecção da malha os nomes das faces para reconhecimento automático do *software*. Ela pode ser visualizada na Figura 7.

Figura 7 – Malha proposta para a modelagem



Fonte: Próprio autor.

Foram geradas quatro malhas com essas propriedades, onde estas malhas possuem funções que refinam a região mais próxima ao queimador, onde ocorrem boa parte dos fenômenos de interesse. Como é desejada uma malha mais refinada nesta região, no restante da geometria, a malha pode ser menos refinada para exigir menos tempo computacional. O resultado do estudo de independência de malha pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do estudo de malhas

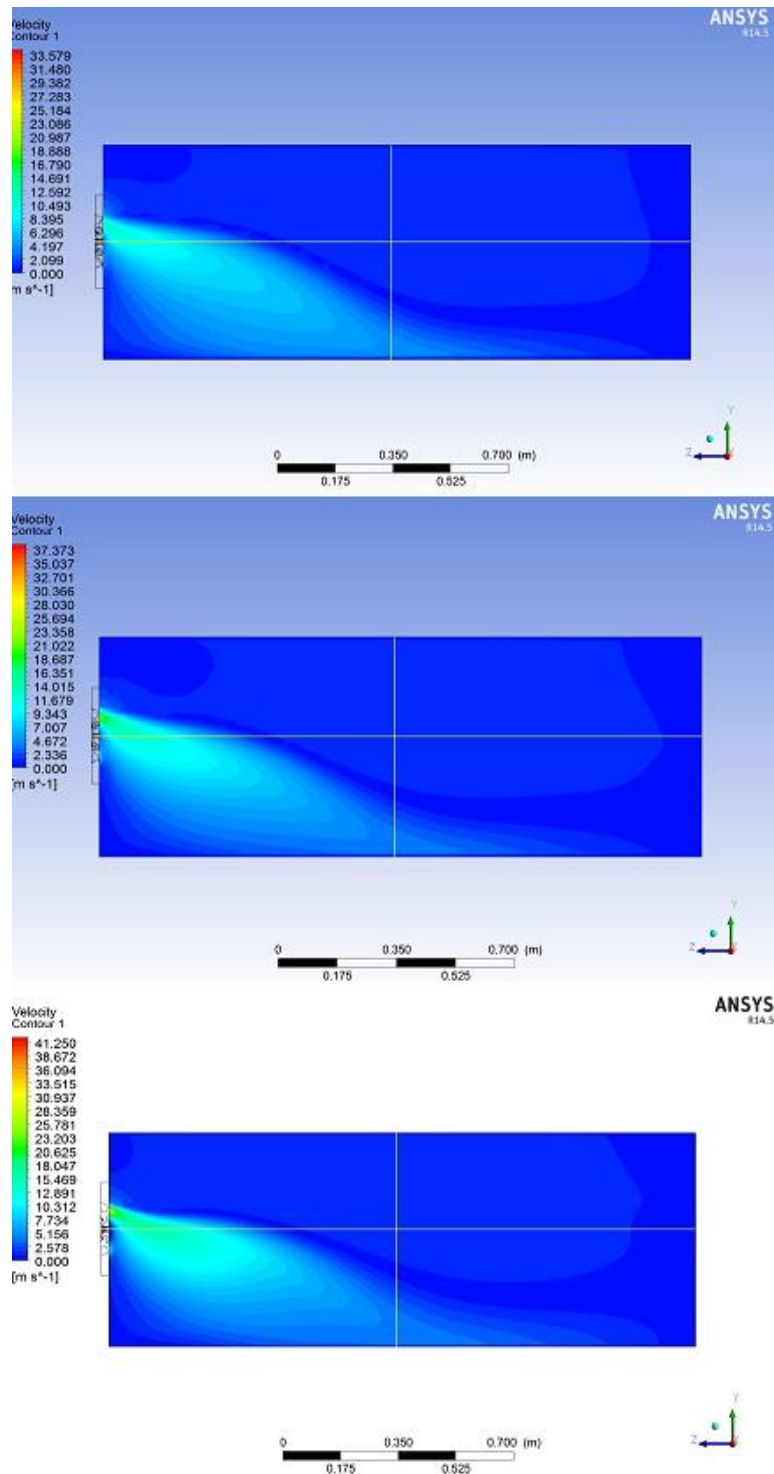
Malha	0 - Grossa	1 - Média	2 - Fina	3 - Finíssima
Número de nós	47666	83758	234132	866518
Número de elementos	51112	85615	227608	860854
Tamanho do elemento [mm]	50	30	10	7
Assimetria	0,80	0,81	0,82	0,82
Tempo de simulação [h]	1,5	3	7	14
Número de iterações	10000	10000	10000	10000

A malha definida para trabalho foi a malha 2 - fina, visto que as outras malhas não variaram muito quanto a velocidade em virtude do maior ou menor refino de malha. Nos experimentos, conseguiu-se obter a propriedade de assimetria dentro dos parâmetros aceitáveis, e constata-se que a independência de malha foi alcançada.

Para uma análise detalhada de completa da independência de malha, toma-se para comparação os perfis de velocidade, no plano axial de simetria da câmara de combustão, para as malhas 1,2 e 3. Também toma-se os valores locais para a

velocidade referentes a linhas determinadas no plano axial e radial, como ilustra a Figura 8.

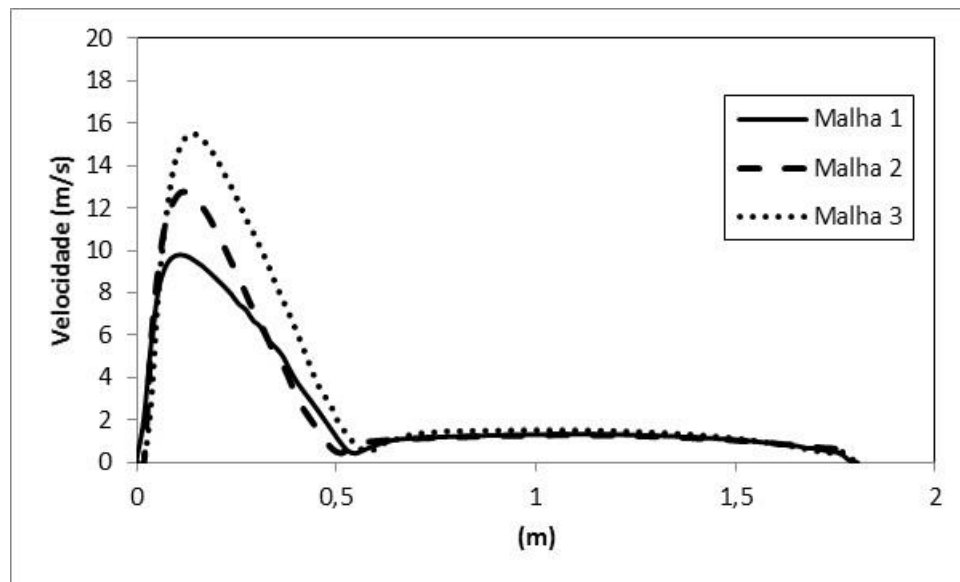
Figura 8 – Perfis de velocidade no plano axial de simetria.



Fonte: Próprio autor

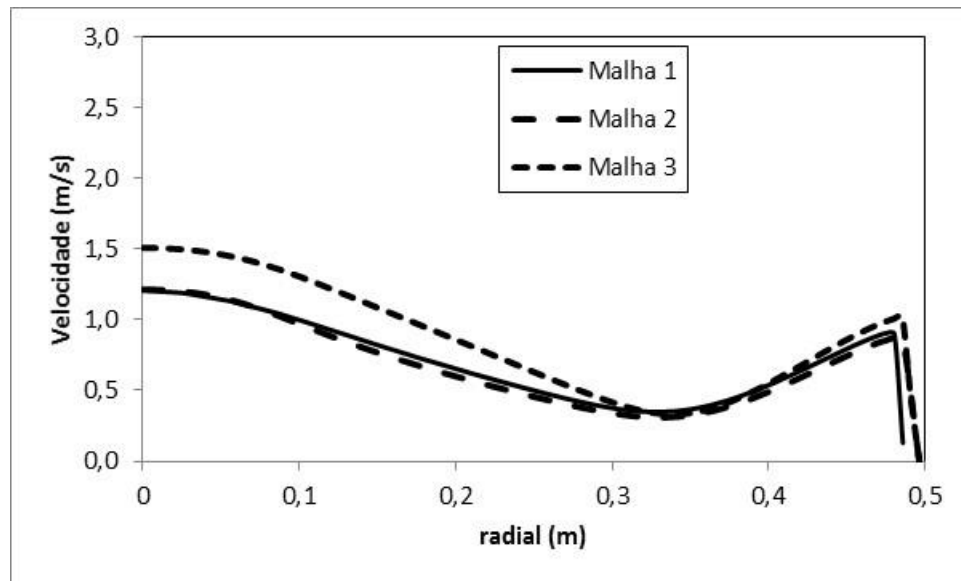
Como pode-se perceber, pela comparação dos valores de velocidades nas linhas tomadas axialmente e radialmente, os perfis possuem formatos com leves diferenças, caracterizando a chamada independência de malha, Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 – Comparação das velocidades na direção axial



Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Comparação das velocidades na direção radial



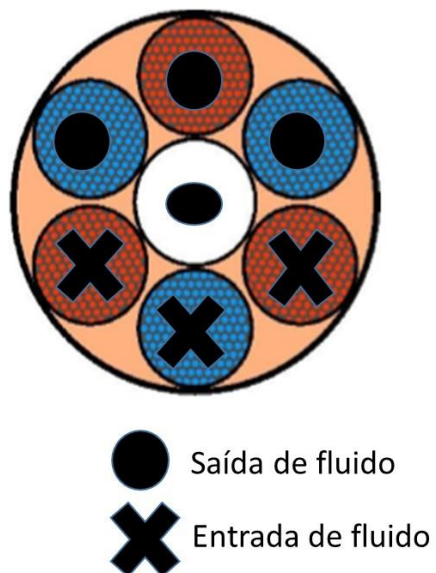
Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos com a simulação da combustão foram divididos para três casos diferentes, sendo eles:

- Caso I: Injeção inferior
- Caso II: Injeção superior
- Caso II: Intercalado

Para o Caso I, tem-se o queimador configurado com injeção pela parte inferior, conforme mostrado na Figura 11.

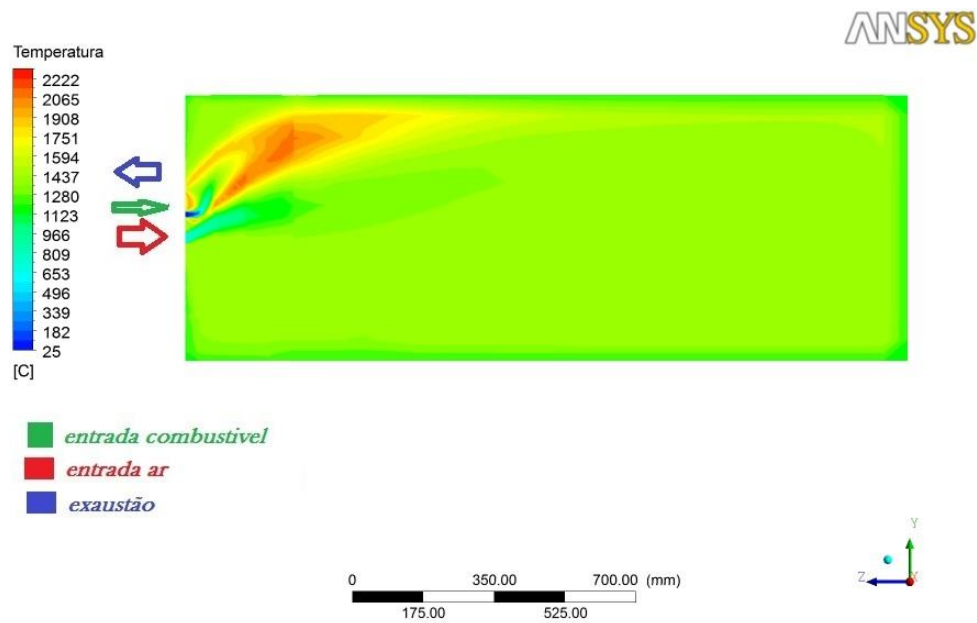
Figura 11 – Configuração do queimador Caso I em vista frontal



Fonte: Próprio autor

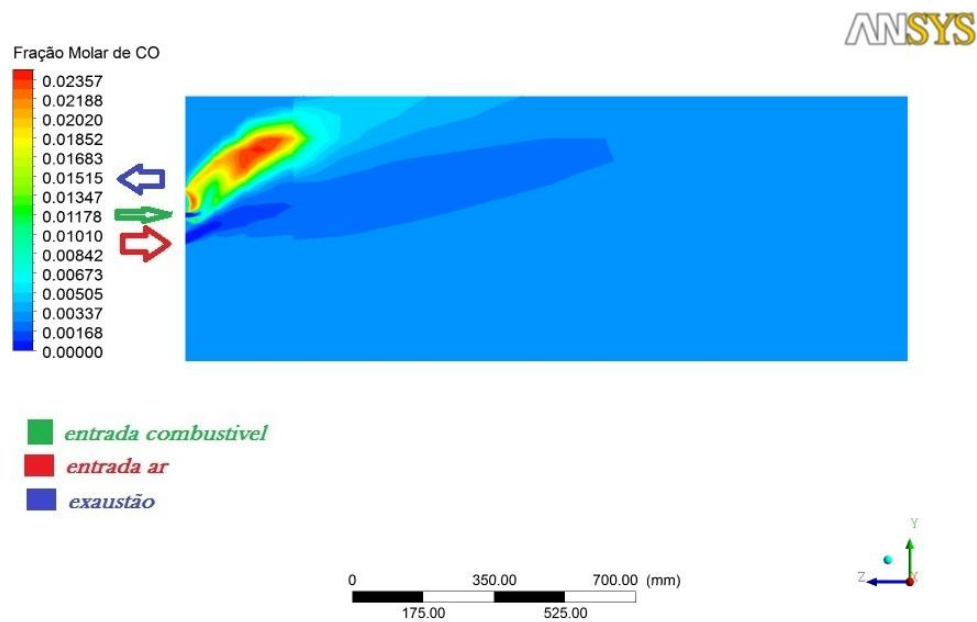
Para esta configuração, é possível verificar que o campo de temperatura se encontra mais deslocado para a parte superior da câmara, sendo melhor observado quando comparamos a distribuições de temperatura (Figura 12) e concentração de CO (Figura 13), visto que a presença de forte concentração de CO na região de alta temperatura indica zona de reação.

Figura 12 – Campo de Temperaturas (Caso I)



Fonte: Próprio autor

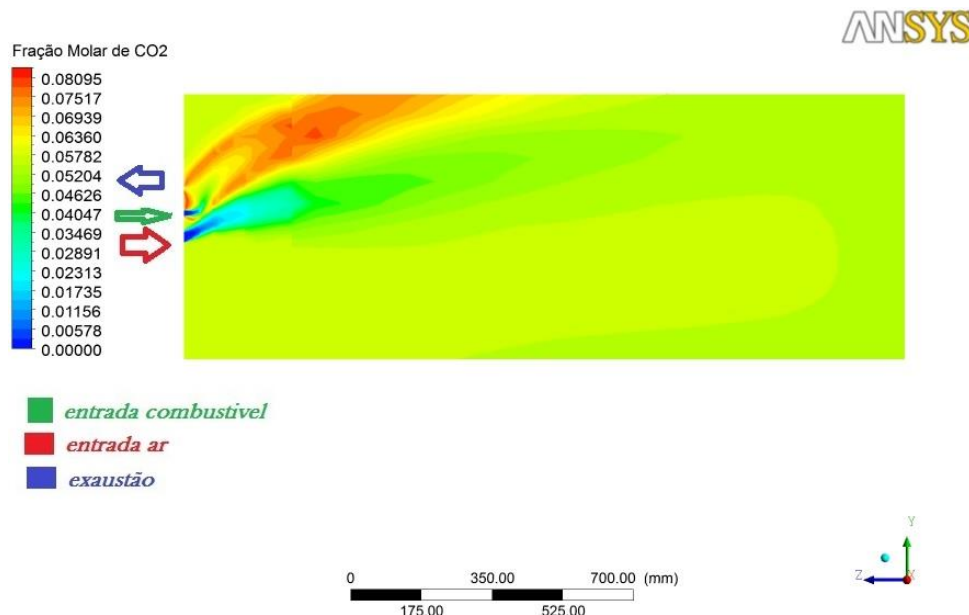
Figura 13 - Distribuição fração molar de CO (Caso I)



Fonte: Próprio autor

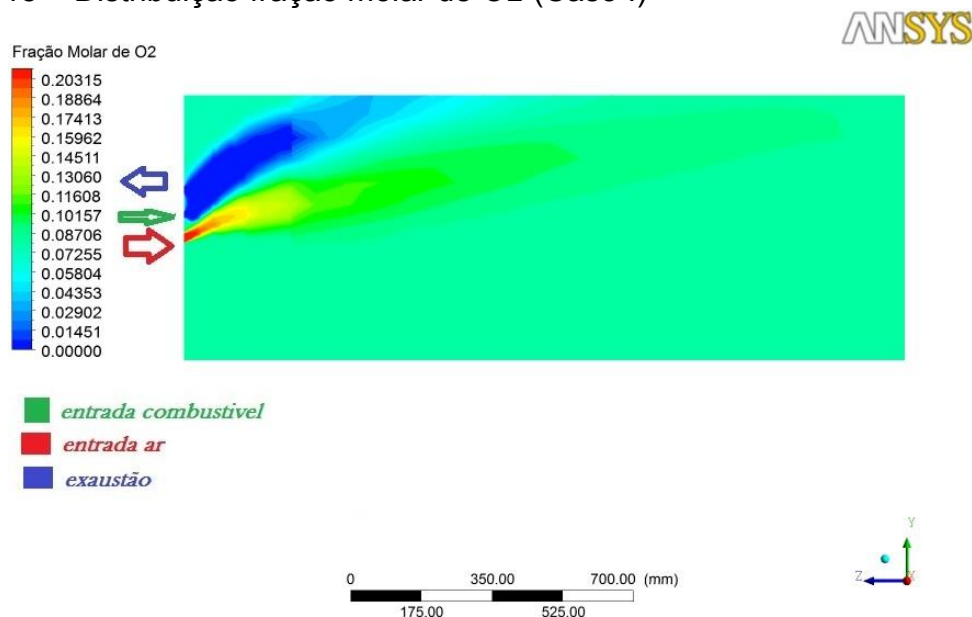
Também é possível observar pela distribuição da concentração de CO_2 (Figura 14), que se encontra distribuída por uma boa parte da extensão da câmara, podendo-se assim inferir que seja indícios da combustão sem chama visível, dada as características deste processo. Tem-se também na Figura 15 o perfil de concentração de O_2 , na qual é possível observar a distribuição da espécie, bem como a sua baixa concentração na câmara de combustão, que são características do regime de combustão sem chama visível. Na, Figura 16, tem-se também o perfil de temperatura juntamente com as linhas de corrente permitindo melhor entendimento do processo.

Figura 14 – Distribuição fração molar de CO_2 (Caso I)



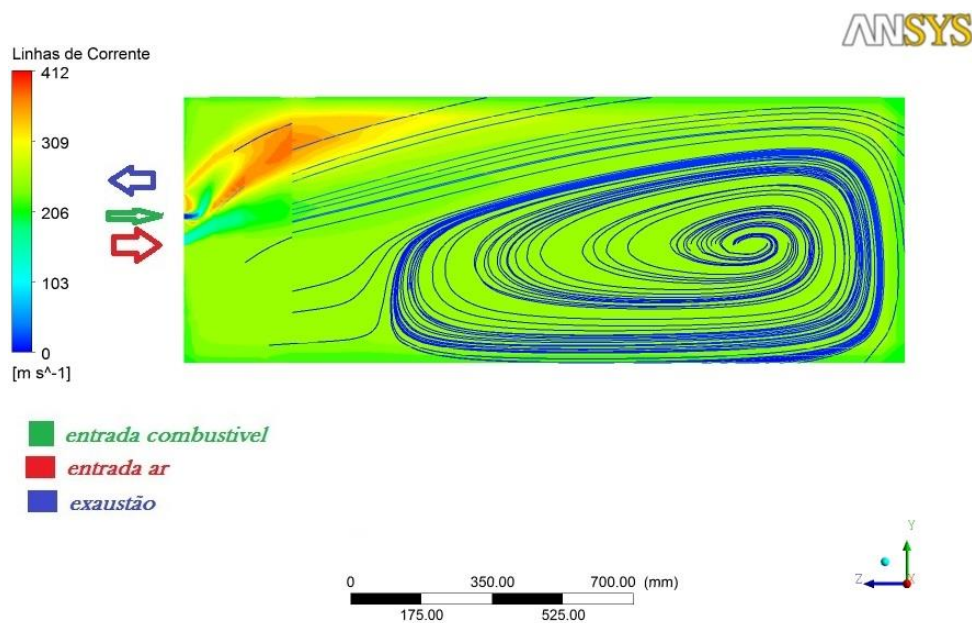
Fonte: Próprio autor

Figura 15 – Distribuição fração molar de O₂ (Caso I)



Fonte: Próprio autor

Figura 16 – Perfil de temperatura e linhas de corrente (Caso I)



Fonte: Próprio autor

Para, o Caso II, tem-se o queimador configurado com injeção superior, como mostra a Figura 17, a seguir.

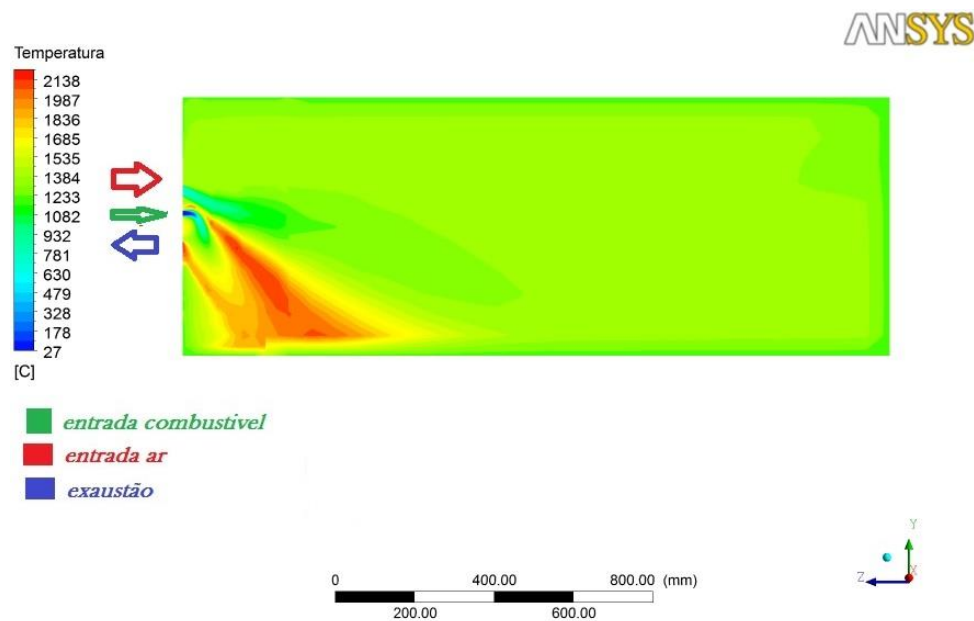
Figura 17 – Configuração do queimador Caso II – Injeção superior



Fonte: Próprio autor

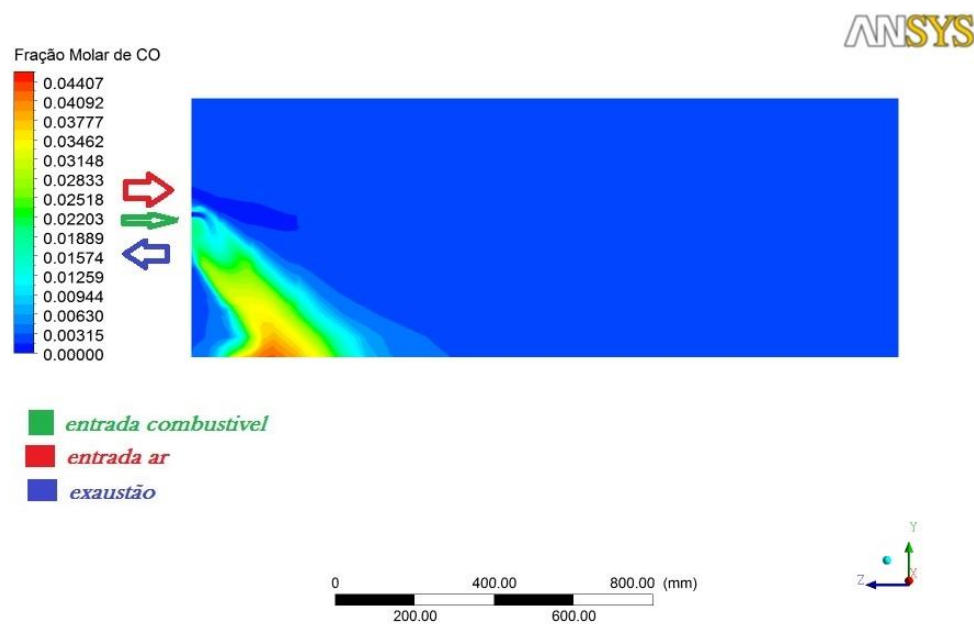
A zona de reação pode ser percebida pela presença marcante do CO local, caracterizando a zona de combustão, quando compara-se juntamente com o perfil de temperatura (Figuras 19 e 18). A concentração de CO_2 também encontra-se deslocada para na parte inferior da câmara de combustão (Figura 20). Já para o O_2 , este se encontra mais diluído na extensão da câmara (Figura 21). Nesta configuração nota-se uma zona de recirculação deslocada mais para o final da câmara de combustão, visto pelas linhas de corrente (Figura 22). Elas demonstram, como o próprio escoamento devido a recirculação, confina a região de reações química no canto inferior da câmara de combustão. Comparado com as outras configurações verifica-se a formação de uma bolha de recirculação.

Figura 18 – Campo de Temperaturas (Caso II)



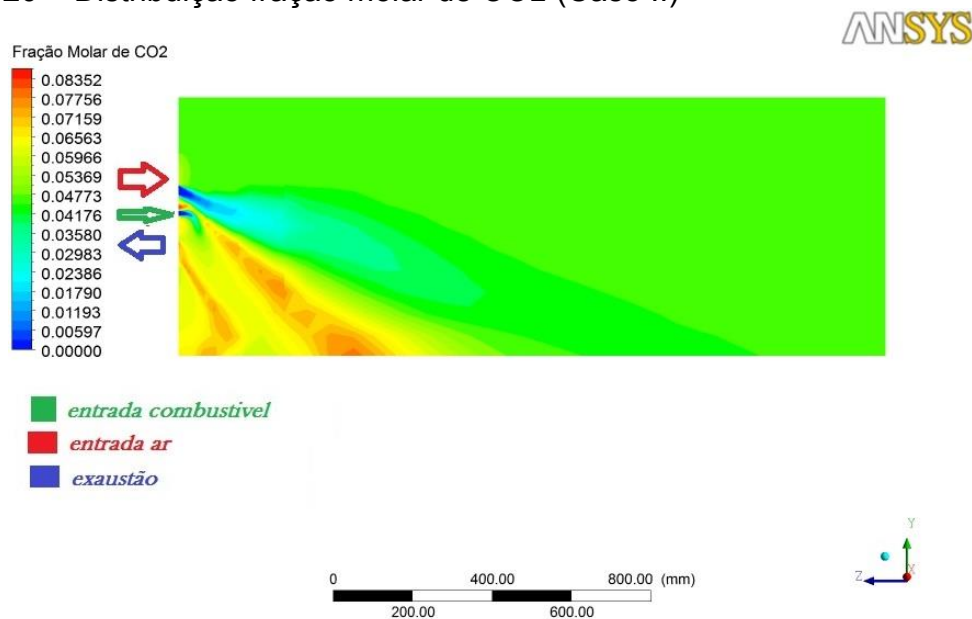
Fonte: Próprio autor

Figura 19 – Distribuição fração molar de CO (Caso II)



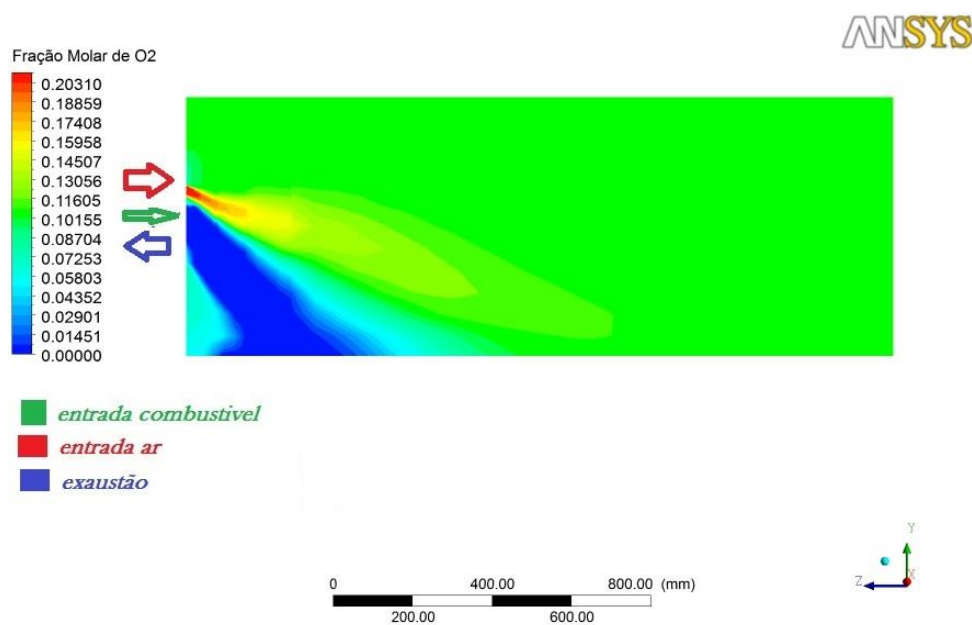
Fonte: Próprio autor

Figura 20 – Distribuição fração molar de CO₂ (Caso II)



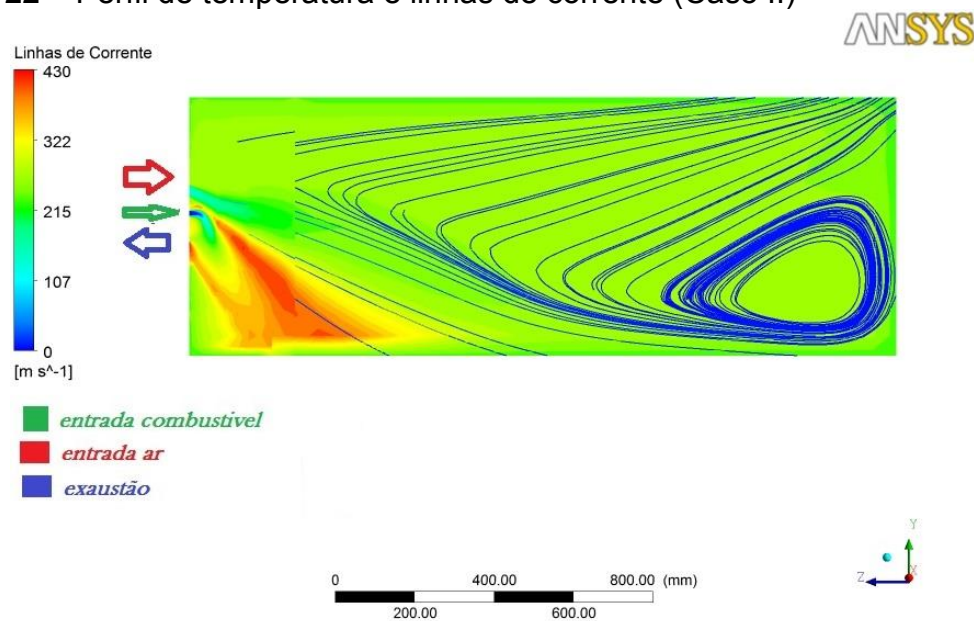
Fonte: Próprio autor

Figura 21 – Distribuição fração molar de O₂ (Caso II)



Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Perfil de temperatura e linhas de corrente (Caso II)



Fonte: Próprio autor

Na última configuração, Caso III, tem-se a injeção intercalada, como mostra-se na Figura 23.

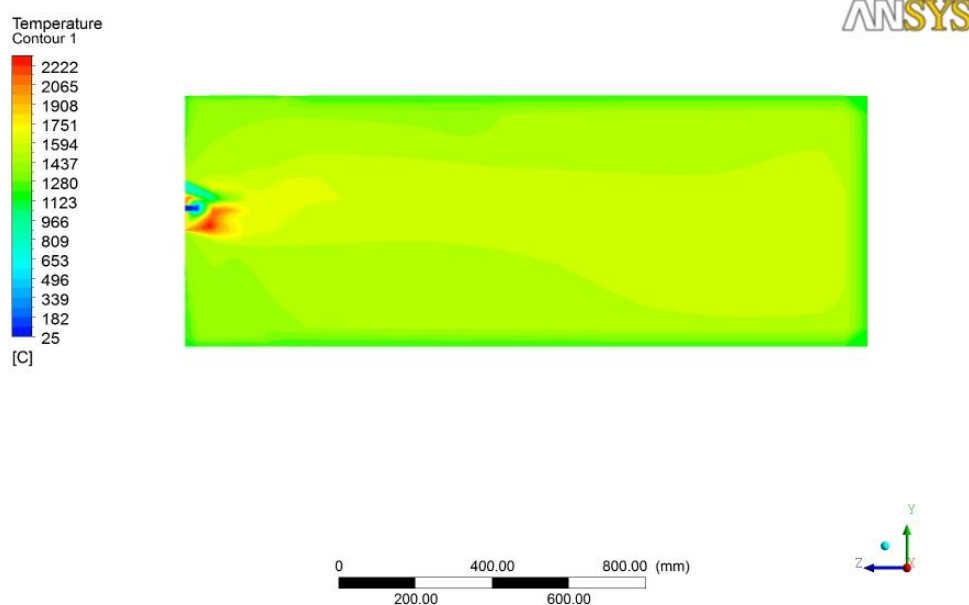
Figura 23 – Configuração do queimador Caso III – Injeção intercalada



Fonte: Próprio autor

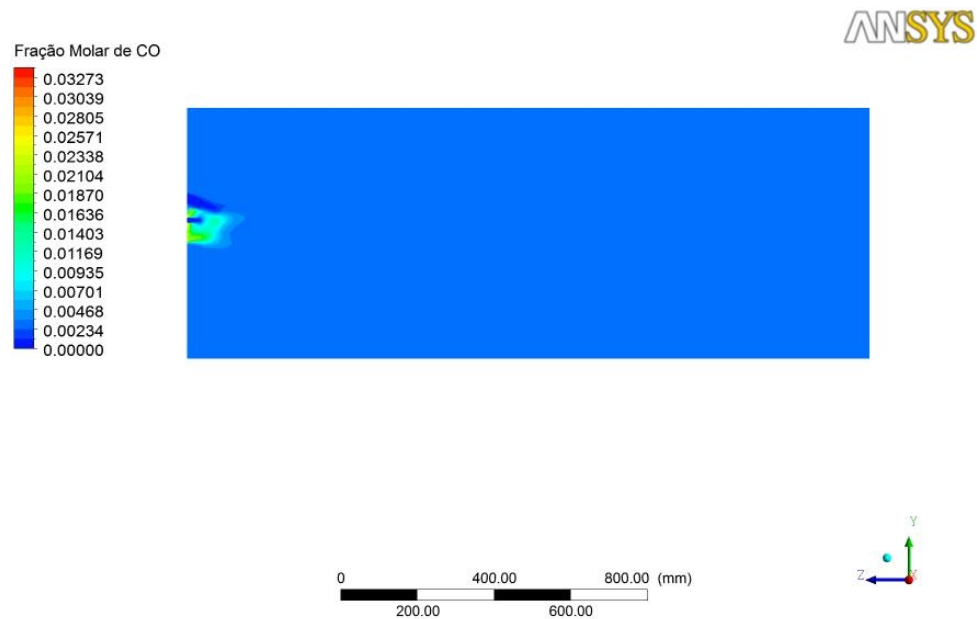
Neste modo, verifica-se uma distribuição de temperatura mais atenuada por quase toda a extensão da câmara, onde o campo de temperaturas indicado na Figura 24, sendo isto um indicio da combustão sem chama visível. As concentrações de CO próximas a região do queimador caracterizam uma região de intensas reações químicas (Figura 25). Percebe-se que devido a distribuição das concentrações de CO e O_2 , que estas espécies estão mais diluídas na extensão da câmara (Figuras 26 e 27), ocasionadas em boa parte pelas duas zonas de recirculação presentes do meio para o final da câmara de combustão, como visto na Figura 28, que ajudam na dispersão dos reagentes no interior da câmara. E finalmente, observando a concentração baixa de oxigênio na extensão da câmara, pode ser este também, um indicio de combustão sem chama visível.

Figura 24 – Campo de Temperaturas (Caso III)



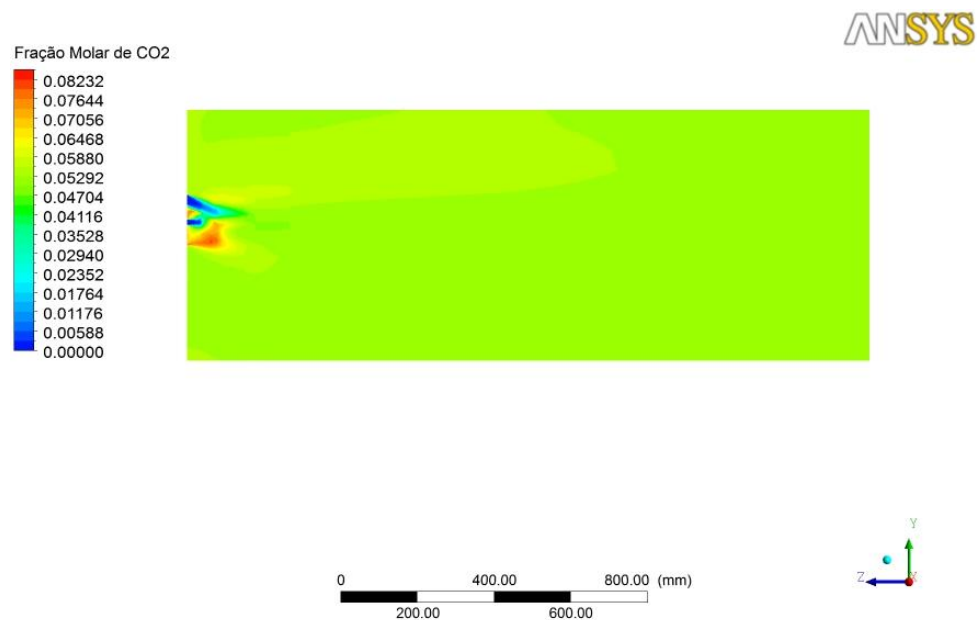
Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Distribuição fração molar de CO (Caso III)



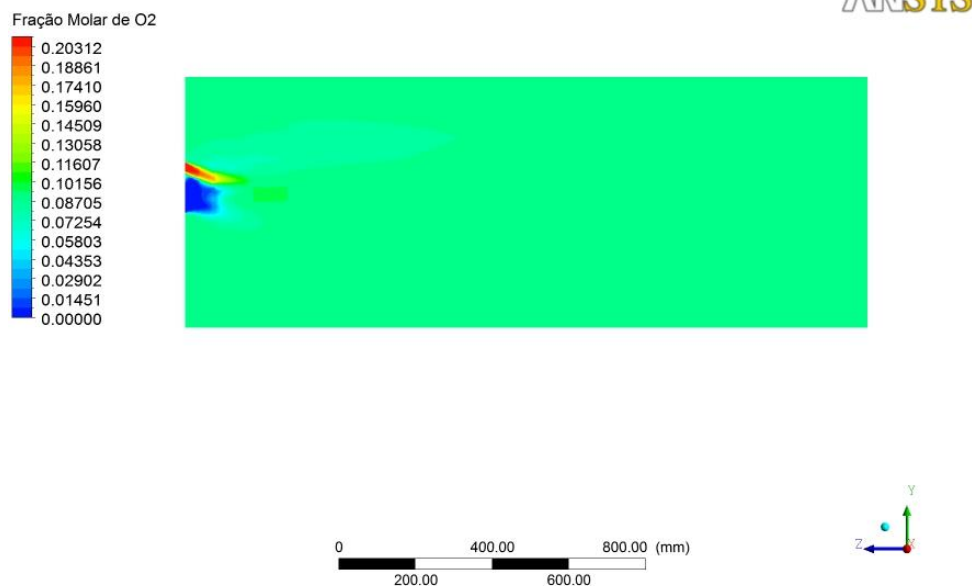
Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Distribuição fração molar de CO2 (Caso III)



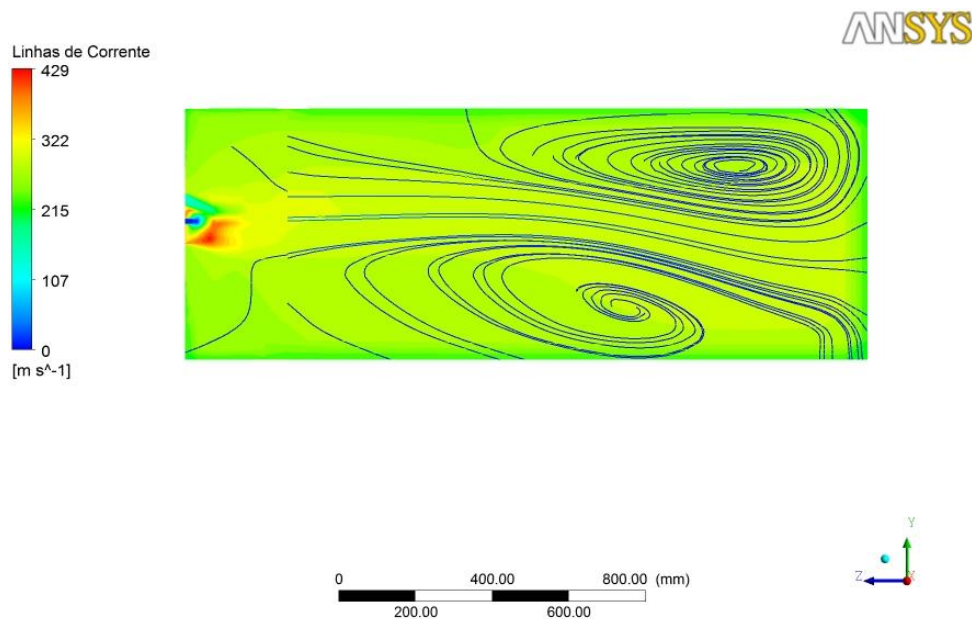
Fonte: Próprio autor

Figura 27 – Distribuição fração molar de O₂ (Caso III)



Fonte: Próprio autor

Figura 28 – Perfil de temperatura e linhas de corrente (Caso III)



Fonte: Próprio autor

É preciso ressaltar que todas as simulações foram feitas para o regime estacionário, não sendo assim possível verificar o comportamento das espécies e

da câmara com as trocas nos bocais de injeção a cada ciclo de tempo. Esta característica influenciará fortemente nos campos de temperatura e distribuição das concentrações das espécies.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Com o presente trabalho realizado, os objetivos principais foram alcançados de maneira satisfatória, conseguindo-se produzir uma malha com qualidade aceitável e realizar as simulações com combustão para o modelo proposto. Os resultados indicam que as hipóteses e modelos adotados são condizentes para o caso tratado. Os modelos de turbulência, cinética química e combustão conseguem dar um bom suporte a modelagem dos fenômenos envolvidos.

Os *softwares* empregados obtiveram bons resultados frente ao comportamento do modelo, seja para a produção da geometria, confecção da malha, ou modelagem de fenômenos físico-químicos em combustão. As concentrações de temperatura encontradas, principalmente para o Caso III, indicam forte indicio de que é possível obter com a simulação do modelo proposto o regime de combustão sem chama visível e prever seu comportamento para esta câmara e também no que desrespeito a espécies envolvidas.

Quanto a otimização da câmara, em vista dos resultados apresentados, fica evidente que a melhor configuração, para o acoplamento entre câmara e queimador, seja feito na configuração intercalada do queimador, que possibilitará um modo de operação mais eficiente e possivelmente aprimoramento dos resultados. De forma factível, este trabalho será melhor corroborado por uma validação experimental, podendo assim comparar-se os resultados obtidos com as simulações, daqueles obtidos experimentalmente no modelo real.

6.1. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Assim, sugere-se primeiramente que sejam realizadas as validações do modelo proposto, a partir de resultados experimentais. Propõe-se também, que seja inserido no modelo numérico, os trocadores de calor, de modo a dar

continuidade ao projeto. Sendo necessário assim uma revisão do refino de malha e dos modelos tratados, visto que poderá ser usado modelos ainda mais robustos.

Ainda no modelo numérico, é preciso inserir no modelo proposto a modelagem de radiação, já que este é um dos principais mecanismos de troca de calor no interior da câmara de combustão. Pode-se pensar também em se trabalhar com modelos mais detalhados de cinética química. E por fim, realizar a modelagem e simulação para o regime transiente, o que trará resultados ainda mais consideráveis. Sendo então que estas três últimas sugestões podem impactar diretamente na melhora do modelo proposto.

REFERÊNCIAS

ANSYS Inc., **User's Guide Manual**. Version 14.0. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, 2011.

ANSYS Inc., **FLUENT Theory Guide**. Version 13.0. Lebanon, NH: 2009.

ANSYS Inc., **FLUENT User's Guide**. Version 13.0. Lebanon, NH: 2011.

ARGHODE V.K., GUPTA A.K., **Effect of flow field for colorless distributed combustion (CDC) for gas turbine combustion**, Applied Energy, 87, 1631-1640, 2010.

BANCO MUNDIAL, **Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática**. São Paulo: Editora UNESP, 440p.: il, 2010.

BARSKY, R. B., KILIAN, L., **Oil and the Macroeconomy since the 1970s**, Journal of Economic Perspectives, Vol. 18, pp. 115-134. 2004.

CARVALHO, J. A., **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Ed. da UFSC 2007.

CAIN, B., ROBERTSON, T., NEWBY, J., **The Development and Application of Direct Fuel Injection Techniques for Emissions Reduction in High Temperature Furnaces**, Proceedings of the 2nd International Seminar on High Temperature Combustion, Estocolmo, Suécia. 2000.

CAVALIERE, A., JOANNON M., **Mild Combustion, Progress in Energy and Combustion Science**, Vol. 30, pp. 329-366. 2004.

CAVALIERE, A., de JOANNON, M., RAGUCCI, R., **Highly preheated lean combustion**. In: Dunn-Derek, D. (ed.) Lean combustion: technology and control. Oxford, UK, Elsevier, 55-94. 2008.

DALLY, B. B., KARPETIS, A. N., BARLOW, R. S., **Structure of turbulent non-premixed jet flames in a diluted hot coflow**. Proceedings of the Combustion Institute, 29, pp. 1147-1154. 2002.

DANON, B., **Furnaces with multiple flameless combustion burners**, PhD Thesis, TechnischeUniversiteit Delft, Germany. 2011.

FOX, R. W., MCDONALDO, A. T., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6ª.edição Rio de Janeiro LTC, 2006.

FERZIGER, J. H., PERIC, M., **Computational Methods for Fluid Dynamics**. New York: Berlin Heidelberg, 3rd. 7, 8, 78. 2002.

HE, Y., **Flameless combustion of natural gas in the SJ/WJ furnace**, PhD thesis, Queen's University (Canada), 2008.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 643 p., 2008.

JOANNON M, et al. **Mild combustion: process features and technological constraints**, Combustion Science and Technology, 153, 33-50, 2000.

KATSUKI M, HASEGAWA T, **The science and technology of combustion in highly preheated air**, Proceedings of the Combustion Institute, 27, 3135-3146, 1998.

KIM, P.J., et al. **Comparison of Different Global Reaction Mechanisms for MILD Combustion of Natural Gas**, Volume 180, Issue 4, 2008.

KRISHNAMURTHY, N., PAULO, P. J., BÇASIAK W., **Studies on Low-Intensity Oxy-Fuel Burner**, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 32, pp. 3139-3146. 2009.

LACAVA, P.T., **Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos**. São José dos Campos. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000.

LI P., MI J., DALLY B.B., WANG F., WANG L., LIU Z., CHEN S., ZHENG C., **Progress and recent trend in MILD combustion**, Science China Technology, Science, 54, pp. 255-269, 2011.

MALALASEKERA, W., VERSTEEG, H.K. **An introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method**. Prentice Hall, 1995.

MALISKA, C. R., **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 472 p., 2004.

MANCINI M., SCHWÖPPE P., WEBER R., ORSINO S., **On Mathematical Modeling of Flameless Combustion, Combustion and Flame**, Vol. 150, pp. 54-59, 2007.

MORITA M., TANIGAWA T., **Project to develop high performance industrial furnaces**, Proceedings of the 2nd International Seminar on High Temperature Combustion, Stockholm, Sweden, 2000.

MÚNERA, B.A.H., ARRIETA, A.A.A., SIERRA, F.J.C., **Modelos para el Estudio Fenomenológico de la Combustión sin Llama**. 63 con Simulación Numérica, Revista Ingeniería e Investigación, 29(2):70-76, Medellín, Agosto, 2009.

NEWBY J., **The Development and Application of Direct Fuel Injection Techniques for Emissions Reduction in High Temperature Furnaces**, 2000.

PARENTE A., SUTHERLAND J.C., DALLY B.B., TOGNOTTI L., SMITH P.J., **Investigation of the mild combustion regime via principal component analysis**, Proceedings of the Combustion Institute, 33, 3333-3341, 2011.

PETERS, N. **Turbulent combustion**. Cambridge University Press, 2000.

PLESSING T., PETERS N., WÜNNING J.G., **Laser optical Investigation of highly preheated combustion with strong exhaust gas recirculation**, Proceedings of the Combustion Institute, 27, 3197-3204, 1998.

SZEGÖ, G. G., DALLY, B. B., NATHAN, G. J. and CHRISTO, F. C., **Design optimisation of a MILD combustion furnace based on CFD modelling**, Australia Combustion Symposium and the 8th Aust. Flame Days, Monash University, Paper ID: P047, 2003.

TANAKA, R., **New Progress of Energy Saving Technology Toward the 21st Century**, Frontier of Combustion & Heat Transfer Technology, Proceedings of 11th IFRF Members Conference, Noordwijkerhout, Holanda. 1995.

TSUJI H., GUPTA A.K., HASEGAWA T., KATSUKI M., KISHIMOTO K., MORITA M., **High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction**, CRC Press, UK, 2003.

VERÍSSIMO A.S., ROCHA A.M.A., COSTA M., **Operational, combustion, and emission characteristics of a small-scale combustor**, Energy & Fuels, 25, 2469-2480, 2011.

VERÍSSIMO A.S., ROCHA A.M.A., COSTA M., **Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor**, Experimental Thermal and Fluid Science, <<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.05.015>>, 2012a.

VERÍSSIMO A.S., et al. **Numerical simulation of a small-scale mild combustor**, Journal of Physics: Conferences Series, 2012b.

ZIEBA, A., PACULA, A., DRELINKIEWICZ, A. **Energy Fuel**. v. 24, p. 634. 2010.

WÜNNING J.A., WÜNNING J.G., **Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation**, Progress in Energy and Combustion Science, 23, 81-94, 1997

YASUDA, T., UENO C., **Dissemination Project of Industrial Furnace Revamped with HTAC**, The Second International Seminar on High Temperature Combustion in Industrial Furnace, 2000.

YUAN J., NARUSE I., **Effects of Air Dilution on Highly Preheated Air Combustion in a regenerative Furnace**, Energy & Fuels, Vol.13, No.1, pp99-104, 1999.