



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Aeroespacial**

**MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DE UM  
SISTEMA DE IGNIÇÃO DO TIPO TOCHA BASEADO  
NA COMBUSTÃO  $\text{CH}_4/\text{O}_2$**

**Autor: Joel Alves Costa Filho  
Orientador: Domenico Simone**

**Brasília, DF  
2017**



**JOEL ALVES COSTA FILHO**

**MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DE UM  
SISTEMA DE IGNIÇÃO DO TIPO TOCHA BASEADO  
NA COMBUSTÃO CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial.

Orientador: (Dr, Domenico Simone)

**Brasília, DF  
2017**

### **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

FILHO, Joel.

Modelagem e análise numérica de um sistema de ignição do tipo tocha baseado na combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  / Joel Alves Costa Filho. Brasília: UnB, 2017.

Monografia Engenharia Aeroespacial – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2017. Orientação: Dr: Domenico Simone.

1. Propulsão. 2. Sistemas de ignição. 3. Combustão I. Simone, Domenico. II. Modelagem e análise numérica de um sistema de ignição do tipo tocha baseado na combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ .

CDU Classificação



**MODELAGEM E ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SISTEMA DE IGNIÇÃO DO TIPO  
TOCHA BASEADO NA COMBUSTÃO CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>**

**Joel Alves Costa Filho**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Prof. (Dr): Domenico Simone, UnB/ FGA**  
Orientador

---

**Prof. (Dr): Olexiy Shynkarenko, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

---

**Prof. (Dr): Paolo Gessini, UnB/ FGA**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2017

Esse trabalho é dedicado aos meus pais que sempre me brindaram com o melhor presente possível, o conhecimento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em especial a Deus, pois tudo que tenho e tudo que sou é obra exclusiva dEle.

Ofereço meus sinceros agradecimentos aos meus pais que por meio de todo o amor e carinho que eles têm por mim, me proporcionaram todas as oportunidades possíveis para que eu consiga alcançar todos os meus sonhos e objetivos. Também agradeço aos meus irmãos e familiares, em especial meus avôs, por sempre me apoiarem em todos os momentos.

Não poderia deixar de agradecer a minha namorada que me ensinou o valor do amor e sempre esteve comigo independente do momento. Muito obrigado por dividir o fardo da vida comigo, tornando-a mais leve.

Agradeço também aos meus amigos por todo o suporte e ao meu orientador por ter me aceitado como o seu aluno de TCC e ter me guiado com muita paciência em todos os momentos.

Deixo aqui meu muito obrigado a todos!



“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo. Mas qualquer um pode recomeçar e fazer um novo fim”.

(Chico Xavier)

## RESUMO

Os foguetes utilizam de sistemas propulsivos para gerar a força necessária requerida pela missão. Essa força é obtida, na grande maioria dos foguetes, por meio da propulsão química, a qual usa reações químicas para aumentar a energia interna do gás e essa energia é, então, transformada em energia cinética pela tubeira. Para ocorrer a combustão é necessário um ignitor para proporcionar a temperatura de ignição dos propelentes. Com o intuito de aprimorar os sistemas de ignição necessita-se de vários testes experimentais que tem um custo elevado. O Fluido Dinâmico Computacional (CFD) é largamente empregada hoje em dia para a redução dos gastos. Utilizando simulações numéricas pode-se prever o comportamento do motor que está sendo estudado e, assim, reduzir o número final de protótipos a serem desenvolvidos. O presente trabalho analisa numericamente a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  dentro do ignitor do tipo tocha produzido pelo grupo de propulsão da UnB-FGA. Para tanto, foram realizados cálculos preliminares no software CEA<sup>®</sup> e simulações no Fluent Ansys<sup>®</sup>. Os valores de temperaturas obtidos nos primeiros cálculos divergiram dos valores experimentais, mas os cálculos foram importantes para demonstrar o comportamento das temperaturas e das concentrações das espécies químicas e, então, determinar parâmetros iniciais para a simulação. Então, o ignitor foi simulado para diferentes valores de razões equivalentes, chegando à conclusão que quanto maior o  $\Phi$ , mais elevado é a eficiência da combustão e o fluxo de calor, entretanto  $\Phi$  menores apresentam maiores temperaturas e respeitam a propriedade de auto resfriamento do ignitor.

**Palavras-chave:** propulsão, sistemas de ignição, combustão, simulações numéricas.

## ABSTRACT

The rockets use propulsion systems to generate the required thrust for the mission. This thrust is obtained, for the almost all rockets, by chemical propulsion system, which uses chemical reactions to increase the internal energy of the gas, and this energy is then transformed into kinetic energy by the nozzle. It is necessary an ignitor to produce the combustion. The ignitor provides the ignition temperature of the propellants. To improve the ignition systems is needed many experimental tests that has high costs. The Computational Fluid Dynamic (CFD) is widely used nowadays to reduce the costs. The present work analyses the combustion  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  numerically into the torch ignitor developed by the propulsion group of UnB-FGA. For this, preliminary calculations were done by the software CEA<sup>®</sup> and simulations have been made by the Fluent Ansys<sup>®</sup>. The obtained values of temperature were different in comparison to the experimental values, but the calculations were important to show the behavior of the temperatures and the concentrations of the chemical species and then to determine the input parameters for the future simulation. Then, the ignitor has been simulated for different values of equivalent ratio. It was concluded that as bigger as the  $\Phi$ , the efficient of combustion and heat flux are higher, however  $\Phi$  smaller give the highest temperature and the self-cooling is respected by the minors  $\Phi$ .

**Keywords:** propulsion, ignition systems, combustion, numerical simulations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de inflamabilidade do metano/oxigênio/nitrogênio .....	29
Figura 2. Esquema químico reduzido proposto por Westbrook e Dryer (WD).....	30
Figura 3. Esquema químico reduzido proposto por Jones e Lindstedt (JL).....	31
Figura 4. Esquema químico reduzido JL com as reações de dissociação (JL-R) .....	32
Figura 5. Estrutura do primeiro ignitor do tipo tocha.....	34
Figura 6. Estrutura atual do ignitor modelado no CAD .....	35
Figura 7. Visão compacta do ignitor do tipo tocha.....	36
Figura 8. Visão detalhada do ignitor do tipo tocha .....	37
Figura 9. Visão detalhada do ignitor do tipo tocha em outro plano.....	37
Figura 10. Temperaturas para diferentes pressões na câmara de combustão .....	41
Figura 11. Temperaturas para diferentes pressões na saída da tubeira .....	42
Figura 12. Concentrações de O <sub>2</sub> para diferentes pressões na câmara de combustã. .....	43
Figura 13. Concentrações de O <sub>2</sub> para diferentes pressões na saída da tubeira.....	43
Figura 14. Concentrações de CO <sub>2</sub> para diferentes pressões na câmara de combustão.....	44
Figura 15. Concentrações de CO <sub>2</sub> para diferentes pressões na saída da tubeira ....	45
Figura 16. Concentrações de H <sub>2</sub> O para diferentes pressões na câmara de combustão.....	46
Figura 17. Concentrações de H <sub>2</sub> O para diferentes pressões na saída da tubeira ....	46
Figura 18. Concentrações de H <sub>2</sub> para diferentes pressões na câmara de combustão. .....	47
Figura 19. Concentrações de H <sub>2</sub> para diferentes pressões na saída da tubeira.....	48
Figura 20. Concentrações de CO para diferentes pressões na câmara de combustão. .....	48
Figura 21. Concentrações de CO para diferentes pressões na saída da tubeira.....	49
Figura 22. Concentrações de O para diferentes pressões na câmara de combustão. .....	49
Figura 23. Concentrações de O para diferentes pressões na saída da tubeira.....	50
Figura 24. Concentrações de H para diferentes pressões na câmara de combustão. .....	50

Figura 25. Concentrações de H para diferentes pressões na saída da tubeira.....	51
Figura 26. Concentrações de OH para diferentes pressões na câmara de combustão. .....	51
Figura 27. Concentrações de OH para diferentes pressões na saída da tubeira. ....	52
Figura 28. Temperatura e concentrações para uma pressão de 1,3 bar na câmara de combustão.....	53
Figura 29. Temperatura e concentrações para uma pressão de 1,3 bar na saída da tubeira .....	54
Figura 30. Temperatura e concentrações para uma pressão de 2 bar na câmara de combustão.....	54
Figura 31. Temperatura e concentrações para uma pressão de 2 bar na saída da tubeira .....	55
Figura 32. Temperatura e concentrações para uma pressão de 3 bar na câmara de combustão.....	55
Figura 33. Temperatura e concentrações para uma pressão de 3 bar na saída da tubeira .....	56
Figura 34. Temperatura e Concentrações na câmara de combustão para $\phi = 0,7$ ...	57
Figura 35. Temperatura e Concentrações na saída da tubeira para $\phi = 0,7$ .....	57
Figura 36. Comportamento esperado da região de interesse da combustão dentro do ignitor do tipo tocha .....	59
Figura 37. Comportamento esperado da região de interesse da combustão mais interna dentro do ignitor do tipo tocha .....	60
Figura 38. Comportamento esperado da região de interesse da combustão na zona de medições das temperaturas .....	61
Figura 39. Comportamento esperado da região de interesse da combustão mais interna na zona de medições .....	61
Figura 40. Eixo y na zona de medição .....	62
Figura 41. Valores esperados de temperaturas na zona de medição .....	63
Figura 42. Concentrações esperadas das espécies químicas na zona de medição .	64
Figura 43. Ignitor com o volume extraído .....	67
Figura 44. Ignitor com o volume extraído e com o cilindro presente .....	68
Figura 45. Malha A .....	69
Figura 46. Malha B .....	69
Figura 47. Malha C.....	69

Figura 48. Malha D.....	70
Figura 49. Temperatura para as quatro diferentes malhas na zona de medição .....	71
Figura 50. Velocidade na direção x para as quatro diferentes malhas.....	71
Figura 51. Velocidade na direção z para as quatro diferentes malhas .....	72
Figura 52. Concentração de CH <sub>4</sub> na zona de medição para as quatro diferentes malhas.....	72
Figura 53. Concentração de O <sub>2</sub> na zona de medição para as quatro diferentes malhas.....	73
Figura 54. Região de interesse da combustão para o modo Realizable .....	74
Figura 55. Região de interesse da combustão para o modo RNG .....	75
Figura 56. Velocidade na direção x para os dois modos, RNG e Realizable .....	75
Figura 57. Local onde os monitores foram colocados .....	76
Figura 58. Temperatura no monitor 0.....	77
Figura 59. Temperatura no monitor 1 .....	78
Figura 60. Região de interesse da combustão para os diferentes valores de $\Phi$ .....	80
Figura 61. Comportamento dos campos de temperaturas para os diferentes valores de $\Phi$ . .....	82
Figura 62. Campo de temperatura $T = 2700$ K para os diferentes valores de $\Phi$ .....	83
Figure 63. Evolução de $\Phi$ local para os diferentes valores de $\Phi$ total.....	84
Figure 64. Temperaturas para diferentes razões equivalentes na zona de medição. ....	85
Figura 65. Fluxo de calor na superfície para os diferentes valores de $\Phi$ .....	87
Figura 66. Campos de temperaturas versus fluxo de calor na superfície.....	87
Figura 67. Fluxo de calor máximo para os diferentes valores de $\Phi$ .....	88
Figura 68. Potência térmica total e estática .....	89
Figura 69. Eficiência da combustão total e estática .....	90
Figura 70. Potência térmica total e estática na região da saída do ignitor .....	91
Figura 71. Injeção do CH <sub>4</sub> para os diferentes valores de $\Phi$ .....	92
Figura 72. Injeção do O <sub>2</sub> para os diferentes valores de $\Phi$ .....	93
Figura 73. Concentrações de CO <sub>2</sub> para os diferentes valores de $\Phi$ .....	94
Figura 74. Concentrações de H <sub>2</sub> O para os diferentes valores de $\Phi$ .....	95
Figura 75. Concentrações de CO para os diferentes valores de $\Phi$ .....	96
Figura 76. Concentração das espécies químicas na região da saída do ignitor.....	97

Figura 77. Temperatura e concentrações das espécies químicas na saída calculados pelo Fluent.....	98
Figura 78. Temperatura e concentrações das espécies químicas na saída calculados pelo CEA .....	99

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Testes experimentais para o ignitor do tipo tocha .....	38
Tabela 2. Valores de pressão e Mach na saída para a mesma razão equivalente e diferentes pressões iniciais. ....	40
Tabela 3. Tabela do número de células para as quatro malhas.....	68
Tabela 4. Coordenadas dos monitores .....	77
Tabela 5. Relação de velocidades, fluxos de massas e razões equivalentes .....	79

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CAD	Desenho Assistido por Computador
CC	Câmara de Combustão
CEA	NASA <i>Chemical Equilibrium with Application</i>
CFD	Fluido Dinâmico Computacional
JL	Esquema químico reduzido proposto por Jones e Lindstedt
JL-R	Esquema químico reduzido JL modificado
KER	Razão da energia cinética
WD	Esquema químico reduzido proposto por Westbrook e Dryer

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$\text{CH}_4$	Metano
$\text{CO}$	Monóxido de carbono
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
F	Combustível
h	Entalpia
$h_{fg}$	Calor latente de vaporização
$\text{H}_2\text{O}$	Água
m	Massa
$\dot{m}$	Fluxo de massa
$\text{O}_2$	Oxigênio
Ox	Oxidante
O/F	Razão entre oxidante e combustível
P	Pressão
Pr	Produto
Q	Poder calorífico
$\dot{q}$	Fluxo de calor
T	Temperatura
$\Delta G^\circ_T$	Função de Gibbs em estado padrão
$\phi$	Razão equivalente

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS GERAIS.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
1.3 METODOLOGIA .....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1. PROPULSÃO DE FOGUETE.....	21
2.1.1. PROPULSÃO HÍBRIDA .....	22
2.2. SISTEMA DE IGNIÇÃO DE FOGUETE .....	22
2.3. COMBUSTÃO .....	23
2.3.1. CONCEITOS GERAIS .....	23
2.3.2 COMBUSTÃO CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> .....	27
2.3.3. ESQUEMAS QUÍMICOS COMPUTACIONAIS PARA A COMBUSTÃO .....	29
<b>3. IGNITOR DO TIPO TOCHA.....</b>	<b>34</b>
<b>4. CÁLCULOS PRELIMINARES .....</b>	<b>39</b>
4.1. COMPARAÇÃO ENTRE CÁLCULOS PRELIMINARES E DADOS EXPERIMENTAIS .....	58
<b>5. SIMULAÇÃO NO FLUENT ANSYS® .....</b>	<b>65</b>
5.1.    METODOLOGIA DA SOLUÇÃO.....	65
5.2.    VALIDAÇÃO DA MALHA .....	67
5.3.    VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS .....	73
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>100</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>103</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A propulsão química produz força da mesma maneira em quase todos foguetes, através de reações químicas de combustão entre o combustível e oxidante. Assim, a energia térmica da combustão é convertida em energia cinética conforme vai expandindo-se pela tubeira. A força gerada e a eficiência do foguete dependem largamente da escolha do combustível e do oxidante (KUO et al., 1996).

Quando o combustível e o oxidante não formam uma mistura hipergólica necessita-se de um ponto que forneça altas temperaturas, o mesmo é denominado de sistema de ignição, o qual tem a responsabilidade de proporcionar calor suficiente até a temperatura de ignição dos propelentes, dando início a combustão (SUTTON & BIBLARZ, 2010).

Existem vários tipos de sistemas de ignição, mas os mais comuns e mais utilizados apresentam a desvantagem de gerar somente uma ignição, podendo ser aplicado só uma vez. Estudos acerca de novos métodos de sistemas de ignição estão em um crescente muito grande, buscando maneiras mais simples e eficientes para dar a ignição dos propelentes (SUTTON & BIBLARZ, 2010).

Entretanto, para fabricar novos sistemas de ignições é necessário validá-los por meio de testes experimentais. Contudo essa validação só ocorre após vários testes com muitas configurações diferentes até encontrar o formato mais apropriado e eficiente para a missão. E isso representa custos altíssimos e envolve grandes riscos por se tratar de objetos a temperaturas muito elevadas (FRASSOLDATI et al., 2014).

Ferramentas computacionais são as melhores alternativas para reduzir os custos com testes experimentais. As mesmas permitem prever o comportamento de diferentes configurações evitando vários experimentos e reduzindo, assim, a quantidade de testes. E dessa maneira, proporciona a melhor configuração para a missão mostrando todos os dados indispensáveis para a validação da mesma.

Além do mais, simulações são capazes de fornecer dados que não podem ser medidos e nem vistos através dos testes experimentais, como a concentração de determinada espécie química após a combustão e o comportamento da chama dentro do ignitor. Isso mostra a real importância das simulações numéricas nas áreas de tecnologias aeroespaciais.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a combustão numérica  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  dentro do ignitor do tipo tocha para um motor de foguete híbrido desenvolvido na FGA. Portanto, cálculos preliminares serão realizados no software NASA *Chemical Equilibrium with Application* (CEA<sup>®</sup>) e os mesmos serão comparados com os dados experimentais. Após, o ignitor será modelado, a malha e os métodos do caso serão validados e, então, serão feitas simulações software Fluent Ansys<sup>®</sup> para verificar o comportamento da combustão ao alterar os valores das razões equivalentes.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo de caso
- Cálculos preliminares no software NASA *Chemical Equilibrium with Application* (CEA<sup>®</sup>)
- Comparação dos resultados entre os cálculos preliminares e os dados experimentais
- Validação da malha
- Validação dos métodos
- Simulações variando a razão equivalente no software Fluent Ansys<sup>®</sup>.

## 1.3 METODOLOGIA

O presente estudo é baseado na fundamentação teórica e na análise numérica da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , com o intuito de ter a capacidade de simular tal combustão no ignitor do tipo tocha. Para isso, serão realizados cálculos preliminares usando o software NASA *Chemical Equilibrium with Application* (CEA<sup>®</sup>). Assim, os valores encontrados serão comparados com os dados experimentais. Após, a malha e os métodos do caso serão validados e, assim, serão realizadas simulações no software Fluent Ansys<sup>®</sup> com o objetivo de demonstrar o comportamento da região de interesse da combustão ao alterar-se a razão equivalente.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PROPULSÃO DE FOGUETE

Conforme Sutton & Biblarz (2010), propulsão é um ato de dar movimento a um corpo. Mecanismos propulsivos concedem uma força que movem corpos os quais estão inicialmente em repouso, mudando a velocidade do mesmo. Propulsão a jato é um exemplo de mecanismo propulsivo que produz essa força, capaz de movimentar um objeto, através do momento da matéria ejetada. Propulsão de foguete é uma classe de propulsão a jato que fornece força pela ejeção da matéria armazenada no próprio veículo, os propelentes.

Os autores relatam que a grande maioria dos sistemas de propulsão de foguete usam o conceito de expansão de gás. A energia interna do gás é aumentada pela combustão na câmara de combustão e a mesma é transformada em energia cinética pela a tubeira.

A tubeira utiliza a geometria convergente-divergente para aumentar a energia cinética significativamente. A temperatura e a pressão do gás diminuem muito através da tubeira enquanto a velocidade aumenta. A mesma pode ser dividida em três partes: convergente, a qual apresenta número de Mach (relação entre velocidade do deslocamento e a velocidade do som local) menor do que um, subsônico; garganta, Mach igual a um, sônico; e divergente, supersônico, número de Mach maior que uma unidade. Assim, na saída da tubeira, parte divergente, conseqüentemente saída do sistema propulsivo, a velocidade terá valores altos capazes de produzirem força mais que suficiente para movimentar o veículo.

Sutton & Biblarz (2010) classificam as tubeiras pela forma que as mesmas ejetam a matéria. A tubeira é dita sub-expandida se a pressão de saída for maior que a pressão externa, caso contrário, pressão na saída menor que a externa, a tubeira é sobre-expandida. Essas diferenças de pressões em relação a ambiente determinam o comportamento da ejeção da matéria acarretando uma diminuição do valor da força produzida. A força terá valor máximo no caso ideal, tubeira idealmente-expandida, a qual a pressão de saída é igual a pressão externa.

### 2.1.1. PROPULSÃO HÍBRIDA

O conceito de propulsão de foguete no qual um dos propelentes é armazenado na fase líquida ou gasosa e o outro na fase sólida é chamado de sistema de propulsão híbrida. A propulsão híbrida tem considerável interesse em aplicações no espaço e em foguetes.

Propulsão híbrida, conforme Sutton & Biblarz (2010), é geralmente formada por propelentes não hipergólicos, ou seja, oxidante e combustível quando em contato não possuem a capacidade de autoignição (o contrário acontece para os propelentes hipergólicos) necessitando de energia para iniciar o processo de combustão. Essa energia é dada aos propelentes pelo sistema de ignição.

### 2.2. SISTEMA DE IGNIÇÃO DE FOGUETE

No caso de propulsão híbrida, o combustível encontra-se dentro da câmara de combustão e o oxidante é injetado na mesma. Então, para ocorrer a combustão, o sistema de ignição deve fornecer calor suficiente até a temperatura de ignição dos propelentes. Assim que ocorre a ignição, a chama auto sustenta-se.

Os autores, Sutton & Biblarz (2010), afirmam que há, pelo menos, 5 diferentes tipos de sistemas de ignição bem-sucedidos usados hoje em dia. São eles: ignição por faísca, ignição por fios eletricamente esquentados, ignição pirotécnica, ignição através de uma câmara de pré-combustão e ignição por meio de um fluido auxiliar.

A ignição por faísca tem sido bem-sucedida quando utilizada na combustão de oxigênio líquido com gasolina ou oxigênio-hidrogênio. Geralmente, esse sistema de ignição é colocado no injetor. Já a ignição por fios eletricamente esquentados está sendo testado, mas, por vezes, esse sistema provou ser menos confiável do que o primeiro.

A ignição pirotécnica usa um dispositivo sólido explosivo que queima em poucos segundos. Esse dispositivo sólido sofre ignição eletricamente e incendeia-se com uma chama quente dentro da câmara de combustão. Esse é o sistema mais usado em propulsão, mas tem a desvantagem de poder ser usado apenas uma vez.

O sistema de ignição através de uma câmara de pré-combustão é dado por uma pequena câmara colocada próxima a câmara de combustão principal e ambas são conectadas por um orifício. Uma pequena quantidade de combustível e oxidante são injetadas nessa pequena câmara e sofrem ignição, ocorrendo a combustão. A

chama gerada pela combustão entra na câmara de combustão principal em forma de tocha e, assim, realiza a ignição dos propelentes que ali se encontram. Esse sistema de ignição tem a vantagem de poder ser usado várias vezes.

E a ignição por meio de um fluido auxiliar é um método onde uma quantidade de líquido ou gás hiperbólico é injetado na câmara de combustão, por um curto período de tempo, produzindo uma combustão espontânea ou com o oxidante ou com o combustível.

## 2.3. COMBUSTÃO

### 2.3.1. CONCEITOS GERAIS

Segundo Turns (2000), combustão é uma oxidação rápida, a qual produz calor. Essa definição mostra a importância das reações químicas para a combustão, uma vez que as mesmas transformam energia armazenada nas ligações químicas em calor.

A combustão pode acontecer tanto com chama ou sem chama. Ao iniciar a combustão, uma região fina de intensa reação química propaga-se através da mistura entre combustível e oxidante, onde ainda não ocorreu a reação de combustão. Essa região fina é chamada de chama.

Conforme a propagação da chama, a temperatura e a pressão vão ter um aumento significativo na região onde não aconteceu a reação de combustão. Sob certas condições, pode ocorrer uma rápida oxidação nessa região gerando uma combustão veloz. Esse processo é conhecido como autoignição, ou seja, combustão gerada sem a presença da chama.

O autor ainda relata que há duas classes de chamas, pré-misturadas e não-misturadas. Ambas estão relacionadas com a mistura dos reagentes. Na primeira, o combustível e o oxidante estão misturados em nível de prioridade molecular para a ocorrência da combustão. Já na segunda, os reagentes encontram-se separados e a reação só ocorre quando ambos são misturados no local da combustão. No presente trabalho será estudada a chama não-misturada do  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ .

Em muitos processos de combustão, a mudança de fase líquido-vapor ocorre com frequência. O calor latente de vaporização,  $h_{fg}$ , é o calor requerido para vaporizar completamente uma unidade de massa de líquido a uma dada temperatura com a pressão constante. O calor latente de vaporização é dado por,

$$h_{fg}(T,P) = h_{\text{vapor}}(T,P) - h_{\text{líquido}}(T,P), \quad (1)$$

onde T e P são as respectivas temperaturas e pressões de saturação. O calor latente de vaporização também é conhecido como entalpia de vaporização. No presente trabalho, tanto o combustível quanto o oxidante serão assumidos como gasosos, então não haverá mudança de fase.

Em misturas entre reagentes e produtos é importante saber a estequiometria dessas reações. O autor define estequiometria como a quantidade necessária de oxidante para queimar completamente todo combustível presente. Se uma quantidade maior que a estequiométrica de oxidante é fornecida, a mistura é chamada de pobre em combustível, ou simplesmente pobre. Caso contrário, fornecendo menos oxidante do que a quantidade estequiométrica obtém-se um resultado rico em combustível, uma mistura rica. A razão estequiométrica entre oxidante e combustível é dada por,

$$(O/F)_{\text{estequiométrico}} = (m_{\text{oxidante}}/m_{\text{combustível}})_{\text{estequiométrico}}, \quad (2)$$

onde m é a massa em quilogramas.

Ainda é definido a razão equivalente,  $\phi$ , que é utilizada para indicar se a mistura oxidante-combustível é pobre, rica ou estequiométrica. Essa razão é definida por,

$$\phi = (O/F)_{\text{estequiométrico}}/(O/F). \quad (3)$$

Para  $\phi > 1$ , a mistura é rica em combustível e  $\phi < 1$ , tem-se uma mistura pobre em combustível. Uma mistura estequiométrica apresenta  $\phi$  igual a um. A razão equivalente é o fator mais importante para determinar a performance do sistema em muitas aplicações de combustão.

Nos estudos de reações químicas, é de extrema valia o conceito de entalpia absoluta e entalpia de formação. A entalpia absoluta,  $h(T)$ , é a soma de uma entalpia que leva em consideração a energia associada a ligações químicas, entalpia de formação ( $h_f$ ), e uma entalpia associada somente com a temperatura, mudança sensível de entalpia ( $\Delta h_s$ ). Então, a entalpia absoluta pode ser definida como,

$$h(T) = h_f + \Delta h_s. \quad (4)$$

Para tornar mais prática a utilização da Eq. (4), é definido um estado de referência padrão, na qual tem-se uma temperatura e uma pressão com valores definidos ( $T_{\text{referência}} = 25 \text{ °C}$  e  $P_{\text{referência}} = 1 \text{ atm}$ ). Além disso, a entalpia de formação é patronizada como zero para elementos em estado natural nas condições de referência padrão. Desse modo, a interpretação física da entalpia de formação pode ser estabelecida como a mudança de entalpia associada a quebra de ligações químicas de elementos em condições padrões para formar novas ligações de novos componentes.

O autor define também a entalpia de combustão,  $\Delta h_R$ , como,

$$\Delta h_R = h_{\text{produtos}} - h_{\text{reagentes}}. \quad (5)$$

Pode-se afirmar que a entalpia de combustão depende da temperatura, uma vez que as entalpias dos reagentes e dos produtos variam com mudanças na temperatura.

Reações de combustão geralmente ocorrem de maneira muito rápidas, na ordem de 1 milissegundos ou menos, e uma pequena transferência de calor ou trabalho é realizada na escala de tempo da combustão. Por está razão, a temperatura máxima alcançada em um processo de combustão tem um valor muito próximo da de uma combustão adiabática, a qual a entalpia dos reagentes é igual a entalpia dos produtos. Este importante conceito é definido como temperatura de chamas adiabáticas.

Em combustões de altas temperaturas, as espécies químicas formadas não são umas simples misturas de produtos ideais como sugerido em equações estequiométricas. Em vez disso, espécies maiores dissociam-se produzindo espécies menores. Na prática, tratando-se de combustão, espécies menores estão presentes em grandes quantidades. A título de exemplo, a combustão ideal de hidrocarbonetos com o ar gera apenas espécies maiores como produto:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$ . Entretanto, na realidade, espécies menores também são formadas através da dissociação das maiores produzindo:  $\text{H}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}$  e outras.

Com base no parágrafo anterior, frequentemente tem-se a necessidade de calcular a composição de uma mistura e saber o equilíbrio químico da reação a uma dada temperatura, pressão e estequiometria. Para tanto, é utilizada uma constante de equilíbrio,  $K_p$ , e uma função (função de Gibbs em estado padrão,  $\Delta G^\circ_T$ ) para

indicar quando a reação está a favor dos produtos ou dos reagentes. O equilíbrio químico a pressão e temperatura constantes é dado por,

$$K_p = \exp(-\Delta G^\circ_T/R_u T). \quad (6)$$

Através da Equação (6), percebe-se que se  $\Delta G^\circ_T$  é positivo,  $K_p$  será menor do que um, indicando que a reação favorecerá os reagentes. Caso contrário,  $K_p$  terá o valor maior que um, favorecendo os produtos.

O autor define o conceito de reação global e intermediária para tratar as espécies maiores e menores na combustão. A reação global é caracterizada pela reação entre um mol de combustível, F, com  $a$  mols de oxidante, Ox, formando  $b$  mols de produto, Pr,



Entretanto, é totalmente fora da realidade que  $a$  moléculas de oxidante colidem simultaneamente com uma simples molécula de combustível formando  $b$  moléculas de produto, já que esta reação envolve quebra de ligações químicas e formação de novas ligações. Na verdade, vários processos podem ocorrer abrangendo muitas espécies intermediárias. Então, para completar a combustão, acontecem diversas reações intermediárias no processo e os conjuntos dessas reações recebe o nome de reação de mecanismo.

O que realmente ocorre nesse processo de combustão é que após um rápido acúmulo inicial na concentração dos radicais das espécies intermediárias, a taxa de formação e destruição dos radicais é igual, pois eles são destruídos tão rápido quanto são formados. Essa situação típica de combustão acontece quando as reações que formam espécies intermediárias são lentas, enquanto reações de destruição das mesmas são velozes. Como consequência disso, ao final da reação, as concentrações das espécies intermediárias são bem pequenas comparadas com os produtos.

Muitas dessas reações intermediárias em combustão podem ser bimoleculares, unimoleculares e termoleculares. Reação biomolecular é definida como duas moléculas colidindo entre si para formarem duas diferentes moléculas. Essa reação é expressada como,



Reação unimolecular, como o nome já sugere, é descrita como uma simples espécie sofrendo isomerização ou decomposição para formar um ou dois produtos,



ou



Essas reações, unimoleculares, acontecem normalmente a altas pressões. Enquanto que a baixas pressões, a reação depende da concentração de alguma molécula, M, para as moléculas dos reagentes colidirem.

E a reação termo-molecular envolve três reagentes diferentes e equivale-se ao inverso da reação unimolecular a baixa pressão. A forma geral da mesma é dada por,



onde, M é uma molécula qualquer, como visto, e frequentemente é chamada de terceiro corpo, o qual é requisitado para levar a energia liberada na formação das espécies estáveis. Isso ocorre, pois durante a colisão, a energia interna da recém molécula formada é transferida para o terceiro corpo e manifesta-se como energia cinética de M. Caso não houvesse essa transferência de energia, a molécula recém-formada poderia desassociar-se produzindo os átomos dos reagentes.

### 2.3.2 COMBUSTÃO CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>

Os propelentes escolhidos para o sistema de ignição do tipo tocha desenvolvido na FGA são o metano gasoso, CH<sub>4</sub>, como combustível e o oxigênio gasoso, O<sub>2</sub>, como oxidante. A combustão CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> tem uma baixa velocidade de propagação da chama e esse parâmetro é de fundamental importância, porque o ignitor tem uma dimensão muito pequena e necessita que a chama seja lenta para a combustão completar-se na extremidade de saída do mesmo (TURNS, 2000).

Além disso, a combustão CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> apresenta outras características únicas como, temperatura de ignição alta e é quimicamente não-reativo com a fumaça fotoquímica. Essas características citadas devem-se ao fato do metano ser uma estrutura molecular tetraédrica com a energia de ligação C – H alta.

Tabelas de energia de ligações químicas mostram essa peculiaridade do metano, pois a primeira quebra da ligação C – H do mesmo necessita de um valor em torno de 40 kJ a mais do que os outros hidrocarbonetos. Assim, não haveria nenhuma surpresa em encontrar evidências demonstrando que é mais difícil a ignição da mistura  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  em relação aos outros hidrocarbonetos. A temperaturas baixas, a reação ocorre tão lentamente que é considerada não-reativa. Por esse motivo, a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  necessita de alta temperatura de ignição para ocorrer (GLASSMAN & YETTER, 2008).

Como os propelentes são gasosos, os mesmos podem reagir em uma ampla variedade de concentrações quando submetidos a temperaturas elevadas. Entretanto, a mistura  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  é dita inflamável, ou seja, a referida pode propagar a chama livremente dentro de uma faixa limitada de composição. A Figura (1) representa o diagrama de inflamabilidade do metano/oxigênio/nitrogênio (ISA, 1999).

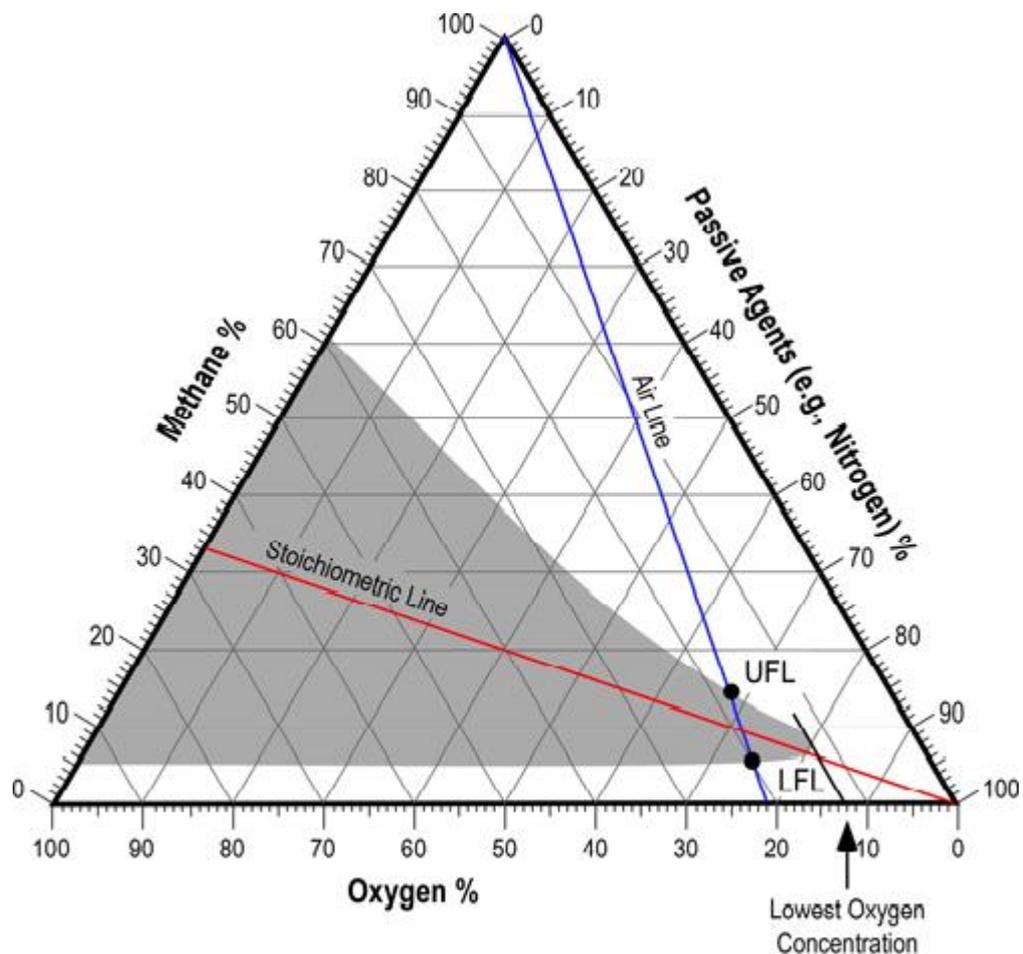


Figura 1. Diagrama de inflamabilidade do metano/oxigênio/nitrogênio. Fonte: (ISA, 1999)

A Figura (1) mostra em quais concentrações a mistura metano/oxigênio/nitrogênio será inflamável. Para a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , pela Fig. (1), percebe-se que a mistura é inflamável para concentrações de metano entre 5 a 61%, aproximadamente, e a combustão será estequiométrica,  $\phi = 1$ , para concentrações de metano por volta de 34%.

O processo de combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  é uma progressão linear do  $\text{CH}_4$  até formar o  $\text{CO}_2$  juntamente com várias rotações originadas pelo radical metil,  $\text{CH}_3$ . A progressão linear tem início com o ataque da molécula de metano pelos radicais  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$  e  $\text{H}$  formando o metil. Então, o radical metil combina-se com um átomo de oxigênio produzindo formaldeído,  $\text{CH}_2\text{O}$ . Por sua vez, a formaldeído é atacado pelos radicais  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$  e  $\text{H}$  formando o formilo,  $\text{HCO}$ . Este radical,  $\text{HCO}$ , é convertido em  $\text{CO}$  por um trio de reações e, enfim,  $\text{CO}$  transforma-se em  $\text{CO}_2$  pela reação com  $\text{OH}$  (TURNS, 2000).

### 2.3.3. ESQUEMAS QUÍMICOS COMPUTACIONAIS PARA A COMBUSTÃO

Como visto, espécies e reações intermediárias podem ocorrer em quantidades elevadas na combustão. Segundo Bibrzycki & Poinot, a combustão do metano, por exemplo, com um oxidante composto de  $\text{N}_2/\text{O}_2$  ou  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  apresenta um total de 325 reações e 53 espécies.

O processo de combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  é muito extenso também e envolve centenas de reações. O mesmo tem as vantagens de redução de emissões de partículas, apresenta uma chama estável e manifesta boas características de transferência de calor. Isso explica os vários estudos publicados na literatura de esquemas químicos computacionais que são capazes de caracterizar essa combustão com precisão (FRASSOLDATI et al., 2014).

Assim sendo, o Fluido Dinâmico Computacional (CFD) está aumentando sua relevância como uma ferramenta de desenvolvimento industrial e otimização de dispositivos de combustão. O CFD, em particular, representa muito bem a combustão oxidante/combustível e outras ferramentas numéricas em geral.

Entretanto, o principal problema da utilização do CFD em escala geométrica completa é a exigência de uma larga grade computacional e, conseqüentemente, muita memória do computador é requerida. Esse é o caso do esquema químico denominado de GRI Mech. Sendo assim, é de extrema importância os estudos de esquemas químicos que utilizam o CFD com escalas geométricas reduzidas, uma vez que testes experimentais são muito caros e envolvem grandes riscos e realizar simulações usando o GRI Mech é inviável em muitos casos.

O GRI Mech é um mecanismo químico que descreva a especificação completa das reações da combustão metano/oxigênio. Muitos grupos de pesquisa colaboram para a criação do mesmo e o referido mecanismo está disponível na Internet e é atualizado constantemente (TURNS, 200).

Segundo Giorgi et al. (2011), simulações numéricas da chama do LOX/CH<sub>4</sub>, combustão do metano com oxigênio líquido, é um dos aspectos de maior relevância para a escolha do modelo apropriado de combustão e deve ter uma boa precisão contendo uma boa relação entre a descrição do fenômeno e os custos computacionais. Um esquema químico detalhado, como o GRI Mech, produz a melhor descrição possível da chama, mas, em muitos casos, um mecanismo químico mais reduzido gera resultados bons gastando muito menos tempo e memória do computador.

Em típicas combustões de metano com o oxigênio, os esquemas químicos reduzidos mais utilizados são os propostos por Westbrook e Dryer (WD) e Jones e Lindstedt (JL), conforme afirma Frassoldati et al. (2014). A Fig. (2) representa o esquema WD e a Fig. (3), o JL.

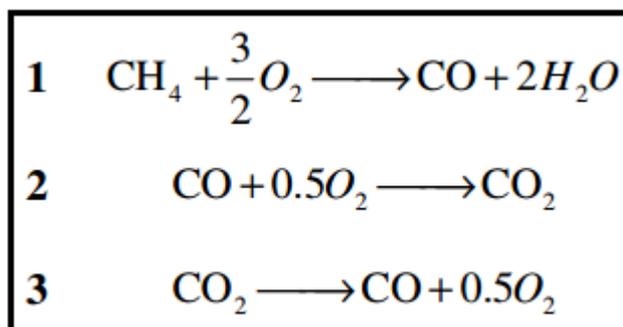


Figura 2. Esquema químico reduzido proposto por Westbrook e Dryer (WD). Fonte: (FRASSOLDATI et al., 2014)

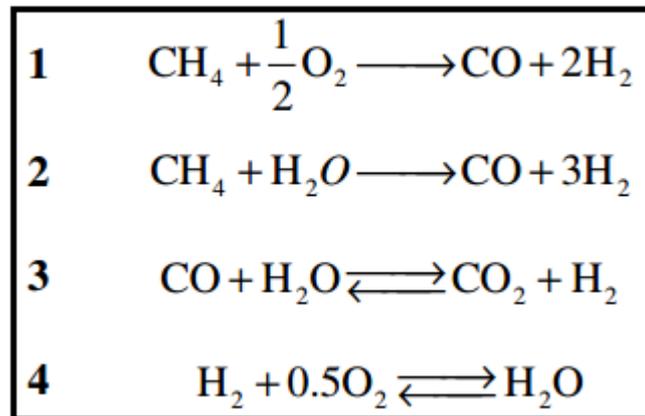


Figura 3. Esquema químico reduzido proposto por Jones e Lindstedt (JL). Fonte: (FRASSOLDATI et al., 2014)

Pela Figura (2), percebe-se que o mecanismo WD envolve três reações e cinco espécies químicas. O mesmo é muito utilizado por estar disponível em vários códigos comerciais do CFD. E por meio da Fig. (3), é possível observar que o mecanismo JL é um pouco mais complexo que o WD, pois o referido abrange quatro reações e seis espécies e, assim, apresenta um grau de precisão maior que o WD. O JL é regularmente usado no CFD para aplicações industriais.

Pode-se afirmar que quando se utiliza esquemas químicos simplificados em simulações numéricas, deve-se dedicar uma atenção especial a consistência termodinâmica das reações reversíveis, a ordem das reações não elementares deve ser procedida cuidadosamente, e a existência de reações de ordem menor do que um, pois se a ordem das reações não elementares for menor do que uma unidade pode causar problemas numéricos devido a possibilidade de valores negativos de concentração.

O autor ainda confirma que os esquemas simplificados, WD e JL, não apresentam resultados satisfatórios para combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  somente para combustões convencionais, metano e ar por exemplo. O motivo disso é que o pico de temperatura da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  limita a validade dos esquemas reduzidos. A temperaturas maiores do que 2500 K, as quais são muito comuns nesse tipo de combustão, os equilíbrios  $\text{CO} - \text{CO}_2$  e  $\text{H}_2 - \text{H}_2\text{O}$  são a favor de  $\text{CO}$  e de  $\text{H}_2$  respectivamente. Nessas condições, em algumas reações elementares de relevância na combustão podem ocorrer mudanças drásticas em comparação com a combustão convencional e isso revela que para representar a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  os

esquemas simplificados, como WD e JL, devem ser modificados e necessitam a introdução de reações de dissociação e de radicais de espécie. De outra forma, seria impossível representar corretamente a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ .

Isso significa que se for usado um mecanismo reduzido, como o JL, o qual leva em consideração apenas seis espécies químicas na combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , para a simulação numérica, um campo de temperaturas com valores bem maiores do que o real será encontrado. Reações de dissociações do  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{O}_2$  devem ser introduzidas ao mecanismo simplificado caso queira encontrar um campo de temperatura correto.

Reações de dissociações tem uma importância bem maior quando se trata do mecanismo WD, pois o mesmo contém um menor número de espécies do que o JL e, conseqüentemente, o campo de temperatura encontrado tem valor superior ao do JL.

O autor fez vários testes para combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  com os mecanismos reduzidos, WD e JL, e em todos recebeu valores bem diferentes ao de referência. Assim, ficou-se evidente a necessidade de acrescentar as reações de dissociações da água e do oxigênio e, por consequência, um novo esquema químico reduzido, chamado de mecanismo JL-R, foi criado.

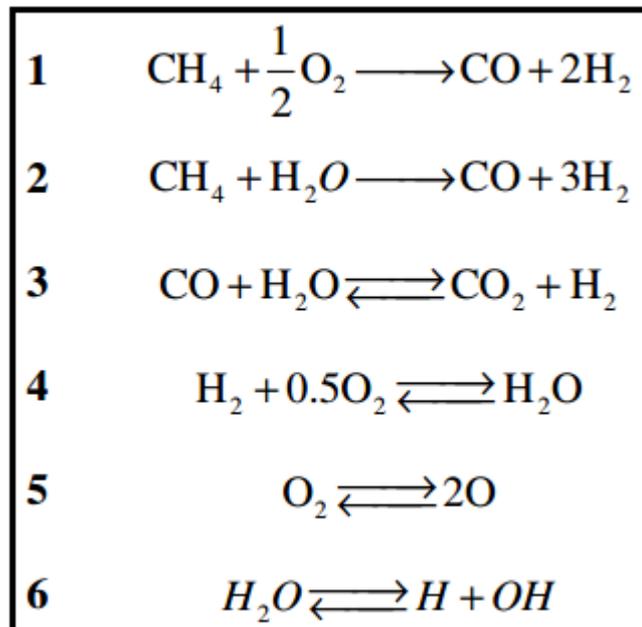


Figura 4. Esquema químico reduzido JL com as reações de dissociação (JL-R).

Fonte: (FRASSOLDATI et al., 2014)

A Figura (4) mostra o esquema químico proposto por Jones e Lindstedt (JL) modificado pela inserção das reações de dissociações do oxigênio e da água. O mecanismo JL-R apresenta seis reações e nove espécies químicas, sendo mais complexo do que os outros esquemas.

Após vários testes, os resultados do mecanismo JL-R mostraram uma melhora significativa, apresentando valores das simulações numéricas bem próximos ao de referência para a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ . Isso demonstra que as introduções das reações de dissociações representam um aumento da precisão do mecanismo JL, razão pela qual o esquema químico modificado foi selecionado para representar a combustão numérica do presente trabalho.

### 3. IGNITOR DO TIPO TOCHA

Estudos em tecnologias de ignição são as melhores maneiras de aprimorar as vantagens de um foguete híbrido. A ignição de um foguete é uma das principais partes da propulsão, uma vez que a mesma pode garantir uma maior segurança e confiança para o foguete e, ainda, proporcionar as condições necessárias para ocorrer a combustão na câmara de combustão (SHYNKARENKO et al., 2015).

Como já visto, o sistema de ignição mais utilizado em propulsão é o de ignição pirotécnica, mas o mesmo possui a desvantagem de ser uma única ignição. Com o intuito de múltiplas ignições e de simples fabricação, o ignitor do tipo tocha está sendo desenvolvido, pelo grupo de propulsão da UnB-FGA, como um método novo de ignição através de uma câmara de pré-combustão, desse modo, o aprimoramento nesse sistema permitirá aumentar a viabilidade de missões espaciais (SHYNKARENKO et al., 2015).

A estrutura do primeiro ignitor desenvolvido está mostrada na Fig. (5). O mesmo é um sistema de ignição do tipo tocha que foi modelado com uma câmara de combustão cilíndrica e uma tubeira convergente. Na estrutura há dois injetores para o oxidante e um para o combustível, sendo todos idênticos. Assim, a complexidade da montagem do sistema será menor, tornando a fabricação do ignitor simples. Essa simplicidade é um importante critério, pois pode reduzir os custos de fabricação (SHYNKARENKO et al., 2015).

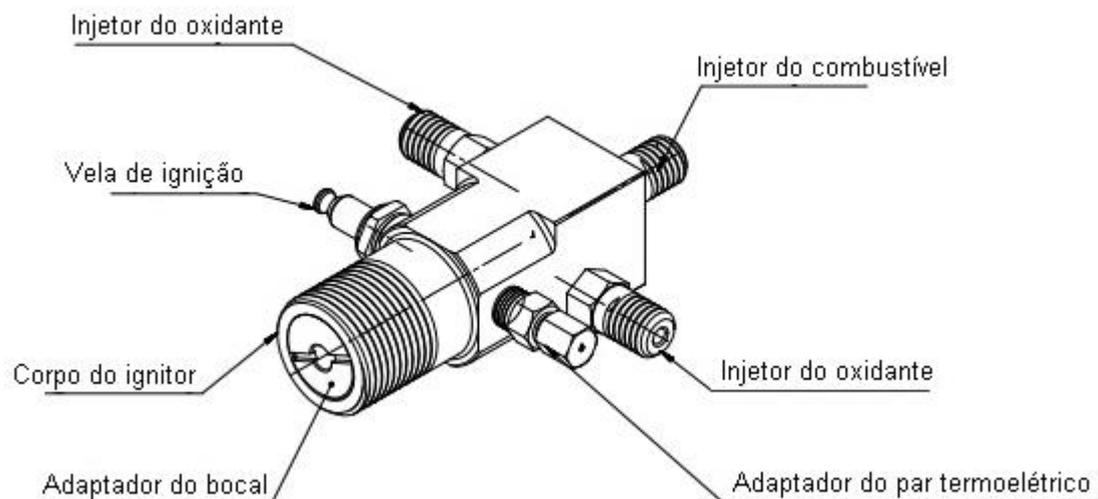


Figura 5. Estrutura do primeiro ignitor do tipo tocha. Fonte: (SHYNKARENKO et al., 2015)

Os adaptadores dos injetores e da tubeira foram projetados de maneira a permitir uma fácil permutação entre as partes, tornando factível regular as configurações de ambos. Ainda há conectado a estrutura a vela de ignição, responsável por dar início a combustão oxidante/combustível, e o adaptador do par termoelétrico, o qual permite colocar tal sensor (SHYINKARENKO et al., 2015).

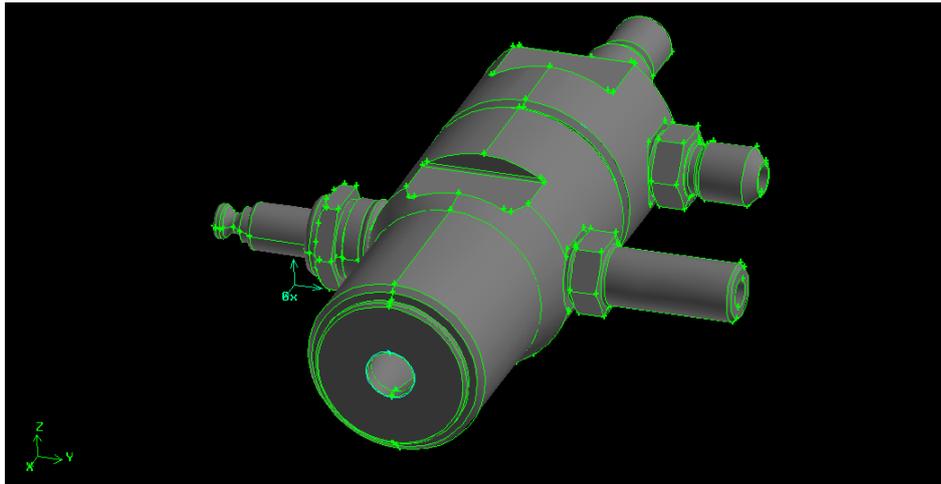


Figura 6. Estrutura atual do ignitor modelado no CAD. Fonte: Elaboração Própria

A Figura (6) mostra o ignitor atualizado modelado no CAD. O mesmo é uma evolução da estrutura da Fig. (5). A principal diferença entre eles é que o atual tem apenas um injetor para o oxidante enquanto o primeiro ignitor, Fig. (5), contém dois injetores.

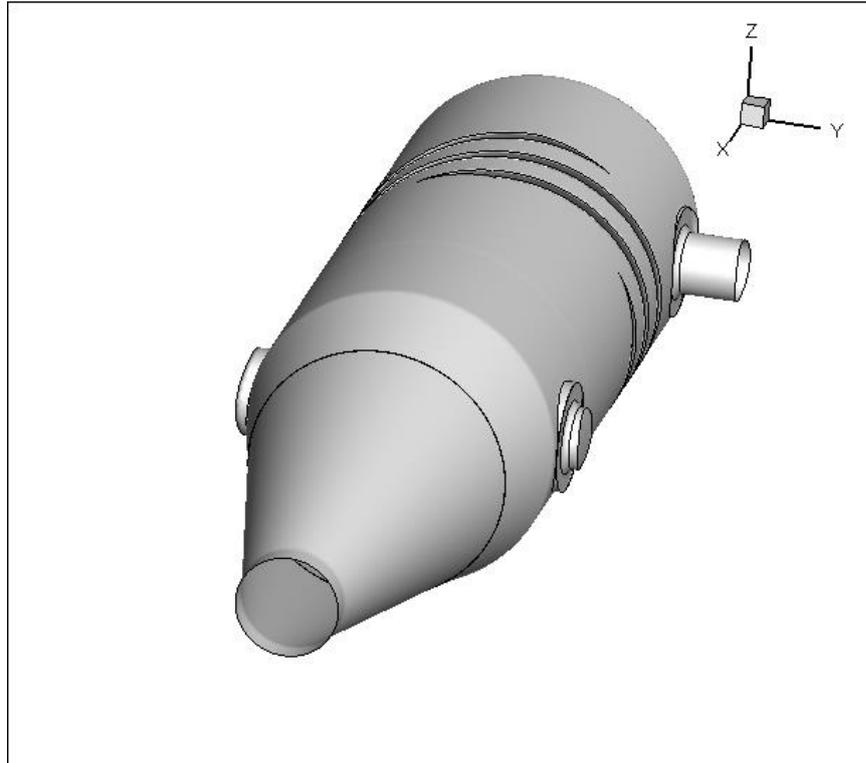


Figura 7. Visão compacta do ignitor do tipo tocha. Fonte: Elaboração Própria

Pela Figura (7), percebe-se a visão compacta do ignitor do tipo tocha. É bem visível pela figura a tubeira convergente do ignitor e o injetor do oxidante. Essa estrutura da Fig. (7) foi modelada no software Fluent Ansys para simulações da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  no mesmo.

O mecanismo de operação desse sistema de ignição é o seguinte: o combustível é injetado de maneira simplesmente axial pelo injetor de combustível. Já o oxidante inserido no ignitor apresenta um movimento de espiral dado pela geometria do mesmo. Como consequência, assim que o combustível se mistura com o oxidante, o referido recebe o momento rotacional do oxidante, causando o movimento espiral na câmara de combustão. Esse deslocamento em espiral fornece um alto-resfriamento para a câmara de combustão com o intuito de proteger o material da estrutura contra calor produzido pela combustão (SHYNKARENKO et al., 2015).

Após a mistura do combustível e do oxidante na câmara de combustão, a vela de ignição produzirá uma faísca elétrica para dar início a combustão e a chama gerada deverá fornecer a energia necessária para uma nova combustão dos propelentes híbridos na câmara de combustão principal (SHYNKARENKO et al., 2015).

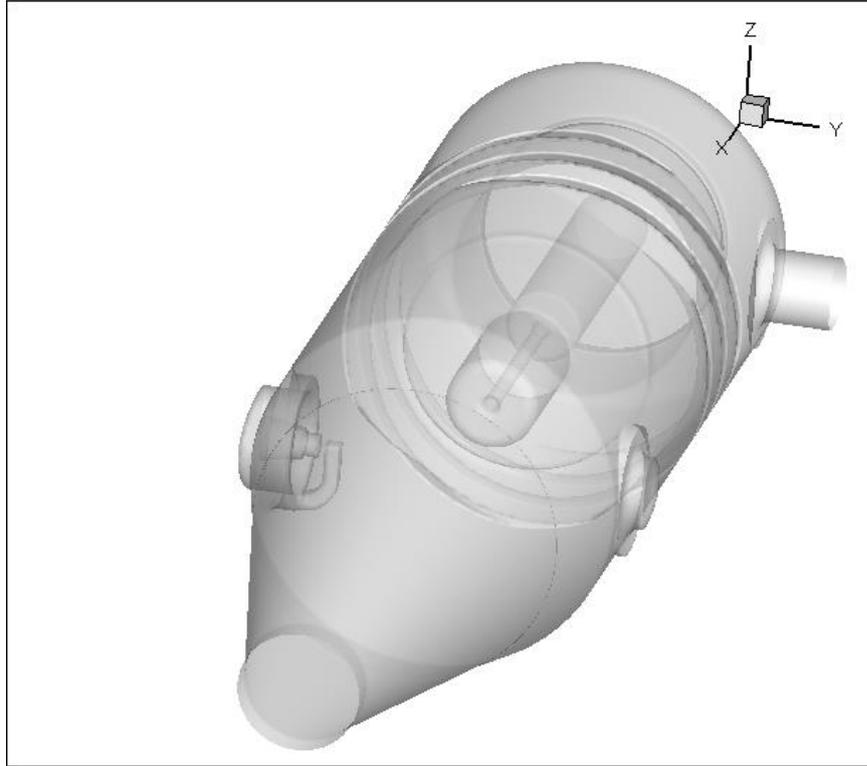


Figura 8. Visão detalhada do ignitor do tipo tocha. Fonte: Elaboração Própria

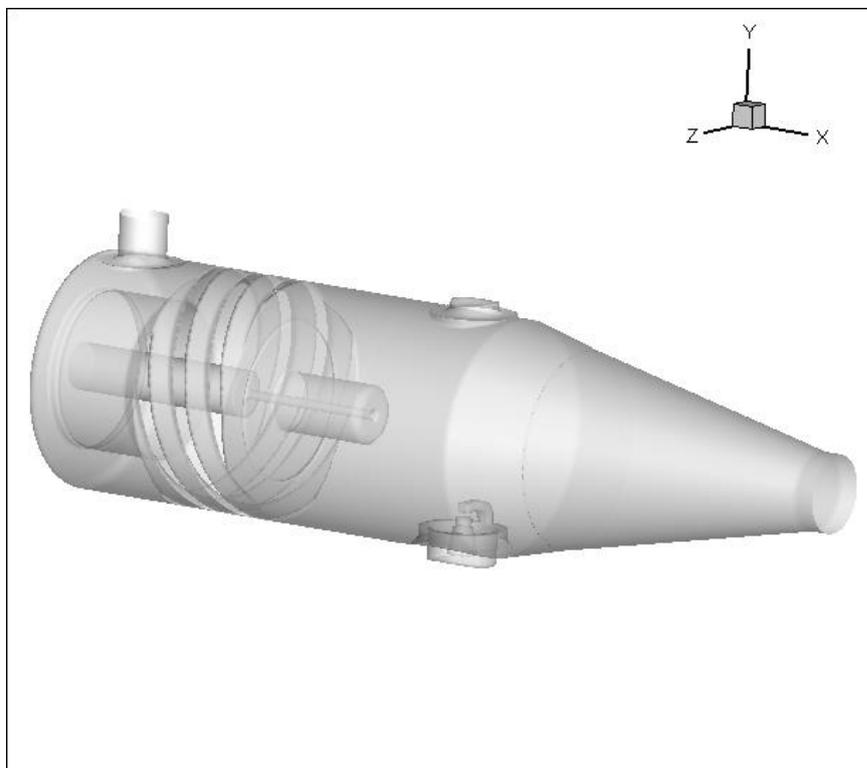


Figura 9. Visão detalhada do ignitor do tipo tocha em outro plano. Fonte: Elaboração Própria

Por meio das Figuras (8) e (9) fica mais factível de entender o funcionamento do ignitor do tipo tocha detalhado anteriormente. Como dito, o injetor no centro do ignitor é para o combustível, o qual é inserido de maneira axial, e pode-se perceber que aquela espécie de rosca na lateral do ignitor é a responsável por dar o movimento em espiral para o oxidante. As figuras mostram também a vela de ignição, encarregada de dar início a combustão, e a tubeira convergente do ignitor.

Testes experimentais para esse ignitor estão sendo realizados e alguns resultados já foram obtidos, conforme demonstra a tabela abaixo.

Tabela 1. Testes experimentais para o ignitor do tipo tocha. Fonte: (De OLIVEIRA, 2017 )

Teste	Pressão (bar)		Duração de teste (s)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Máxima (K)
	Combustível	Oxidante			
T01	1	1.3	20	891	1164
T02	1	2	20	257.2	530,2
T03	1	2.5	20	226.2	499,2
T04	1	3	20	223.5	496,5
T05	1.5	1.3	20	1229.5	1502,5
T06	1.5	2	20	563.2	836,2
T07	1.5	2.5	20	379.4	652,4
T08	1.5	3	20	304.5	577,5
T09	2	1.3	10	1283.2	1556,2
T10	2	2	13.4	881	1154
T11	2	2.5	20	479.4	752,4
T12	2	3	17.6	658	931
T13	2.5	1.3	5	1290	1563
T14	2.5	2	20	755.2	1028,2
T15	2.5	2.5	20	595	868
T16	2.5	3	20	522.3	795,3
T17	3	1.3	5	1500	1773
T18	3	2	20	913.8	1186,8
T19	3	2.5	20	696.3	969,3
T20	3	3	20	806.4	1079,4

A Tabela (1) mostra os dados de temperatura encontrados para a combustão dentro do ignitor do tipo tocha. Pode-se perceber que foram realizados vinte testes diferentes para várias combinações possíveis. Por meio dos dados da Tab. (1), observa-se que os maiores resultados de temperaturas encontrados são para pressões do combustível superiores às do oxidante.

#### 4. CÁLCULOS PRELIMINARES

Como visto, o esquema químico reduzido exposto por Frassoldati et al. (2014), mecanismo JL-R, apresenta valores próximos ao de referência para a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , mas, para que essa combustão ocorra, é de essencial importância a concentração dos propelentes antes da reação.

O principal parâmetro para tratar as concentrações do combustível e do oxidante é a razão equivalente,  $\phi$ , a qual indica a quantidade de combustível na mistura.  $\phi < 1$ , por exemplo, representa uma mistura pobre em combustível.

Diante disso, com o intuito de obter resultados preliminares da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  e fazer uma comparação com os dados experimentais, realizou-se cálculos no software NASA *Chemical Equilibrium with Application* (CEA<sup>®</sup>). Para isso, foi determinado como parâmetros iniciais diferentes valores de razões equivalentes e de pressões. E para calcular a composição de equilíbrio foram consideradas apenas as espécies químicas presentes no mecanismo JL-R, Fig. (4).

O software CEA<sup>®</sup> tem vários casos possíveis de combustão que podem ser calculadas. Como o propósito desses cálculos é simular a combustão no ignitor do tipo tocha, o caso que representa um foguete foi selecionado, pelo fato de o mesmo calcular a combustão através da câmara de combustão e da tubeira.

Os parâmetros iniciais utilizados foram selecionados para representar o melhor possível o sistema de ignição. Escolheu-se metano gasoso, a temperatura ambiente, como combustível e oxigênio gasoso, também a temperatura ambiente, como oxidante. Além disso, a razão equivalente teve valores variando de 0,3 a 1,5 sendo incrementados de 0,1 e os cálculos foram feitos para os seguintes valores de pressão: 1,3; 1,5; 1,7; 2; 2,5 e 3 bar.

O software permite escolher vários valores para serem calculados, no caso do ignitor foi escolhido como parâmetros de saídas o número de Mach, a pressão, a temperatura e as nove espécies químicas representadas pelo mecanismo JL-R ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$  e  $\text{H}$ ).

Os diferentes resultados para a temperatura e para as concentrações das espécies químicas, tanto na câmara de combustão como na saída da tubeira, foram plotados em vários gráficos para analisar a influência da pressão e da razão equivalente na combustão.

Os outros parâmetros de saída, número de Mach e pressão, não tiveram os valores plotados, mas os mesmos foram utilizados para melhor interpretar os dados obtidos. Como a simulação do CEA<sup>®</sup> considera uma tubeira convergente-divergente idealmente-expandida, o número de Mach e a pressão serviram para mostrar em qual parte da tubeira a matéria era ejetada.

Visto que a tubeira no CEA<sup>®</sup> é idealmente-expandida, então a pressão na saída é igual a pressão ambiente, no caso 1 bar. A partir desse valor, observou-se o número de Mach, se o mesmo for subsônico, a zona de saída é na parte convergente, caso seja supersônico, a saída se fará na parte divergente.

Tabela 2. Valores de pressão e Mach na saída para a mesma razão equivalente e diferentes pressões iniciais. Fonte: Elaboração Própria

$\phi$	$P_{\text{inicial}}$ [bar]	$P_{\text{final}}$ [bar]	Número de Mach
0,7	1,3	1	0,692
0,7	1,5	1	0,864
0,7	1,7	1	0,991
0,7	2	1	1,14
0,7	2,5	1	1,32
0,7	3	1	1,45

Pela Tabela (2) percebe-se que a tubeira é de fato idealmente-expandida, pois a pressão na saída é igual a ambiente. Entretanto, para diferentes valores de pressão inicial, considerando a mesma razão equivalente, o número de Mach é diferente para cada caso e avaliando os resultados do mesmo, pode-se afirmar aonde encontra-se a região de saída da tubeira. O número de Mach é subsônico para os três primeiros valores de pressão, isso indica que a tubeira é apenas convergente. Para os três últimos valores de pressão, a saída é na parte divergente, pois o Mach é supersônico.

Por meio de raciocínio semelhante, pode-se identificar também quais resultados encontrados pertenciam a câmara de combustão. Bastava procurar os valores relacionados ao número de Mach igual a zero, pois na câmara de combustão a velocidade é extremamente baixa, fazendo o Mach aproximar-se de zero. Assim,

tendo identificado os resultados correspondentes a câmara de combustão e a saída, plotou-se vários gráficos relacionados a essas duas regiões.

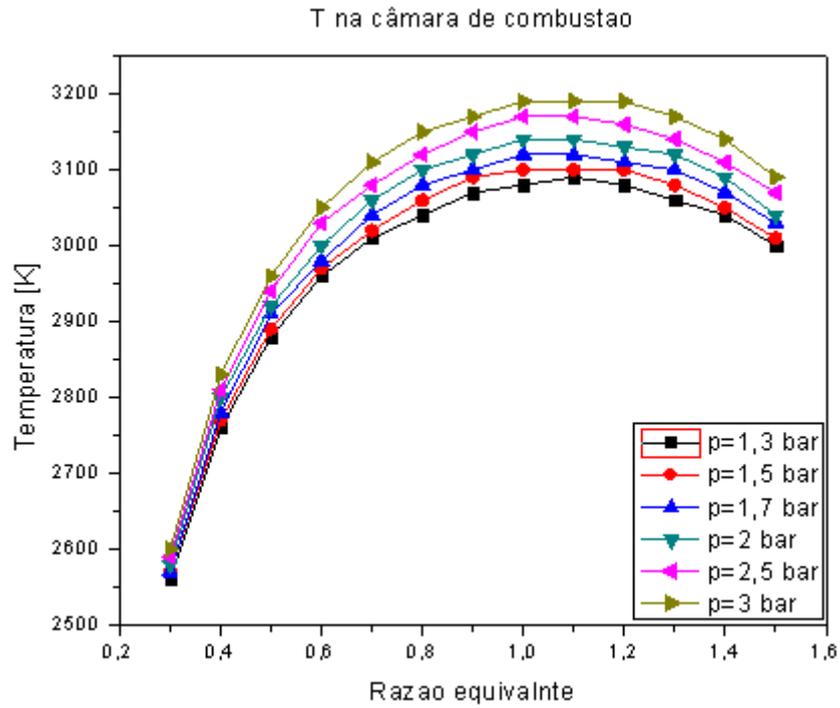


Figura 10. Temperaturas para diferentes pressões na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

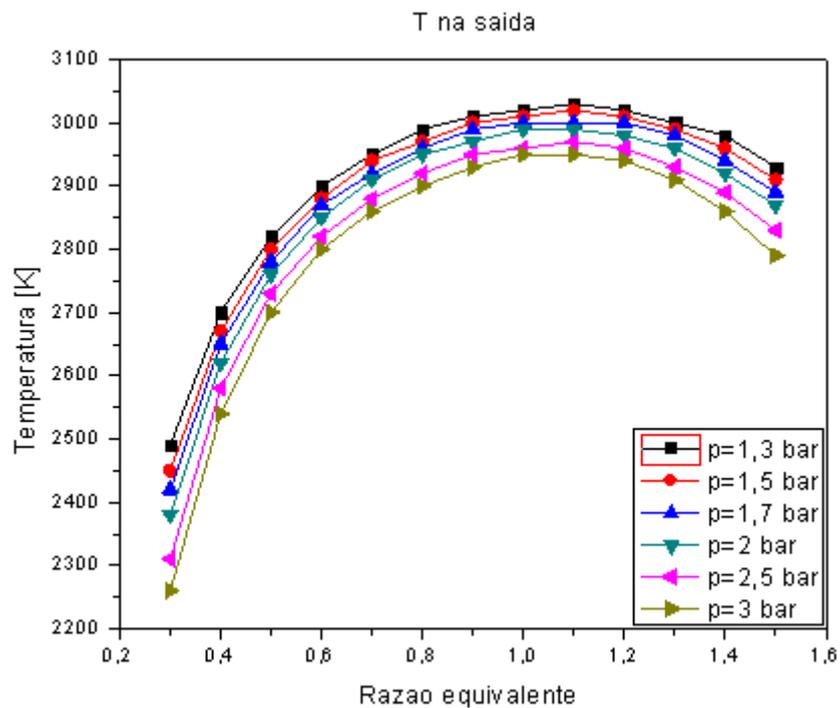


Figura 11. Temperaturas para diferentes pressões na saída da tubeira. Fonte:  
Elaboração Própria

As Figuras (10) e (11) demonstram o comportamento da temperatura para diferentes valores de pressão e razão equivalente. A Fig. (10) representa valores de temperatura na câmara de combustão e mostra que quanto maior a pressão inicial, maiores os resultados da temperatura. A mesma expõe ainda que o pico de temperaturas ocorre quando  $\phi = 1,1$ .

A Figura (11) mostra o mesmo comportamento da Fig. (10), mas na região de saída da tubeira. Entretanto, percebe-se que os maiores valores de temperatura são para os menores valores de pressão inicial, resultado esse contrário a câmara de combustão. Os picos de temperatura também ocorrem a  $\phi = 1,1$ .

Os diferentes valores encontrados para as temperaturas a diferentes pressões podem ser explicados pela concentração das espécies químicas, porque produzindo ou consumindo mais de uma determinada espécie pode gerar resultados finais bem divergentes.

O software CEA<sup>®</sup> considera uma combustão instantânea, ou seja, todas as reações da combustão ocorrem em um intervalo de tempo infinitamente pequeno, o tempo químico é igual a zero.

Além disso, as concentrações de combustível apresentam valores abaixo da razão equivalente para quase todo o cálculo numérico, então o metano é consumido totalmente em praticamente toda a simulação. Essa é a razão para os resultados obtidos para o metano serem todos iguais a zero. Mas para as outras espécies químicas, recebeu-se vários resultados.

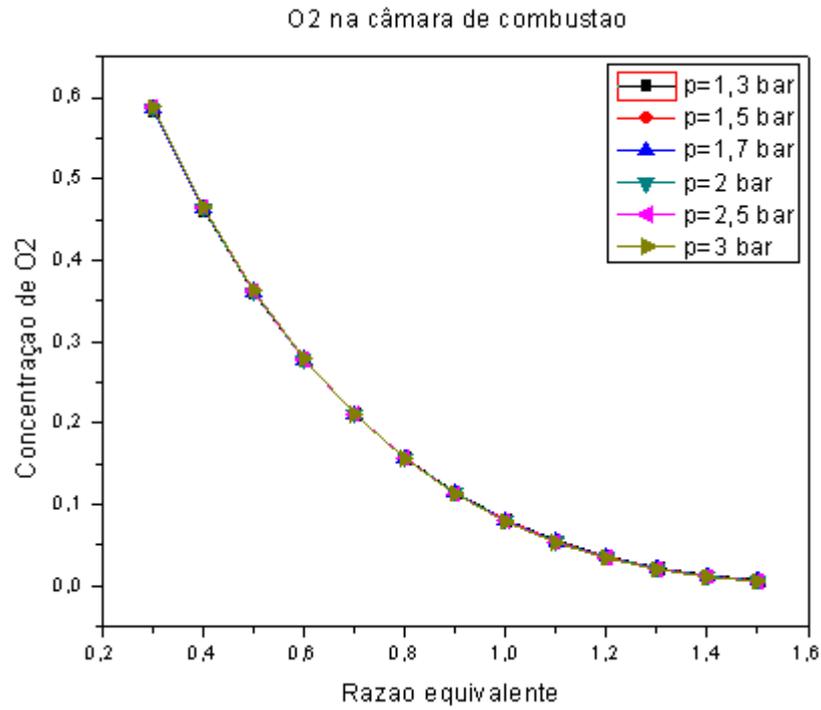


Figura 12. Concentrações de O<sub>2</sub> para diferentes pressões na câmara de combustão.

Fonte: Elaboração Própria

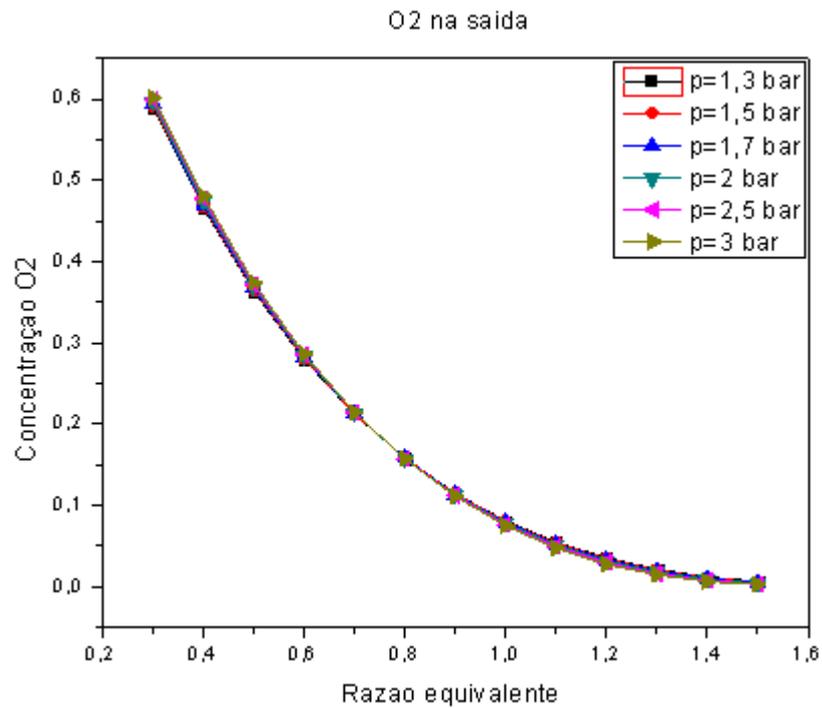


Figura 13. Concentrações de O<sub>2</sub> para diferentes pressões na saída da tubeira.

Fonte: Elaboração Própria

Por meio das Figuras (12) e (13) percebe-se que o oxidante,  $O_2$ , tem o mesmo comportamento, para todas as pressões, tanto na câmara de combustão quanto na saída da tubeira. Observa-se também que a concentração do mesmo diminui conforme a razão equivalente aumenta. Esse resultado já era esperado, pois quanto mais aumenta o valor de  $\phi$ , mais a concentração de combustível eleva-se.

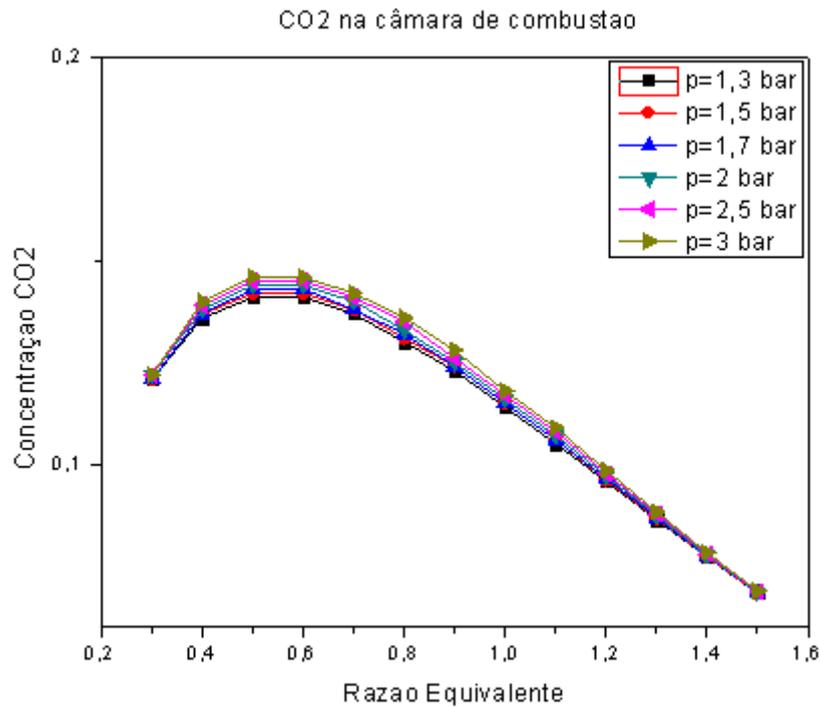


Figura 14. Concentrações de CO<sub>2</sub> para diferentes pressões na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

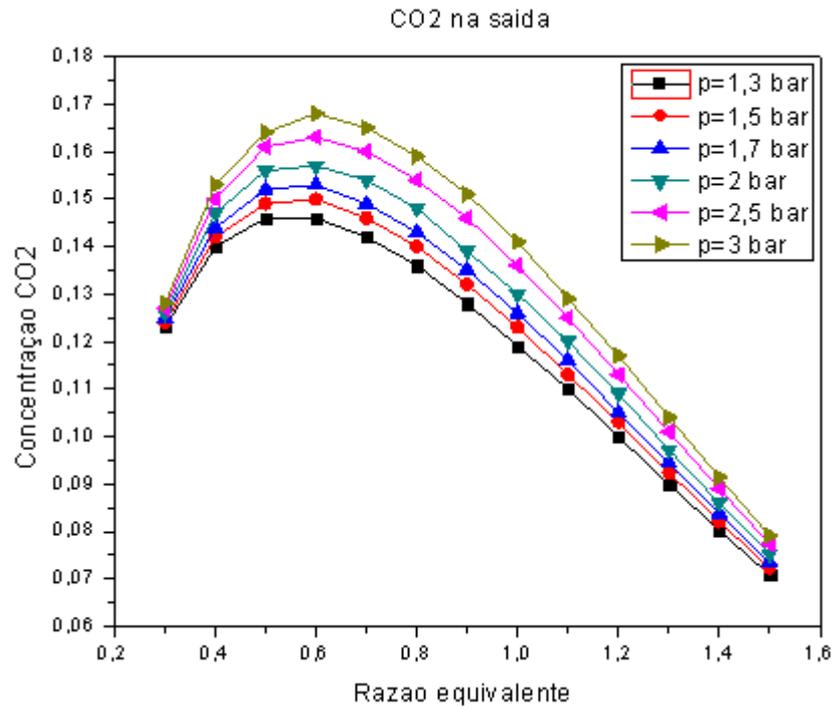


Figura 15. Concentrações de CO<sub>2</sub> para diferentes pressões na saída da tubeira.

Fonte: Elaboração Própria

A Figura (14) apresenta as concentrações de CO<sub>2</sub> na câmara de combustão. Para as diferentes pressões, as concentrações apresentam pequena diferença entre si e o valor máximo encontra-se a  $\phi = 0,6$ . Quanto maior a pressão, maiores as concentrações e percebe-se também que após a valor de pico, as concentrações diminuem muito.

A Figura (15) demonstra o mesmo comportamento da Fig. (14), mas as concentrações são medidas na saída da tubeira. As concentrações apresentam uma maior diferença entre si, para diferentes pressões, do que a Fig. (14). Isso mostra que quanto maior a pressão, maior será a produção de CO<sub>2</sub>.

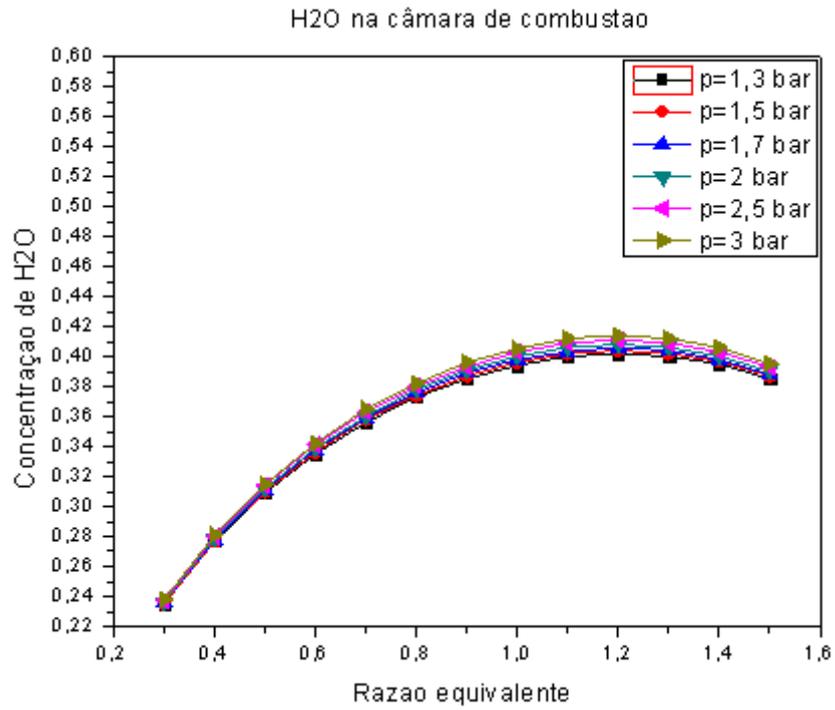


Figura 16. Concentrações de H2O para diferentes pressões na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

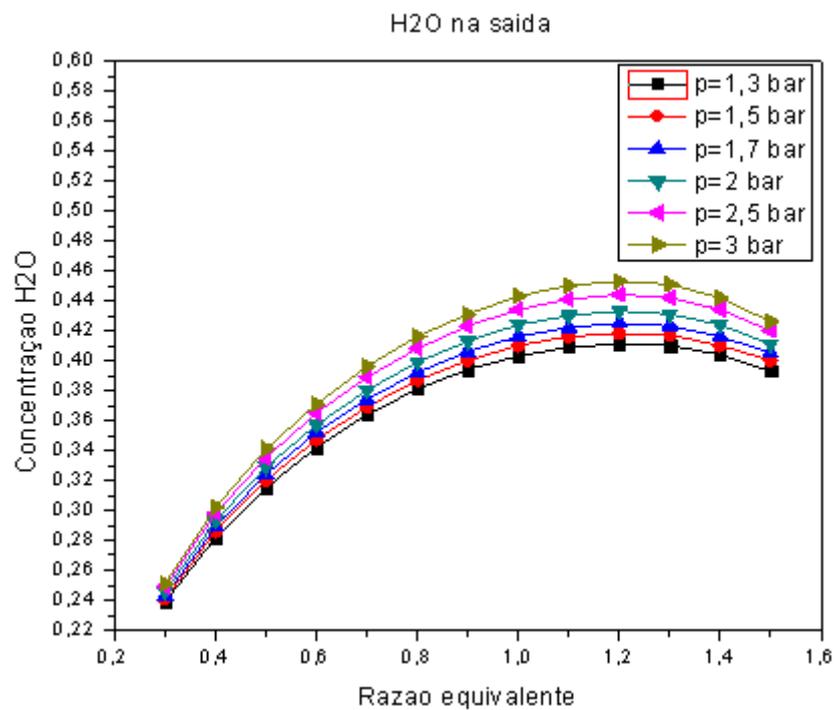


Figura 17. Concentrações de H2O para diferentes pressões na saída da tubeira. Fonte: Elaboração Própria

Depois do  $O_2$ , a água é o elemento com a maior quantidade de concentração após a combustão. As Fig. (16) e (17) comprovam isso, pois demonstram que as concentrações de  $H_2O$  são realmente significativas. As duas figuras apresentam um mesmo comportamento para a água, entretanto, na saída da tubeira, as diferenças na concentração para diferentes pressões exibem um maior intervalo do que na câmara de combustão. Observa-se também que as concentrações aumentam com o crescer da pressão e que o maior valor ocorre quando  $\phi = 1,2$ .

Os dois principais produtos da combustão  $CH_4/O_2$  são  $H_2O$  e  $CO_2$  e por esse motivo pode-se notar que as concentrações dos mesmos estão relacionadas entre si. Pelas figuras acima, percebe-se que o maior valor da concentração de  $CO_2$  ocorre quando as concentrações de água ainda estão um pouco distantes do valor de pico e que a medida que as concentrações de  $H_2O$  crescem, as de  $CO_2$  diminuem muito. Entretanto, as espécies consideradas menores, apresentam grande influência nesse comportamento, porque elas estão diretamente ligadas a produção e dissociação das duas espécies principais.

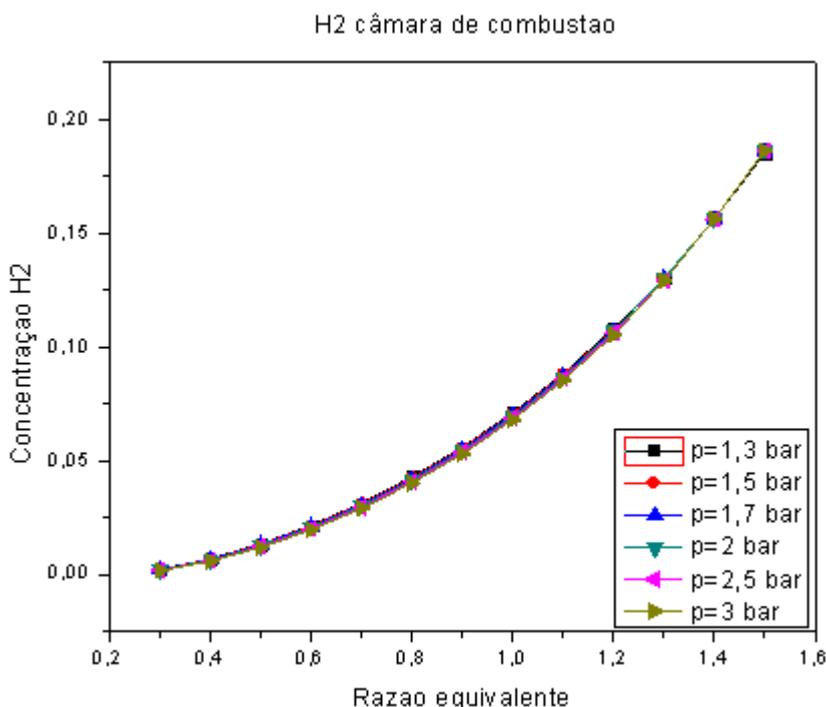


Figura 18. Concentrações de  $H_2$  para diferentes pressões na câmara de combustão.

Fonte: Elaboração Própria

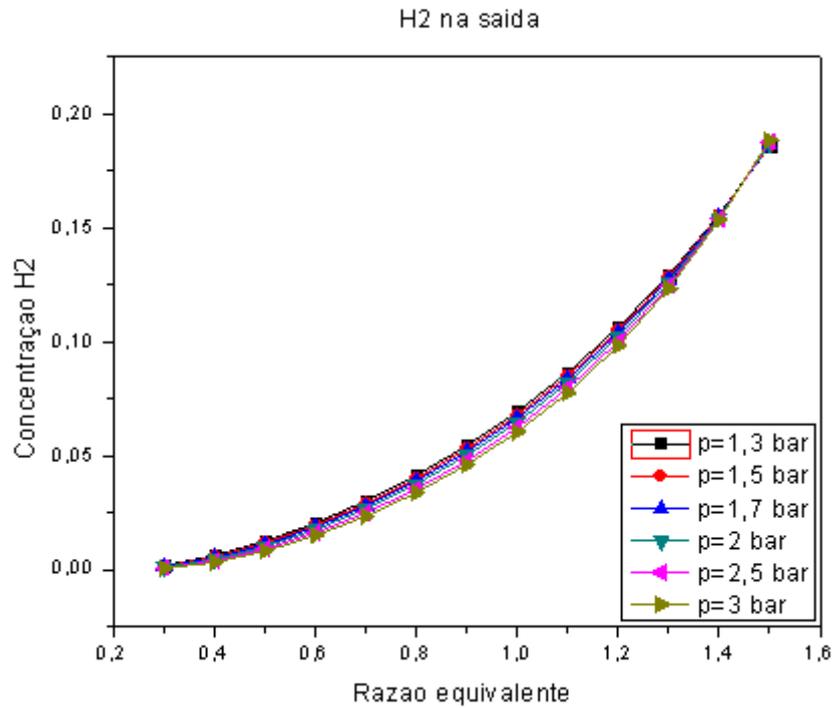


Figura 19. Concentrações de H2 para diferentes pressões na saída da tubeira.

Fonte: Elaboração Própria

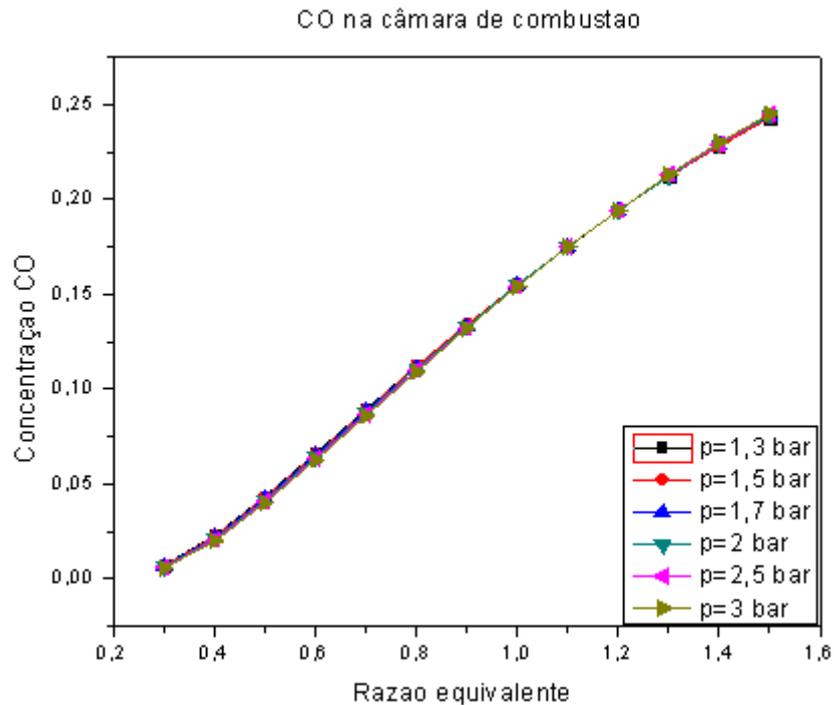


Figura 20. Concentrações de CO para diferentes pressões na câmara de combustão.

Fonte: Elaboração Própria

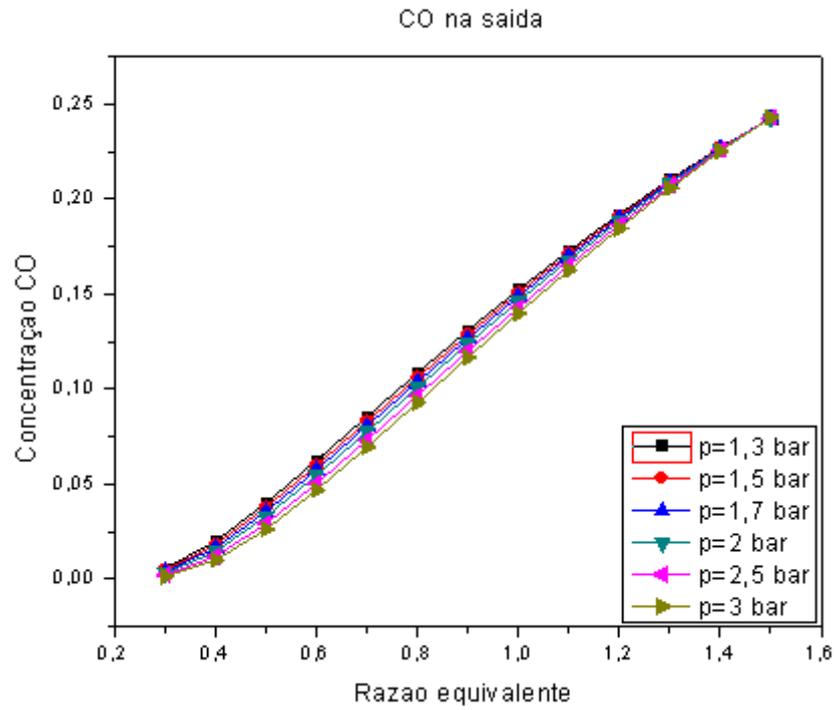


Figura 21. Concentrações de CO para diferentes pressões na saída da tubeira.

Fonte: Elaboração Própria

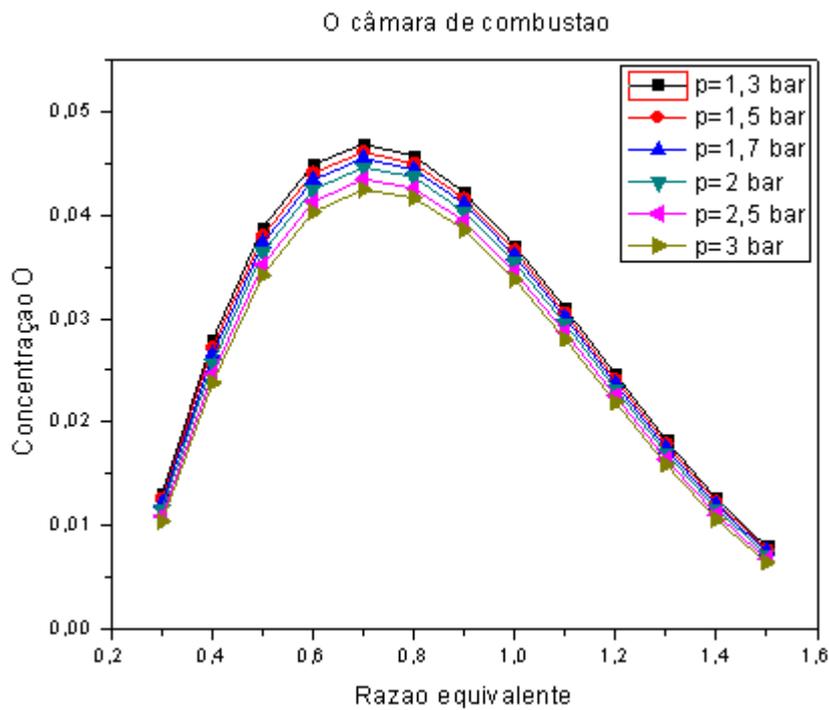


Figura 22. Concentrações de O para diferentes pressões na câmara de combustão.

Fonte: Elaboração Própria

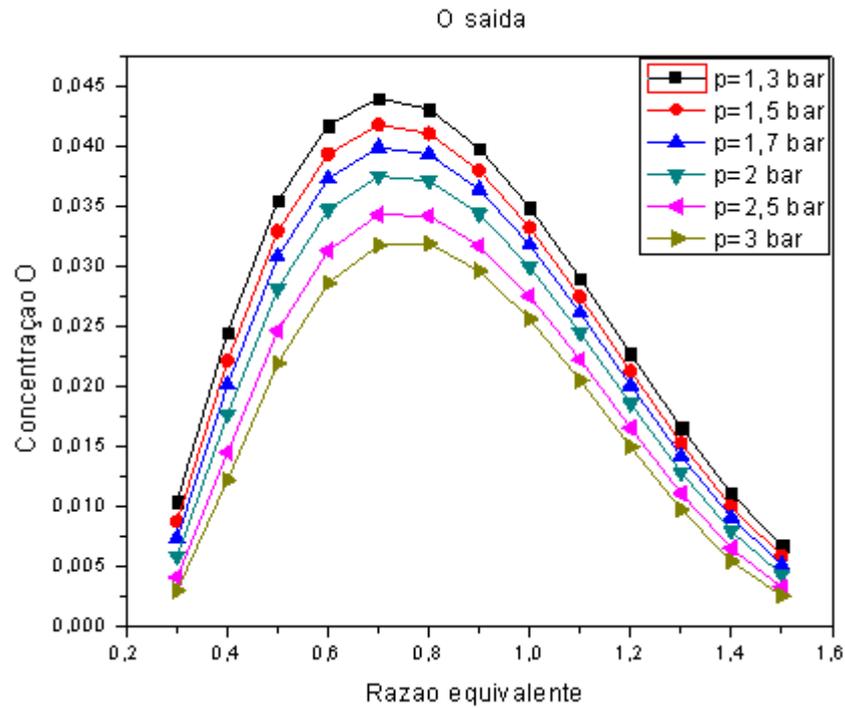


Figura 23. Concentrações de O para diferentes pressões na saída da tubeira. Fonte: Elaboração Própria

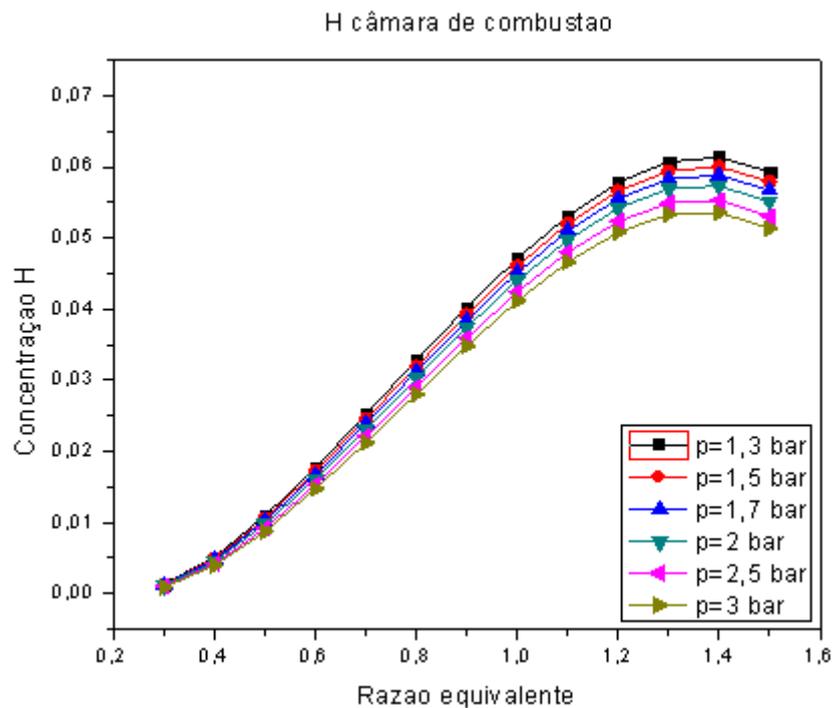


Figura 24. Concentrações de H para diferentes pressões na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

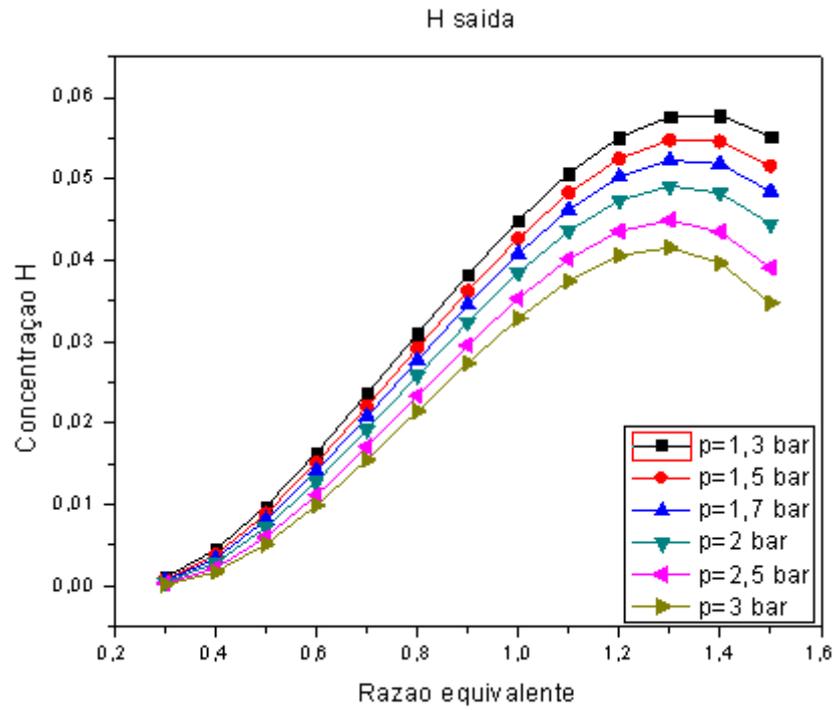


Figura 25. Concentrações de H para diferentes pressões na saída da tubeira. Fonte: Elaboração Própria

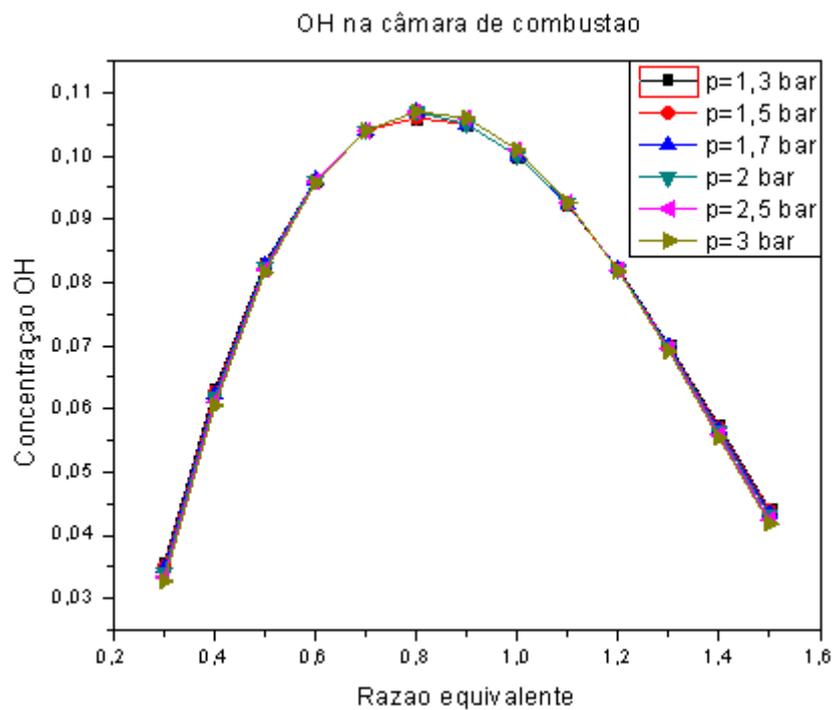


Figura 26. Concentrações de OH para diferentes pressões na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

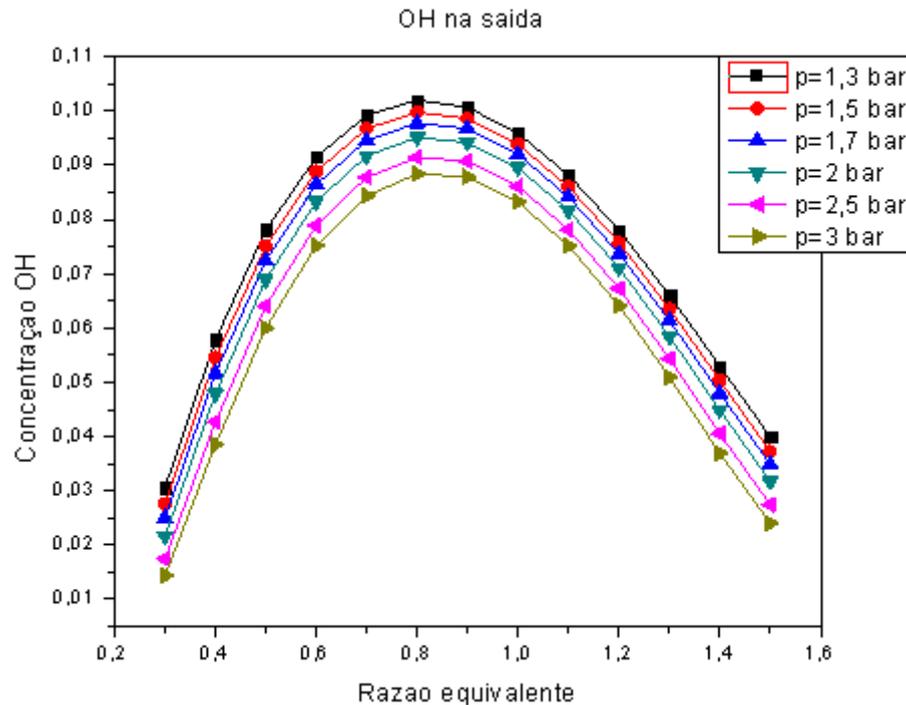


Figura 27. Concentrações de OH para diferentes pressões na saída da tubeira.

Fonte: Elaboração Própria

As Figuras (18) a (27) são as espécies menores da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  para o mecanismo JL-R. Por meios das figuras, é possível visualizar que as concentrações das espécies químicas apresentam valores pequenos, principalmente O, H e OH. Isso deve ao fato de as espécies menores serem extremamente instáveis e reagirem rapidamente para produzirem espécies mais estáveis.

Entretanto, CO e  $\text{H}_2$  apresentam valores de concentrações bem maiores do que as espécies citadas no parágrafo anterior. Através da Fig. (4), é possível notar que ambas espécies menores são os produtos das duas primeiras reações e estão relacionadas diretamente com a dissociação e produção de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ . Esse motivo explica a maior concentração dessas duas espécies em relação as outras espécies menores.

Ainda por meio da Fig. (4), percebe-se que quase todas as espécies menores estão relacionadas ou com a produção ou com a dissociação da água, esclarecendo o motivo das concentrações de  $\text{H}_2\text{O}$  serem maiores do que a de  $\text{CO}_2$ . E para produzir o  $\text{CO}_2$  necessita-se de uma reação reversível entre água e CO, isso justifica a razão pelo qual  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  apresentarem comportamentos diferentes à medida que aumenta a razão equivalente.

Pode ser notado também que as espécies menores não apresentam grandes diferenças entre si nos valores das concentrações na câmara de combustão para as diferentes pressões. Entretanto na saída da tubeira, observa-se que as concentrações apresentam uma variação significativa nos respectivos valores. Ainda é importante perceber que as concentrações das espécies menores aumentam com a diminuição da pressão tanto na câmara de combustão quanto na saída da tubeira. Esse comportamento é contrário nas espécies maiores, pois a concentração aumenta com o crescimento da pressão.

O comportamento da temperatura está ligado diretamente as reações químicas e as concentrações das espécies. Por essa razão, foram plotados gráficos relacionando temperaturas e concentrações.

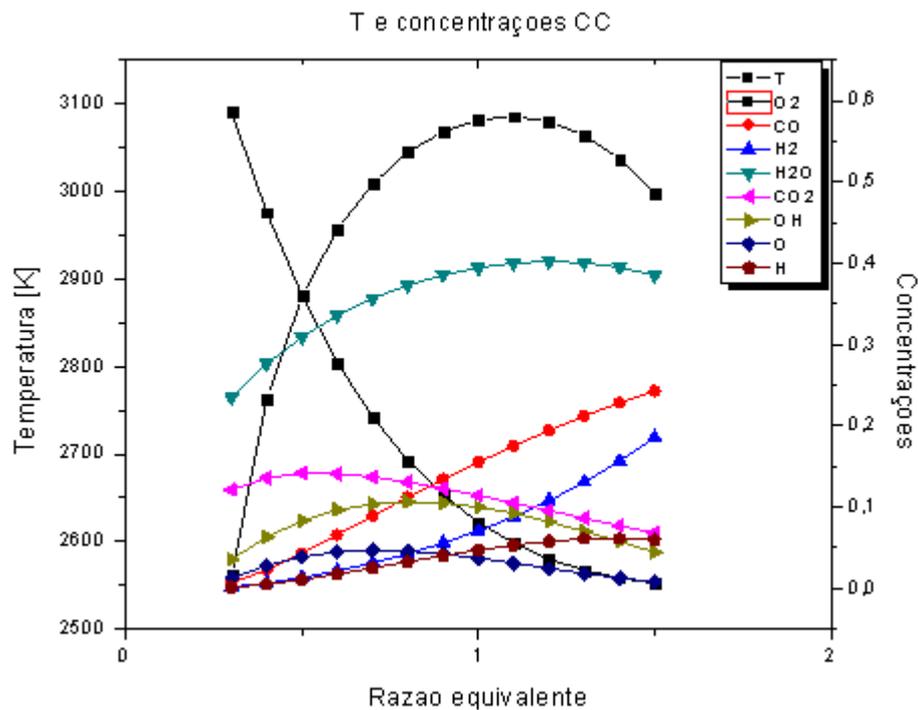


Figura 28. Temperatura e concentrações para uma pressão de 1,3 bar na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

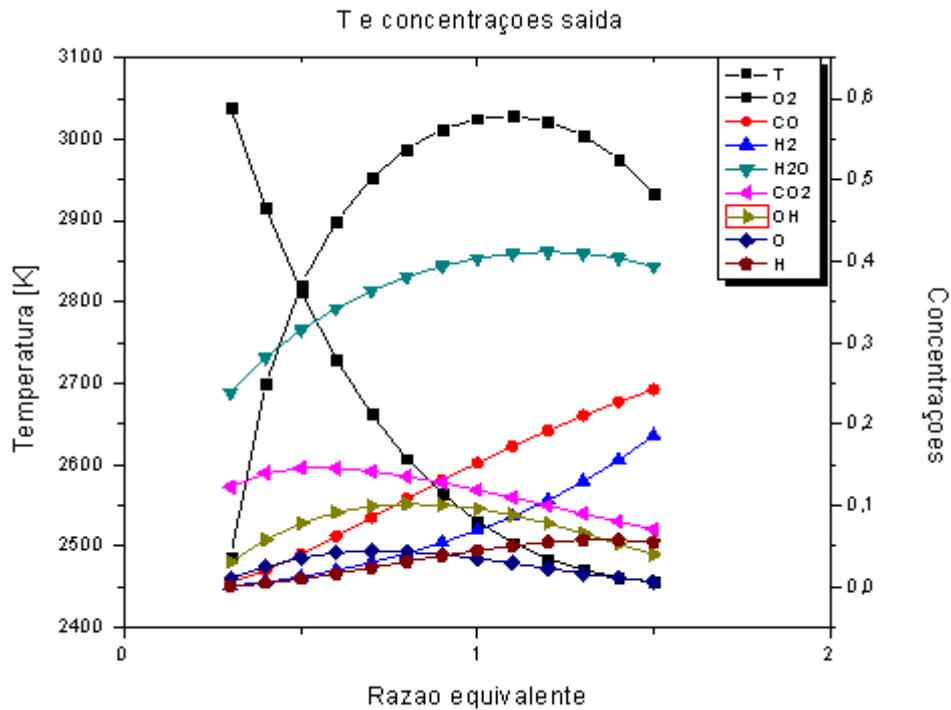


Figura 29. Temperatura e concentrações para uma pressão de 1,3 bar na saída da tubeira. Fonte: Elaboração Própria

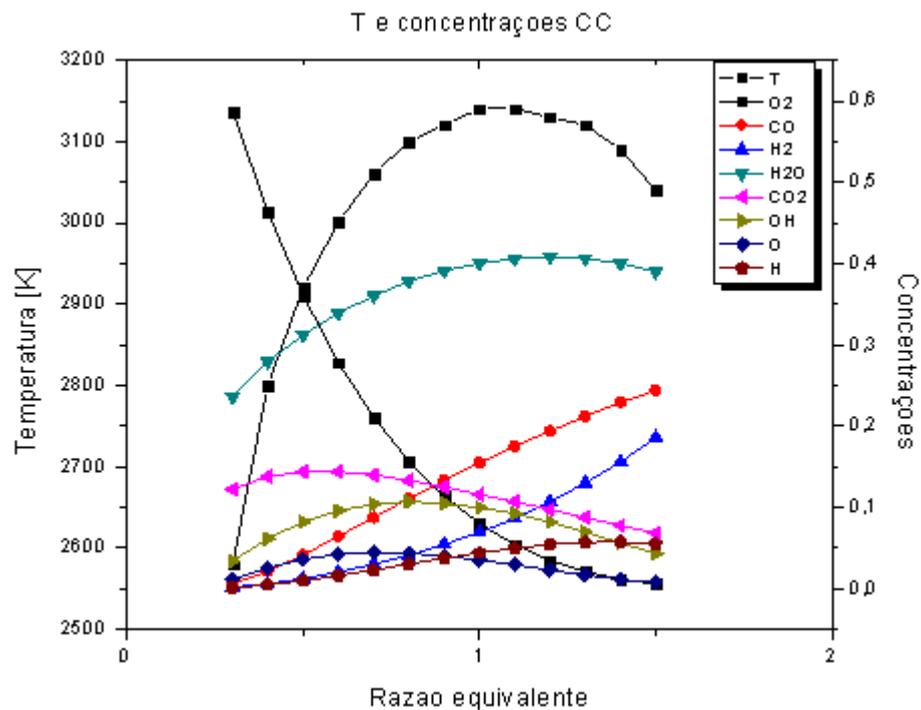


Figura 30. Temperatura e concentrações para uma pressão de 2 bar na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

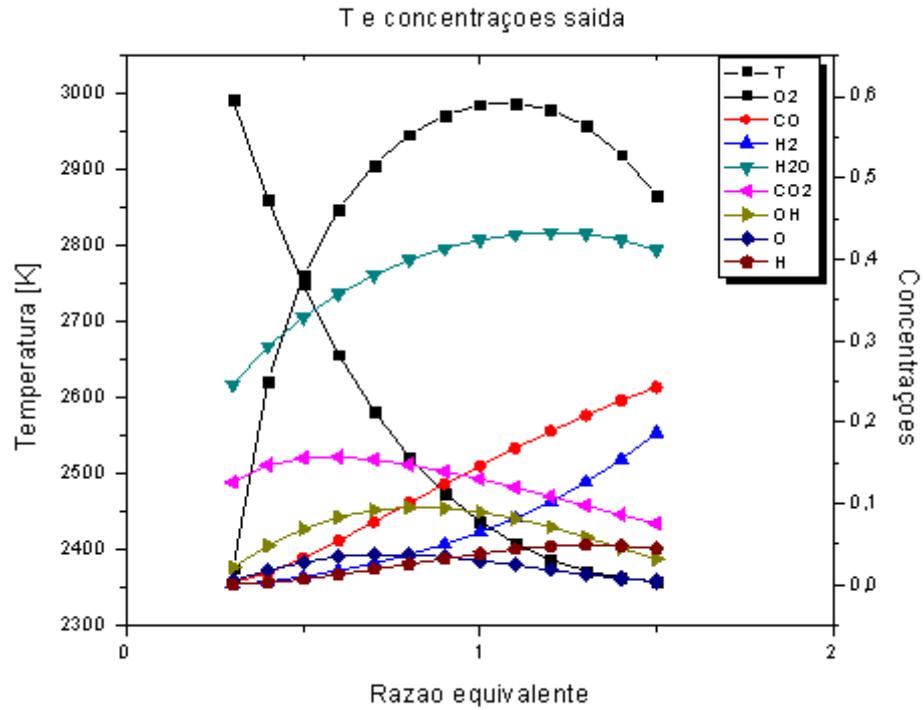


Figura 31. Temperatura e concentrações para uma pressão de 2 bar na saída da tubeira. Fonte: Elaboração Própria

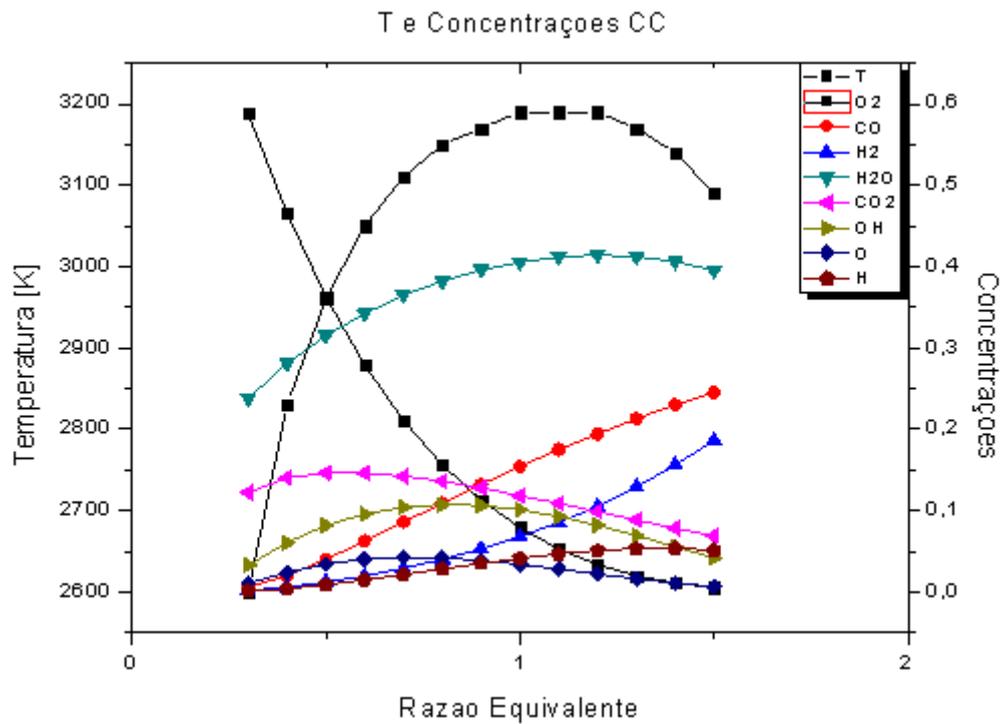


Figura 32. Temperatura e concentrações para uma pressão de 3 bar na câmara de combustão. Fonte: Elaboração Própria

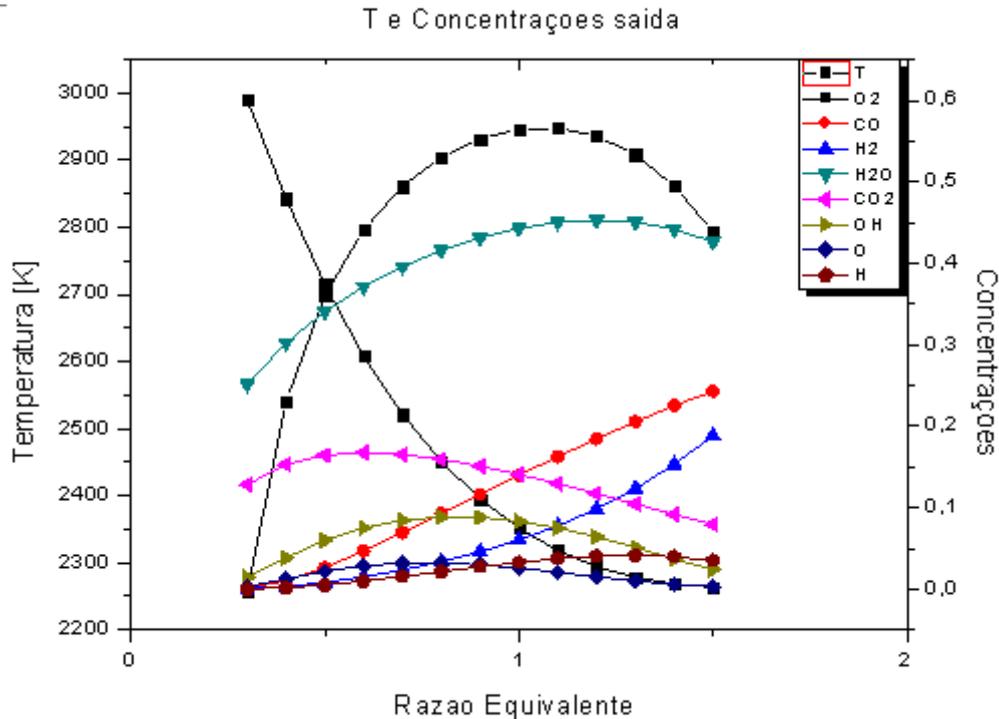


Figura 33. Temperatura e concentrações para uma pressão de 3 bar na saída da tubeira. Fonte: Elaboração Própria

Foram avaliados o comportamento da temperatura e das concentrações para três valores diferentes de pressão (1,3; 2; e 3 bar). Através das Fig. de (28) a (33), constata-se que as temperaturas e as concentrações apresentam o mesmo comportamento tanto na câmara de combustão e na saída da tubeira para as três diferentes pressões e é possível verificar que a temperatura aumenta na câmara de combustão com o aumento da pressão e diminui na saída da tubeira com o crescimento da mesma. Comportamento esse já demonstrado nas Fig. (10) e (11).

É possível observar pelas figuras que a água se torna o elemento de maior concentração tanto na câmara de combustão quanto na saída da tubeira após uma razão equivalente entre 0,5 e 0,6. Mas não é viável de se observar diferenças nas concentrações químicas através das figuras dadas, motivando a realização dos gráficos a seguir.

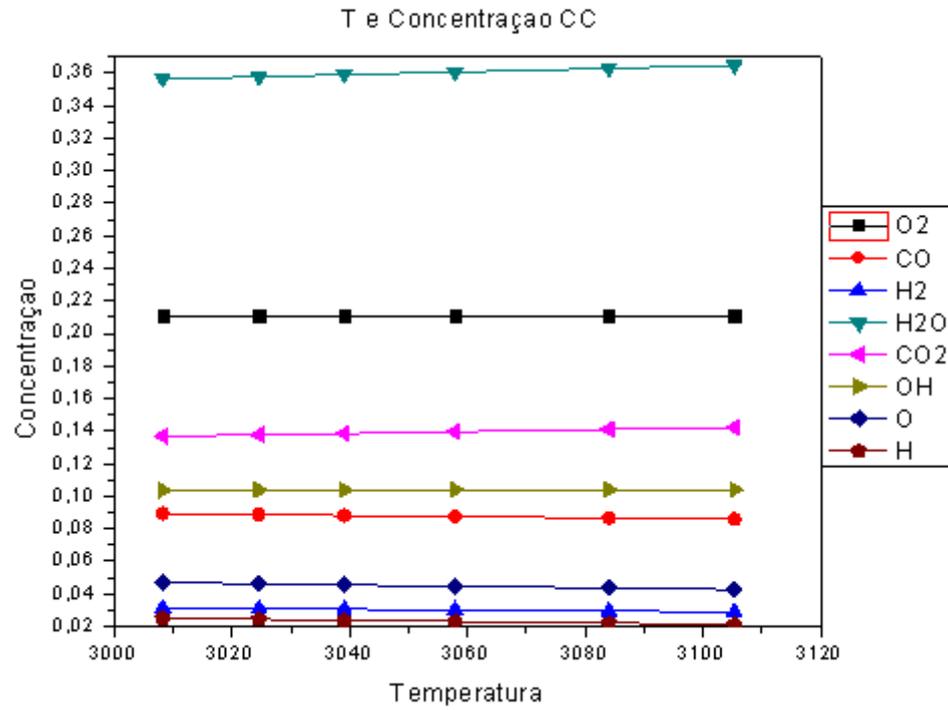


Figura 34. Temperatura e Concentrações na câmara de combustão para  $\phi = 0,7$ .

Fonte: Elaboração Própria

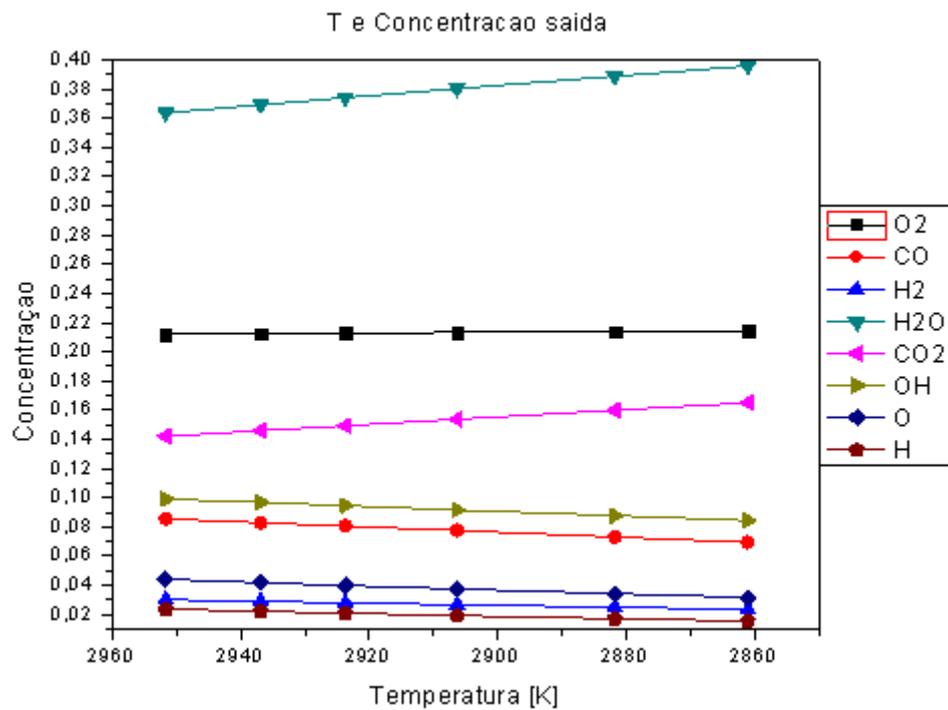


Figura 35. Temperatura e Concentrações na saída da tubeira para  $\phi = 0,7$ . Fonte:

Elaboração Própria

As Figuras (34) e (35) tem uma razão equivalente de 0,7 pelo fato de essa ser o  $\phi$  utilizado nos testes experimentais do ignitor. As figuras mostram as concentrações em função da temperatura, sendo cada ponto das retas um valor diferente de pressão (1,3; 1,5; 1,7; 2; 2,5; e 3 bar respectivamente).

Por meio da Fig. (34), observa-se que as concentrações são praticamente constantes para as diferentes pressões e a temperatura aumenta com o crescimento da pressão. Já a Fig. (35) demonstra uma temperatura decrescente com o aumento da pressão. As concentrações de  $H_2O$  e  $CO_2$  aumentam com a pressão e as concentrações das espécies menores diminuem. Sendo assim, pode-se afirmar que essas variações nas concentrações das espécies químicas são os principais responsáveis pela diminuição da temperatura com pressão na saída da tubeira.

#### 4.1. COMPARAÇÃO ENTRE CÁLCULOS PRELIMINARES E DADOS EXPERIMENTAIS

O software CEA<sup>®</sup> é uma ferramenta computacional que considera cálculos ideais, ou seja, sem perdas. O mesmo apresenta uma combustão instantânea e que todo o combustível é consumido para razões equivalentes baixas. Ainda, a chama é suposta como homogênea, um mesmo dado de temperatura é medido em todos os pontos de um plano, e por ser uma combustão ideal, os valores encontrados são os de temperaturas das chamas adiabáticas. Então, as temperaturas têm os maiores valores possíveis da combustão  $CH_4/O_2$ .

A comparação será apenas para os valores de temperatura na câmara de combustão, uma vez que os dados medidos para os testes experimentais foram medidos nessa referida região.

Comparando a Figura (10) com a Tab. (1) percebe-se que os valores obtidos pelos cálculos no CEA<sup>®</sup> são bem maiores do que os dados experimentais. A menor temperatura na simulação é mais de 700 K superior do que a maior temperatura dos experimentos. Esses resultados previstos pelos cálculos numéricos maiores do que os dados experimentais já eram esperados, uma vez que o software utilizado não considera perdas e apresenta uma combustão ideal.

Entretanto pode-se observar que os dados de temperaturas encontrados nos experimentos variam muito de um teste para o outro, Tab. (1), e os valores

numéricos seguem um comportamento padrão, Fig. (10), devido ao fato das chamas serem homogêneas.

Esses vários resultados diferentes encontrados nos experimentos podem ser explicados pelo comportamento da região de combustão dentro do ignitor do tipo tocha. Tendo isso em visto, realizou-se outra simulação preliminar para esclarecer o comportamento da região de interesse da combustão e os diferentes dados de temperaturas encontrados.

A nova simulação foi realizada no Fluent Ansys® e considerou-se a injeção do oxidante e do combustível como a que acontece no ignitor do tipo tocha. Essa simulação é preliminar, pois a mesma teve o intuito somente de demonstrar o comportamento esperado da região de interesse da combustão e os valores de temperatura no ignitor.

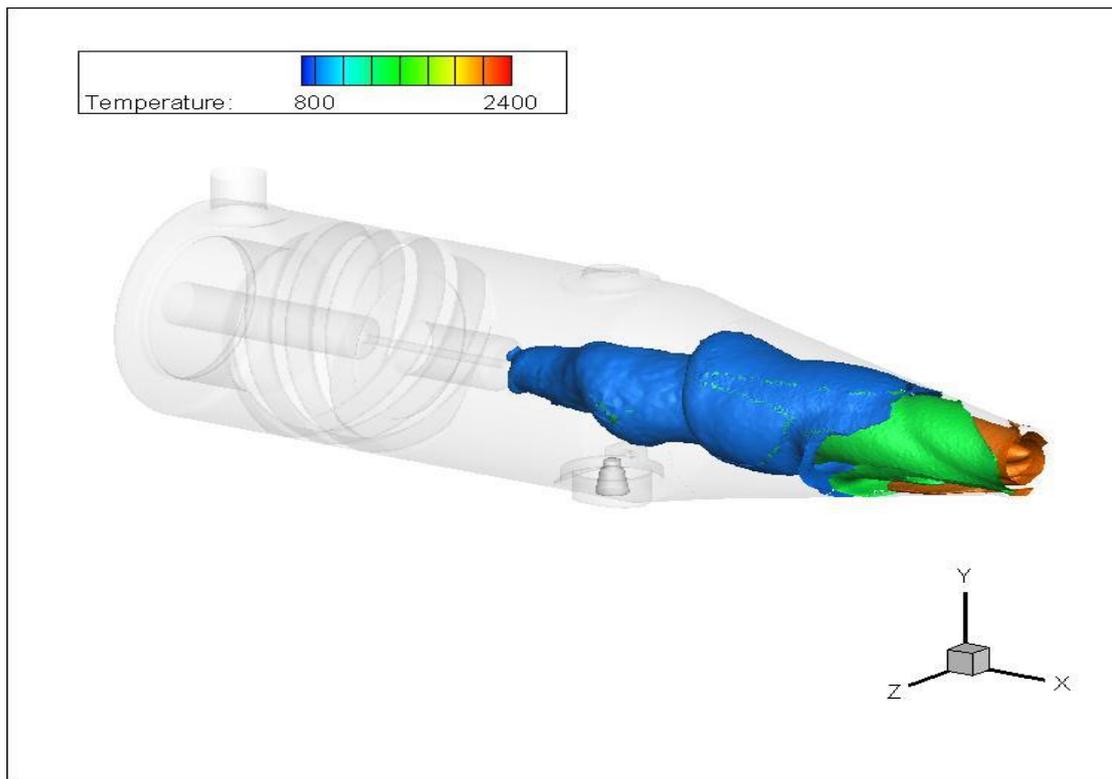


Figura 36. Comportamento esperado da região de interesse da combustão dentro do ignitor do tipo tocha. Fonte: Elaboração Própria

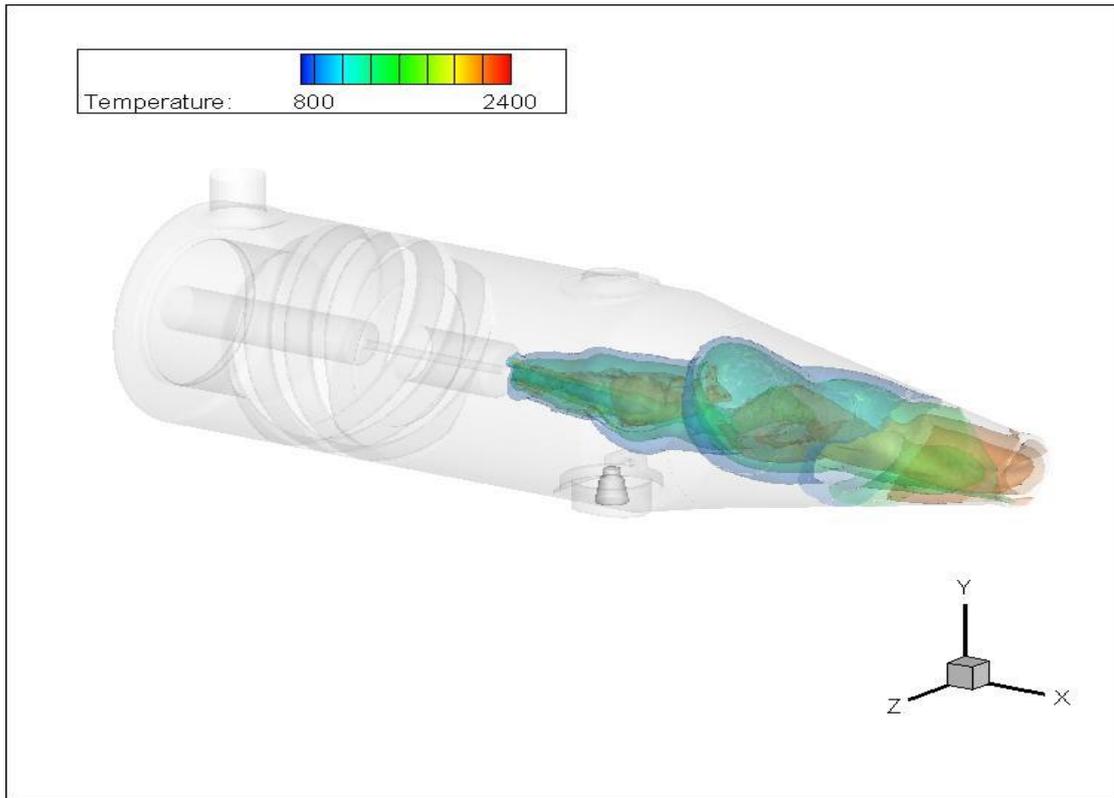


Figura 37. Comportamento esperado da região de interesse da combustão mais interna dentro do ignitor do tipo tocha. Fonte: Elaboração Própria

Por meio das Figuras (36) e (37), onde três campos de temperaturas ( $T = 800$  K,  $T = 1400$  K e  $T = 2400$  K respectivamente) estão representados, percebe-se o comportamento esperado da região de interesse da combustão dentro do ignitor. É possível observar que essa região tem um movimento rotacional devido a forma como o oxidante é injetado e, ainda, pode-se visualizar que as temperaturas não são homogêneas em um mesmo plano da chama como indica os cálculos no CEA<sup>®</sup>. Nota-se também que a região de interesse da combustão é mais fria externamente e apresenta os maiores valores na parte interna.

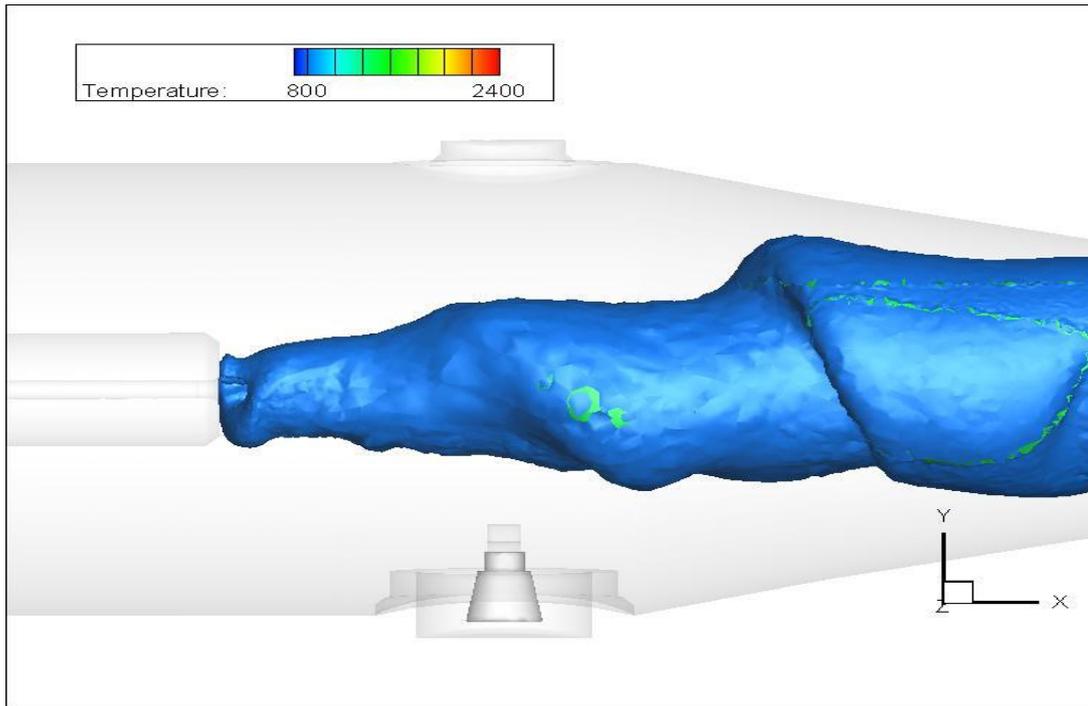


Figura 38. Comportamento esperado da região de interesse da combustão na zona de medições das temperaturas. Fonte: Elaboração Própria

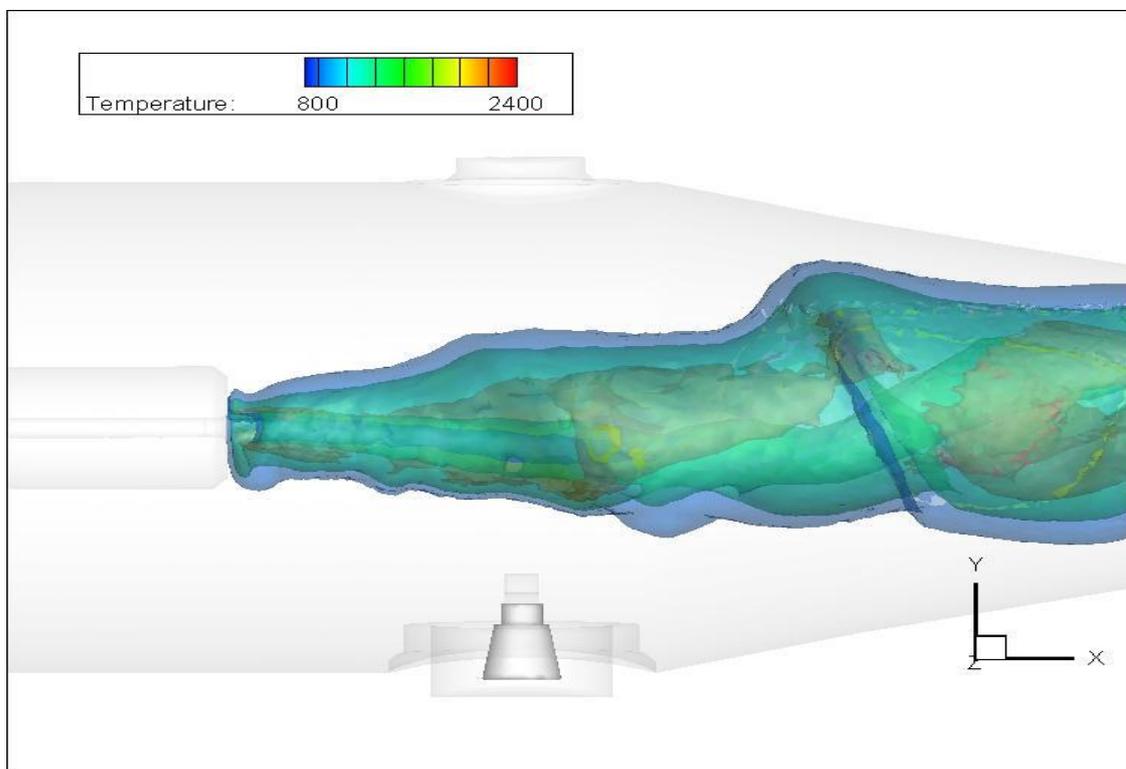


Figura 39. Comportamento esperado da região de interesse da combustão mais interna na zona de medições. Fonte: Elaboração Própria

Sabe-se, pela Figura (5), que a zona de medição das temperaturas encontra-se bem na mesma linha, eixo y, que a vela de ignição. As Fig. (38) e (39) mostram o comportamento esperado da região de interesse da combustão justamente nessa zona. Através da Fig. (38), percebe-se que essa região tem o menor valor de temperatura na parte externa e, por meio da Fig. (39), observa-se que os maiores valores de temperaturas se encontram internamente a essa região.

Ainda é possível de visualizar que no centro da região de interesse da combustão, próximo ao injetor de combustível, a temperatura tem um valor baixo, isso é explicado pelo fato do metano estar sendo injetado e o mesmo ainda não sofreu a combustão com o oxigênio.

Com o intuito de tornar mais claro a explicação dos diferentes valores de temperaturas encontradas no experimento, plotou-se dois gráficos (um de temperatura e outro de concentrações das espécies químicas) com os valores obtidos no eixo y posicionado entre a vela de ignição e o adaptador do par termoeletrico.

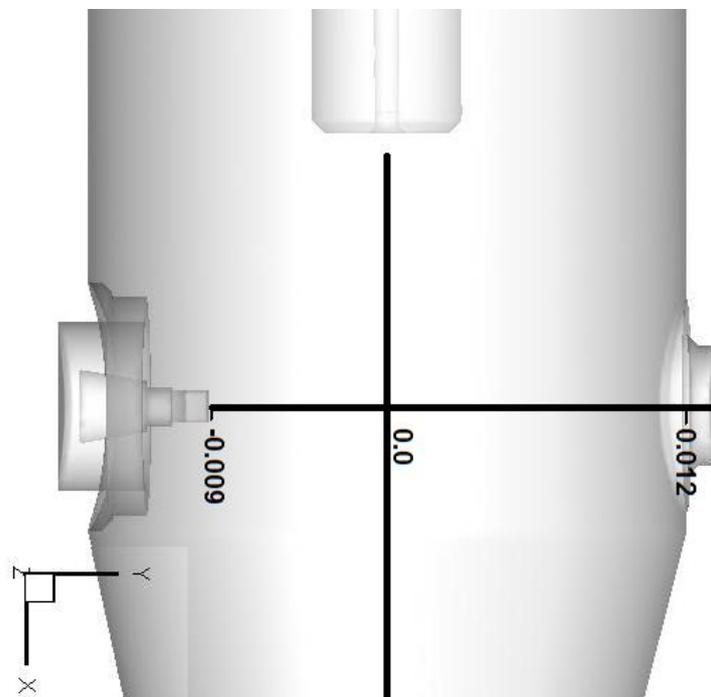


Figura 40. Eixo y na zona de medição. Fonte: Elaboração Própria

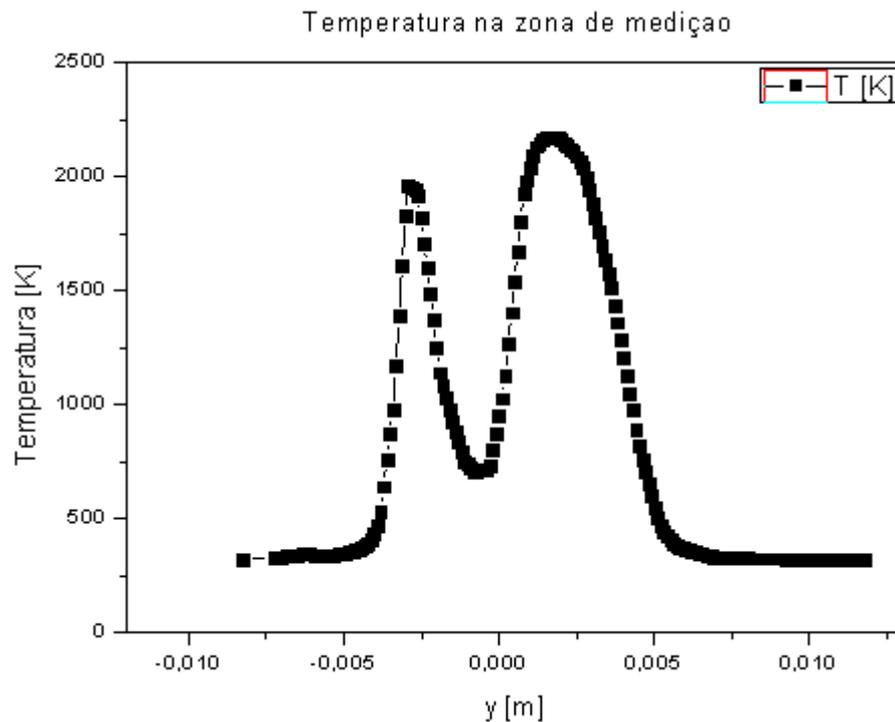


Figura 41. Valores esperados de temperaturas na zona de medição. Fonte: Elaboração Própria

A Figura (40) relata o eixo  $y$  na zona de medição. Como visto, o eixo  $y$  é posicionado entre a vela de ignição e o adaptador do par termoeletrico, onde a origem do eixo indica o centro do ignitor. A vela de ignição está localizada em  $-0,009$  metros e o adaptador em  $0,012$  metros.

A Figura (41) demonstra o comportamento esperado da temperatura no eixo  $y$ . Assim, através da Fig. (41), percebe-se que a temperatura tem valores mais baixos próximos das extremidades e no centro do ignitor. O maior valor é encontrado um pouco acima do centro.

Esses diferentes valores de temperaturas podem ser explicados pelas concentrações das diferentes espécies químicas da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ . A figura a seguir mostra o comportamento das espécies na zona de medição.

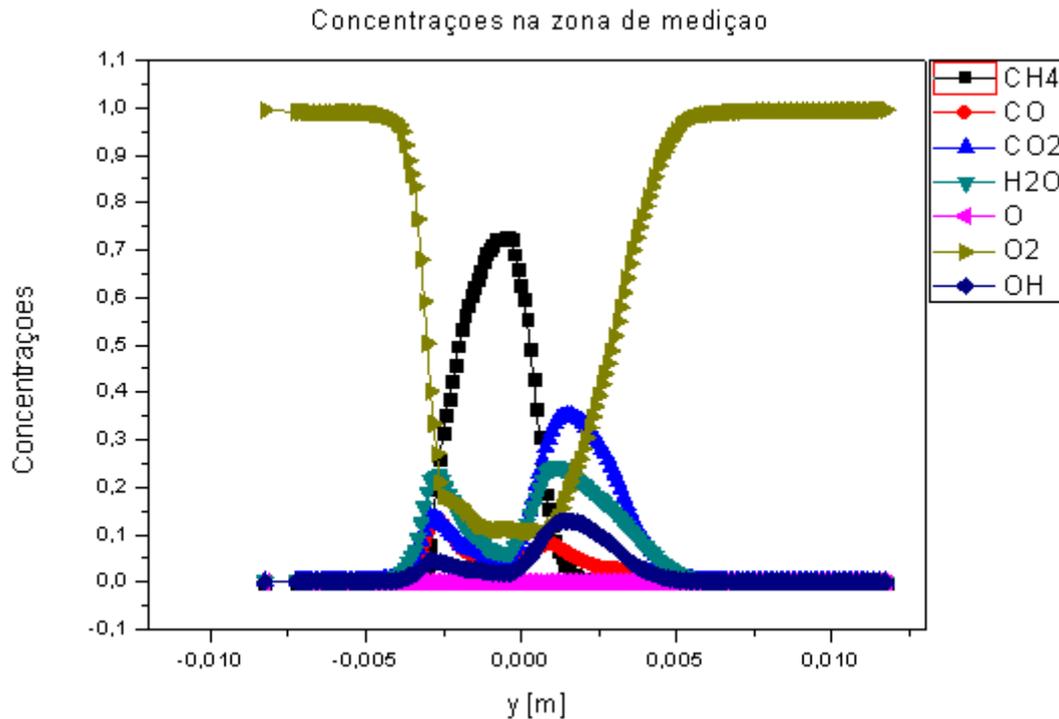


Figura 42. Concentrações esperadas das espécies químicas na zona de medição.  
 Fonte: Elaboração Própria

A partir da Figura (42), percebe-se que nas extremidades do ignitor há somente oxigênio e no centro, só metano. Isso explica o comportamento esperado da temperatura na Fig. (41), uma vez que as temperaturas das extremidades são baixas por causa que há só oxigênio nessa região e o mesmo ainda não reagiu com o metano. No centro ocorre da mesma maneira, pois só há metano que ainda não se misturou com o oxigênio.

Além disso, através da Figura (42), é possível observar que a maior temperatura calculada na Fig. (41) se encontra na região onde há a maior concentração de  $\text{CO}_2$ . Por outro lado, o segundo maior pico de temperatura ocorre abaixo do centro do ignitor, onde foi registrado uma maior concentração de  $\text{H}_2\text{O}$ .

Como o par termoelétrico faz as medições experimentais nessa mesma zona e a região de interesse da combustão não é homogênea, diferentes valores serão encontrados nos experimentos para a temperatura, conforme foi mostrado nas figuras acima.

## 5. SIMULAÇÃO NO FLUENT ANSYS®

A partir dos cálculos preliminares, ficou evidente tanto pelos resultados do CEA® quanto para os valores da simulação prévia no Fluent Ansys® que a distribuição das espécies químicas determina os campos de temperaturas na região da combustão.

Portanto, o intuito dos cálculos definitivos para este trabalho é realizar uma simulação mais completa no Fluent Ansys® do ignitor do tipo tocha. Para tanto, a partir do sistema modelado em CAD, como mostra a Fig. (6), serão feitos cálculos numéricos utilizando os parâmetros de entrada definidos pelo CEA®. Assim, o comportamento do campo de temperaturas na chama será explicado com mais detalhes.

### 5.1. METODOLOGIA DA SOLUÇÃO

Para os novos cálculos, utilizou-se o Workbench Ansys® com a finalidade de trabalhar a geometria e a malha, e o Fluent Ansys® com o objetivo de fazer a simulação da combustão no ignitor.

As simulações foram calculadas no Fluent Ansys® da seguinte maneira: uma primeira simulação apenas com o fluido frio, sem combustão, e uma segunda, levando em consideração a ignição dos propelentes resultando na combustão dos mesmos, fluido quente.

Os cálculos foram realizados baseados na pressão, *Pressure-Based*, e em regime permanente, onde não há variação com o tempo. Além disso, como os cálculos levam em considerações as propriedades do fluido, como temperatura, pressão, calor específico, a equação da energia também foi utilizada.

Para representar a simulação o mais próximo possível da realidade, o fluido não pode ser considerado laminar, então utilizou um dos modos de turbulência fornecido pelo Fluent Ansys®. Como já visto, o oxidante é injetado no ignitor de forma rotacional, então foram realizadas simulações com os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  RNG e  $k-\epsilon$  Realizable pois esses modelos representam fluidos rotacionais de maneira precisa, e o melhor entre eles será escolhido (FLUENT, 2009).

Além disso, dentro do ignitor ocorre a combustão metano/oxigênio que deve ser representada na simulação. Para tanto, foi escolhido o *Species Transport* para oxidante e combustível não pré-misturados, modelo que descreve como as espécies químicas deslocam-se pelo ignitor.

O software apresenta alguns modelos de combustão na biblioteca, mas esses modelos simplificados superestimam a temperatura máxima da combustão. Portanto a solução é importar o mecanismo químico que satisfaz o objetivo da simulação. Conforme visto, o esquema químico escolhido foi o proposto por FRASSOLDATI et al., 2014, o mecanismo JL-R (FLUENT, 2009).

O mecanismo JL-R obteve resultados satisfatórios em FRASSOLDATI et al., 2014 e em ACAMPORA & MARRA, 2017, em particular, o caso de estudo desse artigo foi semelhante ao estudado nesse trabalho. Então, o mecanismo JL-R é aceitável para representar a combustão de estudo.

O método utilizado para relacionar a combustão com a turbulência foi o Eddy-Dissipation-Concept (EDC). Esse método apresenta um mecanismo químico detalhado para chamas turbulentas, então o mesmo consegue representar com acurácia a combustão desse trabalho (FLUENT, 2009).

As condições de contorno para a validação dos métodos foram fornecidas pelo o grupo de propulsão da FGA. Assim, para a injeção, tanto do metano como do oxigênio, foi utilizada o fluxo de massa na entrada e no final da tubeira, colocou-se a pressão medida na saída dessa região.

Após determinadas as configurações para a simulação, o próximo passo é definir a solução dos cálculos numéricos. O método de solução escolhido foi o SIMPLEC, o qual usa uma relação entre velocidade e pressão para reforçar a conservação da massa e obter os campos de pressão. O esquema SIMPLEC pode ser calculado tanto em primeira como em segunda ordem. As simulações foram feitas utilizando as duas ordens citadas (FLUENT, 2009).

Antes de começar a simulação, é preciso inicializar os campos do fluido no domínio dos cálculos. Isso é feito na *Solution Initialization* na parte de solução do Fluent Ansys®. Assim, o software permite que sejam colocados os valores iniciais das diferentes propriedades do fluido. No caso desse trabalho, foram aplicados como valores iniciais a pressão e temperatura ambientes (FLUENT, 2009).

Enfim, toda essa metodologia da solução foi usada para validar a malha e os métodos que serão utilizados para as simulações desse trabalho.

## 5.2. VALIDAÇÃO DA MALHA

Para a validação da malha, primeiro usou-se a ferramenta de geometria denominada SpaceClaim para extrair o volume do CAD, deixando apenas o caminho do fluido. Conforme figura abaixo.

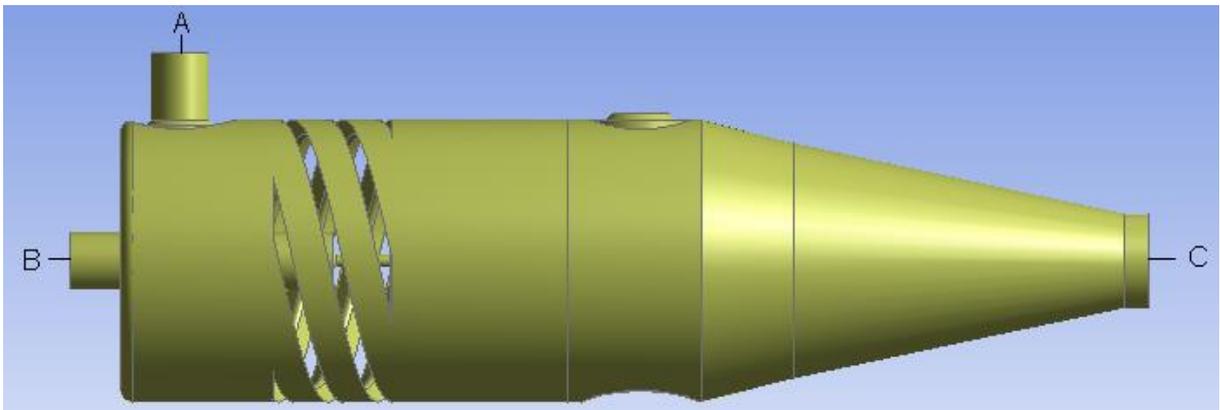


Figura 43. Ignitor com o volume extraído. Fonte: Elaboração Própria

A Figura (43) demonstra o que foi relatado no parágrafo anterior, onde A é a região de entrada do oxidante, B é a do combustível e C é a região de saída do ignitor.

Após, utilizou-se o DesignModeler, outra ferramenta para geometria do Workbench Ansys<sup>®</sup>. Nessa ferramenta, foi desenhado um cilindro dentro do ignitor com o intuito de obter-se uma malha mais refinada na principal região de combustão, onde as reações de combustão serão melhores desenvolvidas.

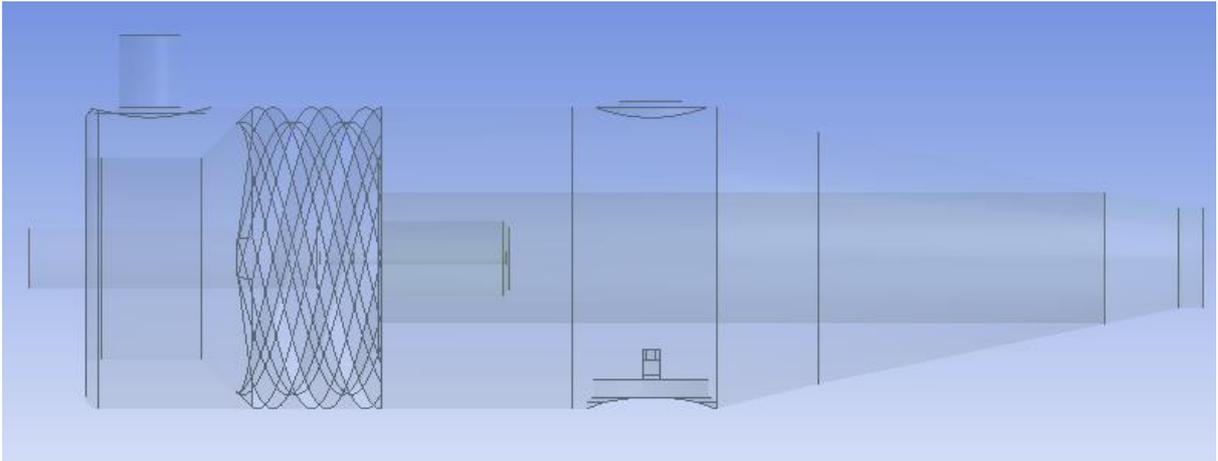


Figura 44. Ignitor com o volume extraído e com o cilindro presente. Fonte: Elaboração Própria

Pela Figura (44), percebe-se o cilindro feito na principal região de combustão. Esse cilindro é de essencial importância na hora de gerar a malha para a geometria, pois o mesmo permitirá obter uma malha mais refinada nessa região que é crítica para a simulação numérica.

Com a geometria pronta, o próximo passo foi realizar a malha. Para isso, usou-se o Meshing, uma das ferramentas para gerar malhas. Então, foram feitas quatro malhas diferentes. As mesmas estão descritas na tabela a seguir.

Tabela 3. Tabela do número de células para as quatro malhas. Fonte: Elaboração Própria

<b>Nome representativo</b>	<b>Números de células</b>
A	1009842
B	1486636
C	1652363
D	1959453

Essas malhas decorreram do seguinte padrão de refinamento: a partir malha A aumentou-se aproximadamente 500000 elementos para a malha B e cerca de 1000000, para a malha D. Para a malha C, aumentou-se aproximadamente 200000 células em relação a malha B.

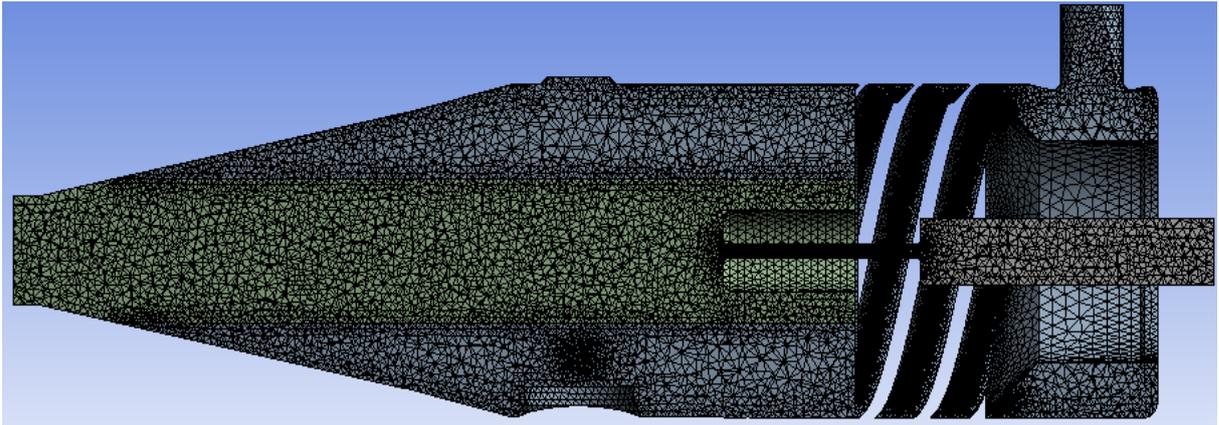


Figura 45. Malha A. Fonte: Elaboração Própria

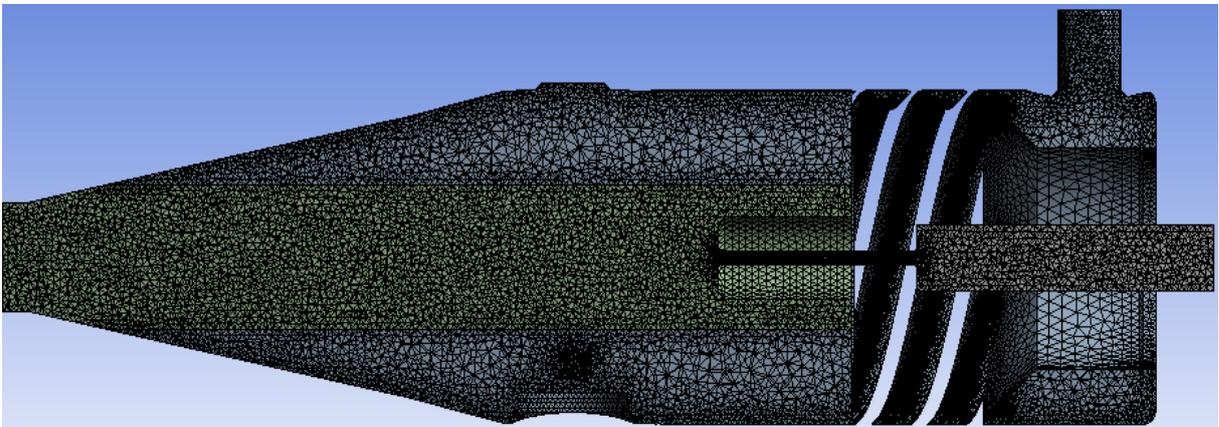


Figura 46. Malha B. Fonte: Elaboração Própria

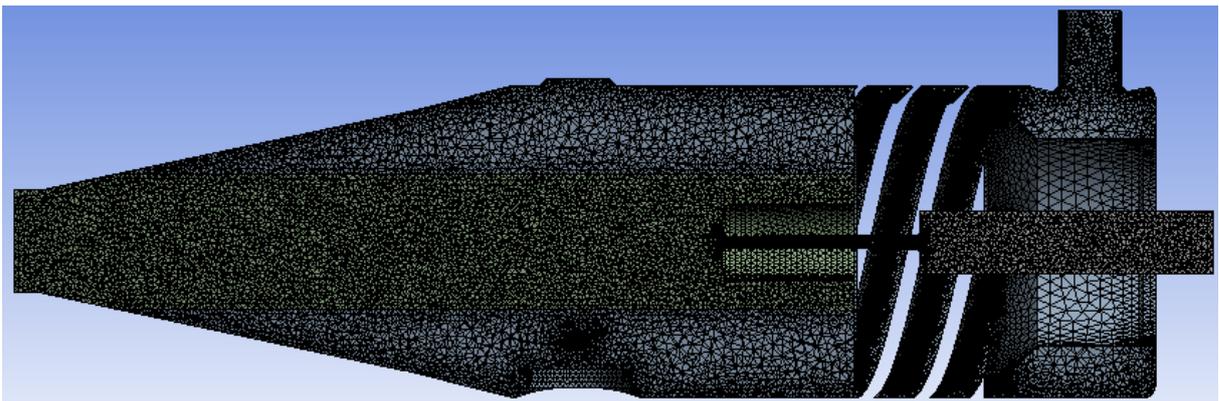


Figura 47. Malha C. Fonte: Elaboração Própria

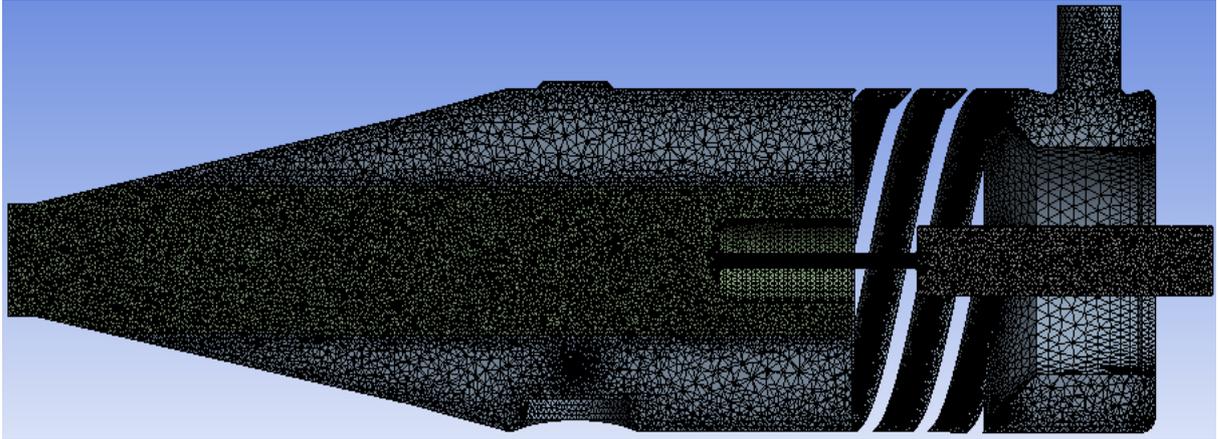


Figura 48. Malha D. Fonte: Elaboração Própria

A partir das Figuras (45) a (48), pode ser notado a diferença quanto ao refinamento das malhas. As figuras representam uma visão do ignitor cortada no meio para melhor demonstrar o comportamento da malha.

Vale ressaltar também que a malha está bem refinada no cilindro central, intuito desse cilindro, e bem como nas paredes do ignitor. Conforme deseja-se uma simulação o mais próximo possível da realidade, então necessita-se de uma malha bem refinada nas paredes para simular com uma maior precisão os efeitos dessa região na combustão.

Em todas as quatro malhas foram feitos cálculos seguindo a metodologia da solução e a partir dos valores finais, foi escolhido a malha que será utilizada para gerar os resultados desse trabalho.

A malha escolhida para representar o caso foi a B. A mesma foi selecionada a partir de uma análise dos resultados de temperatura, das velocidades nas direções x e z e das concentrações de  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$  para as quatro diferentes malhas.

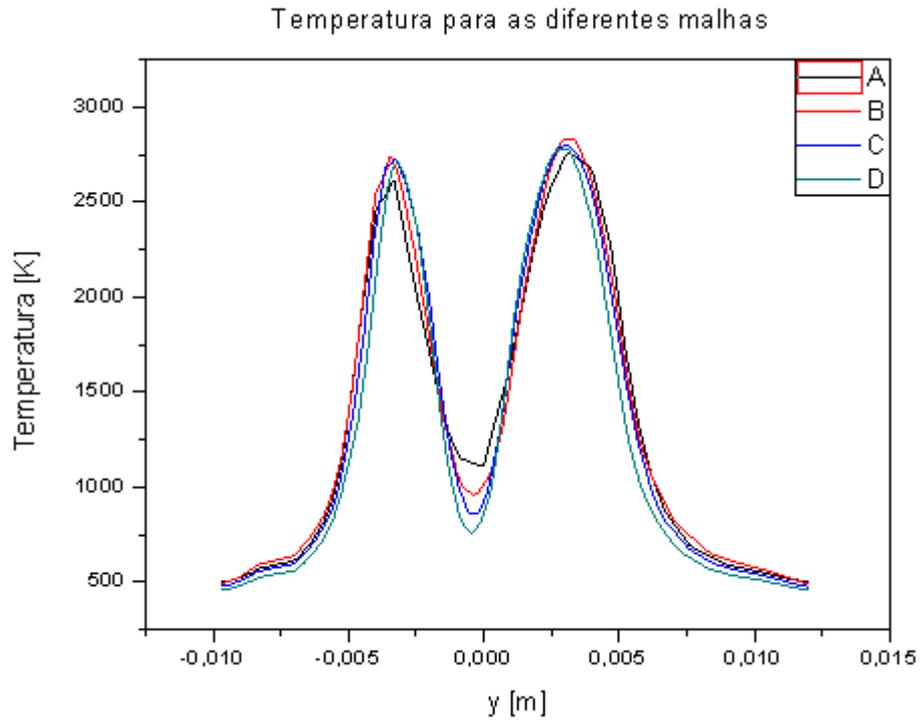


Figura 49. Temperatura para as quatro diferentes malhas na zona de medição.  
Fonte: Elaboração Própria

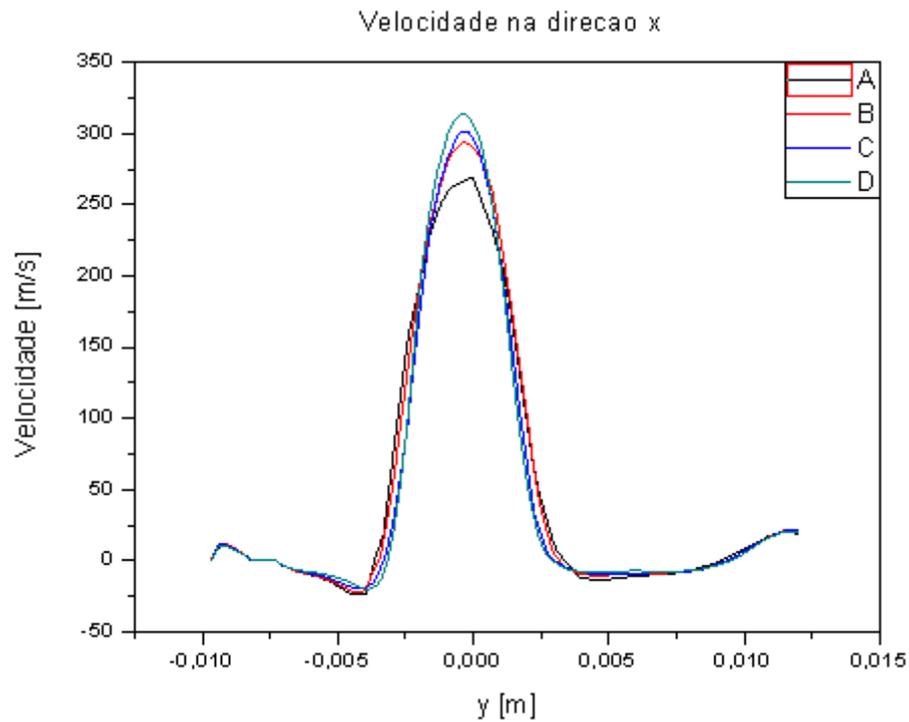


Figura 50. Velocidade na direção x para as quatro diferentes malhas. Fonte:  
Elaboração Própria

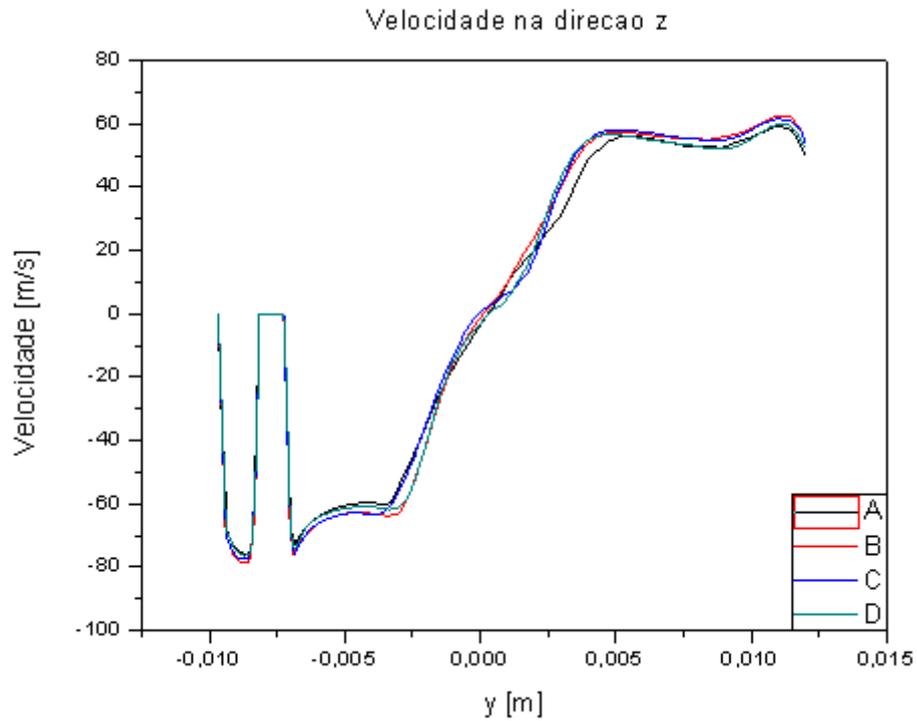


Figura 51. Velocidade na direção z para as quatro diferentes malhas. Fonte: Elaboração Própria

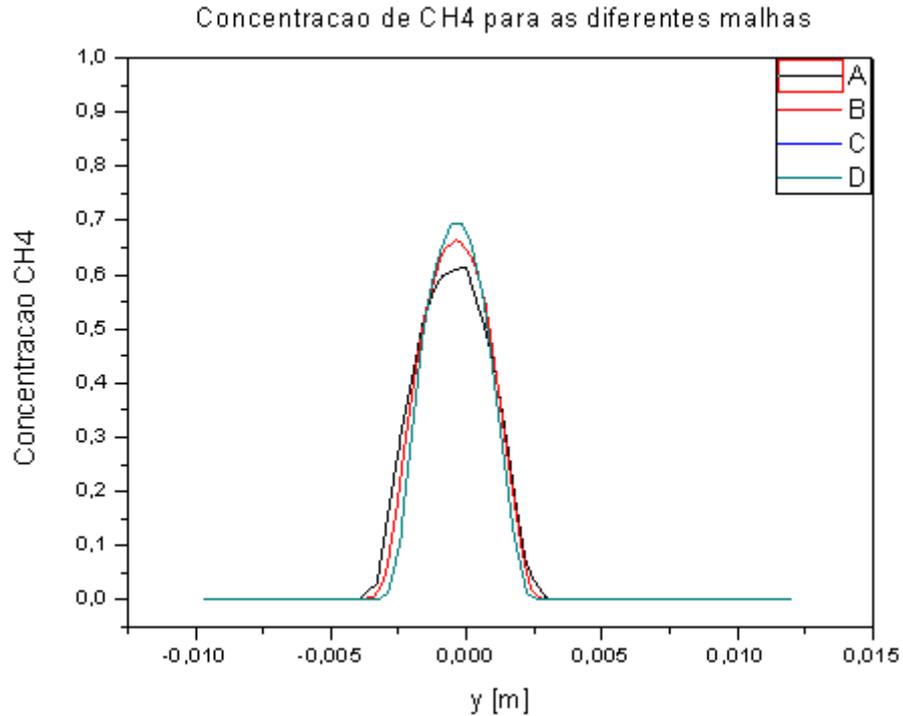


Figura 52. Concentração de CH<sub>4</sub> na zona de medição para as quatro diferentes malhas. Fonte: Elaboração Própria

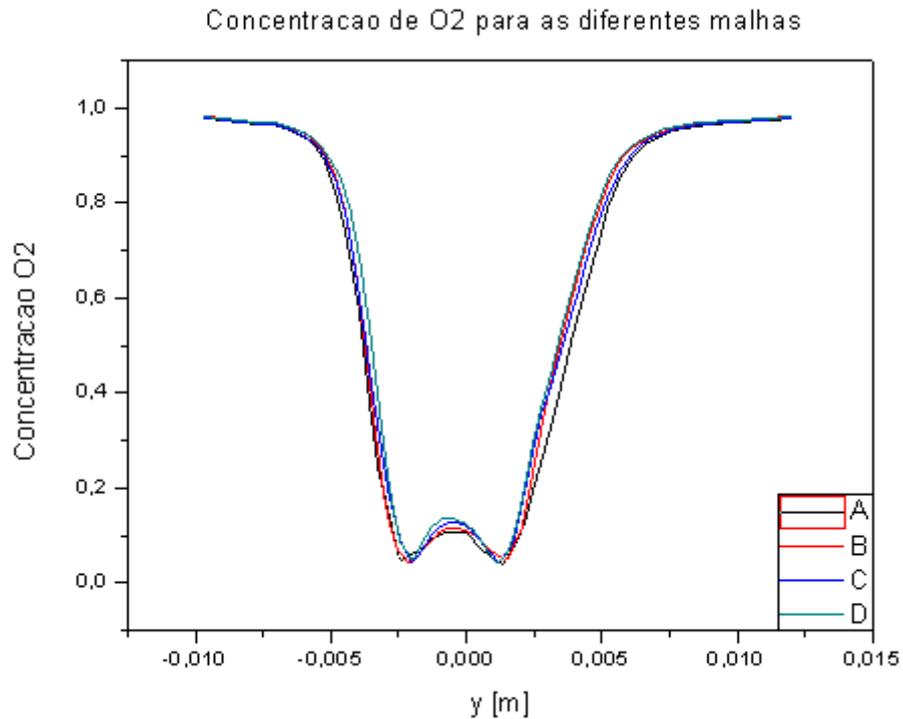


Figura 53. Concentração de O<sub>2</sub> na zona de medição para as quatro diferentes malhas. Fonte: Elaboração Própria

Uma malha mais refinada gera resultados mais confiáveis e mais próximo do real, porém quanto maior o refinamento da malha maior o tempo computacional. O intuito da validação da malha foi justamente de escolher uma malha boa com um tempo de cálculo não tão longo.

Pelas Figuras (49) a (53) percebe-se que a malha B tem resultados bem próximos da malha D, a mais refinada, e muitas vezes os resultados de B e de C são muito parecidos. Já a malha A não apresenta resultados muito satisfatórios. Então, através dos resultados e visando diminuir o tempo computacional, a malha B foi a escolhida.

### 5.3. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS

A partir da malha escolhida, a B no caso, foram calculadas diferentes simulações, conforme a metodologia descrita, testando os modos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizable e, também, as diferentes ordens, primeira e segunda, para validar o melhor método para o objeto de estudo.

Os modos de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizable apresentam uma alta performance para fluidos com rotações, entretanto o RNG exige que o usuário forneça o fator de rotação do fluido, propriedade difícil de se obter, e, além disso, o RNG demanda um tempo computacional maior para a convergência. As Fig. (54) a (56) relatam o comportamento dos dois modos na malha B (FLUENT, 2009).

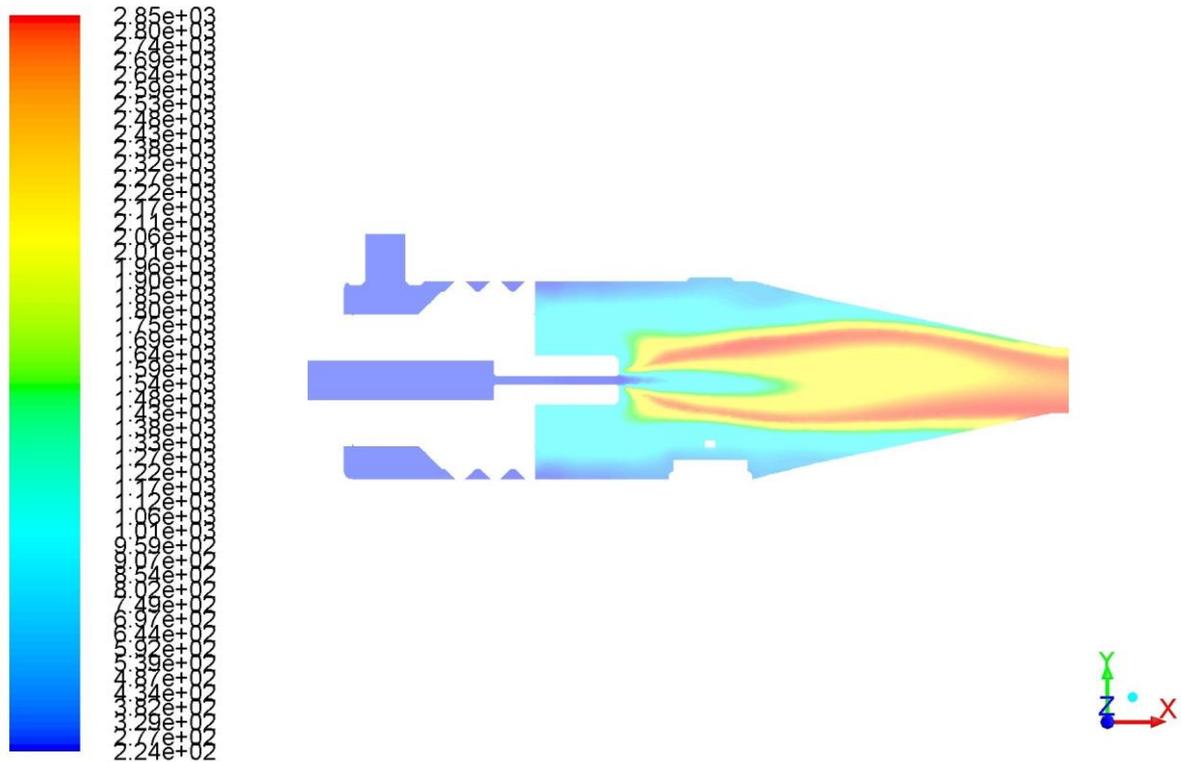


Figura 54. Campos de temperaturas para o modo  $\kappa$ - $\epsilon$  Realizable. Fonte: Elaboração Própria

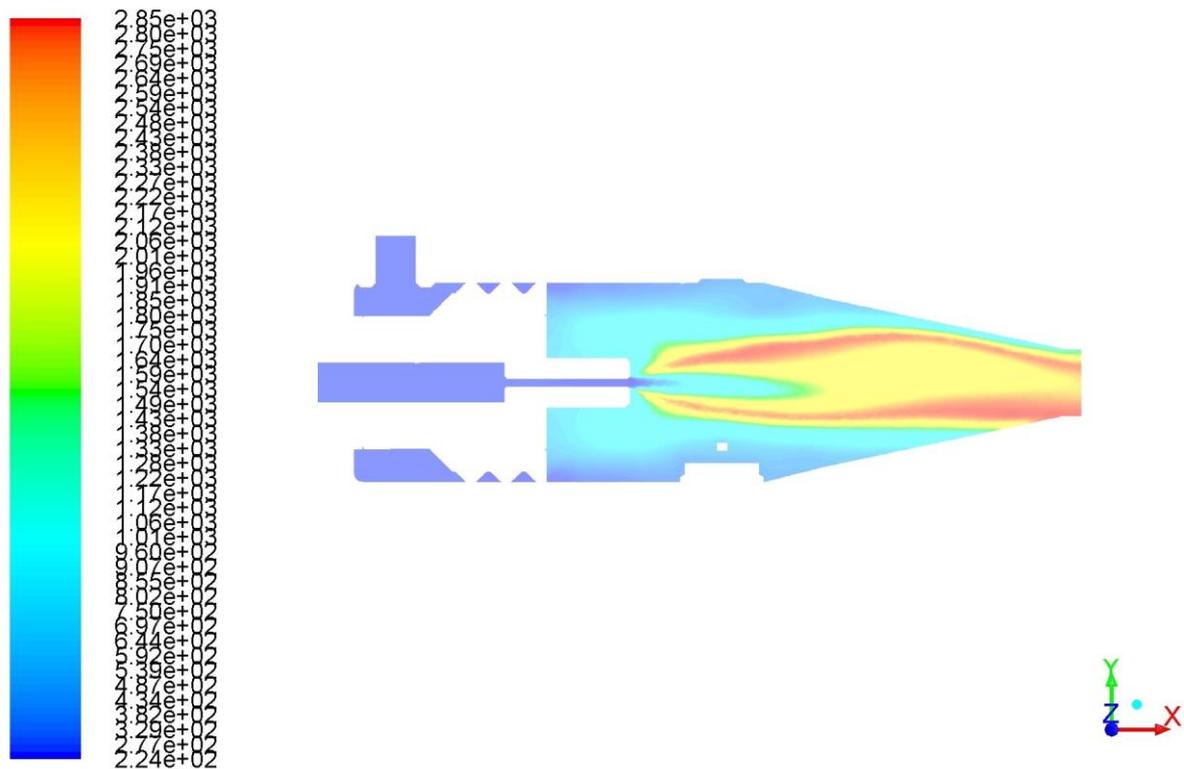


Figura 55. Campos de temperaturas para o modo  $\kappa\text{-}\epsilon$  RNG. Fonte: Elaboração Própria

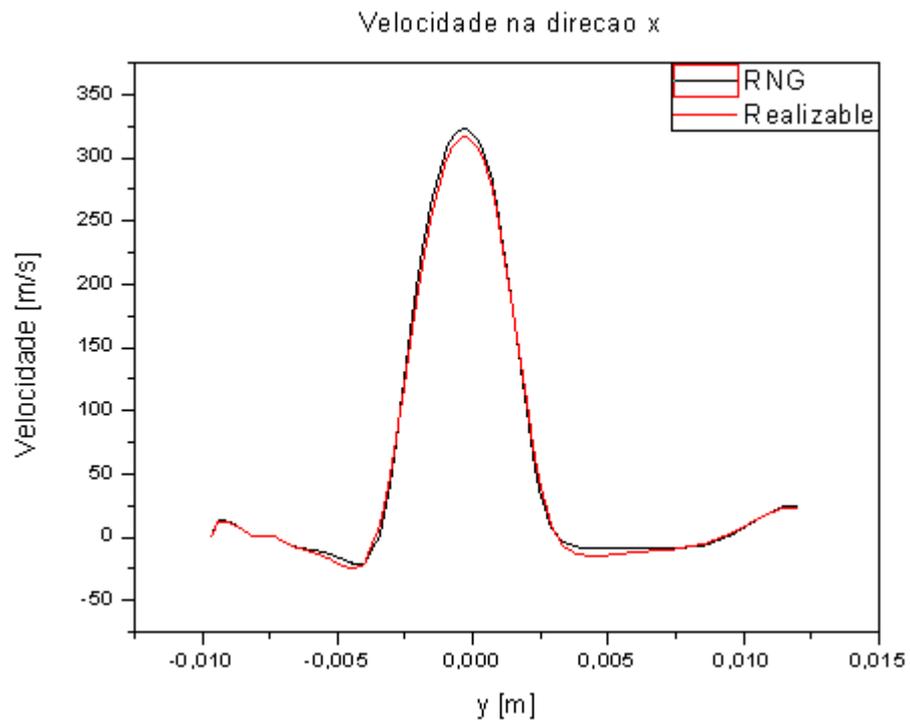


Figura 56. Velocidade na direção x para os dois modos, RNG e Realizable. Fonte: Elaboração Própria

Pela análise das figuras acima, percebe-se que a chama, para ambos os casos, apresenta um comportamento bem similar, onde as maiores temperaturas encontram-se nas fronteiras da chama. A Fig. (56), onde mostra a velocidade na direção x na zona de medição, confirma que os métodos evidenciam um desempenho parecido para o caso de estudo. Pela figura, pode-se observar que a diferença é bem pequena. Então por não ter certeza do fator de rotação do fluido e por ser um parâmetro difícil de encontrar, e, ainda, levando em consideração uma maior velocidade de convergência, o modo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  escolhido foi o Realizable.

Para estudar o efeito das ordens de discretização, primeira e segunda, foram feitas simulações do fluido frio nas duas ordens. Cálculos em segunda ordem apresentam uma acurácia maior nos resultados, porém a primeira ordem gera uma melhor convergência e tem um tempo computacional melhor. Então os resultados foram comparados para as simulações descritas para avaliar se há grande diferença entre as ordens (FLUENT, 2009).

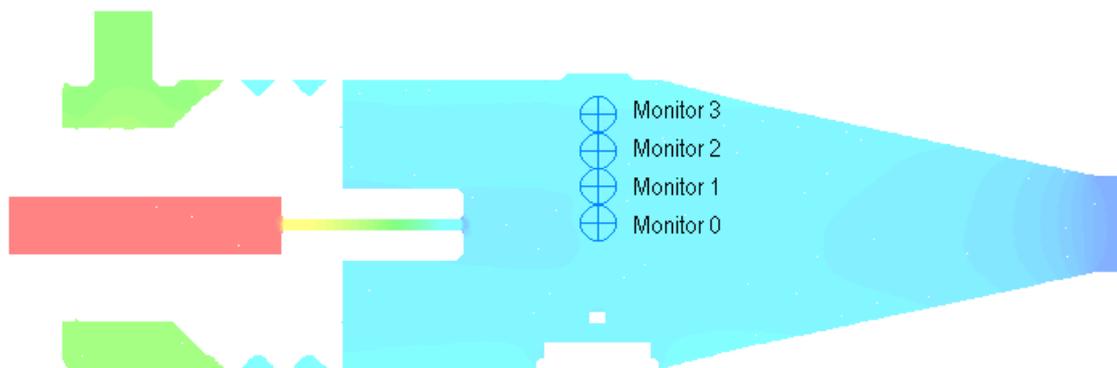


Figura 57. Local onde os monitores foram colocados. Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4. Coordenadas dos monitores. Fonte: Elaboração Própria

Monitor	x	y	z
0	0,044	0	0
1	0,044	0,003	0
2	0,044	0,006	0
3	0,044	0,009	0

A Figura (57) e a Tabela (4) mostram os monitores 0, 1, 2 e 3. Esses monitores são pontos onde o Fluent salva automaticamente a propriedade desejada em cada interação. Para comparar as duas ordens, o software armazenou os valores de temperatura nesses monitores que se encontram na zona de medição e, então, esses resultados foram plotados, por exemplo, para os monitores 0 e 1 para ter uma melhor visualização da diferença entre as ordens.

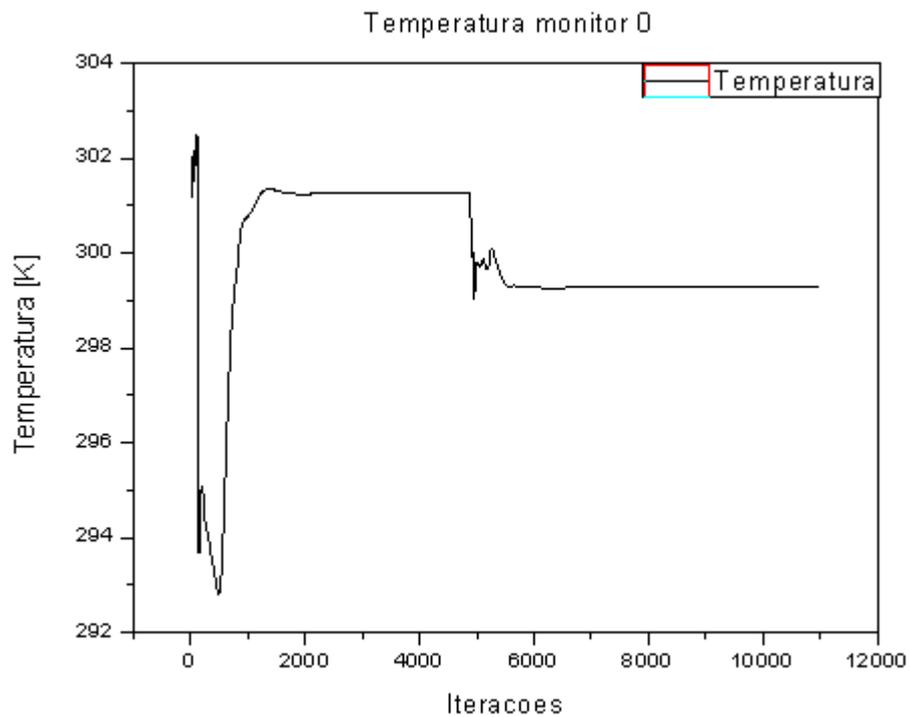


Figura 58. Temperatura no monitor 0. Fonte: Elaboração Própria

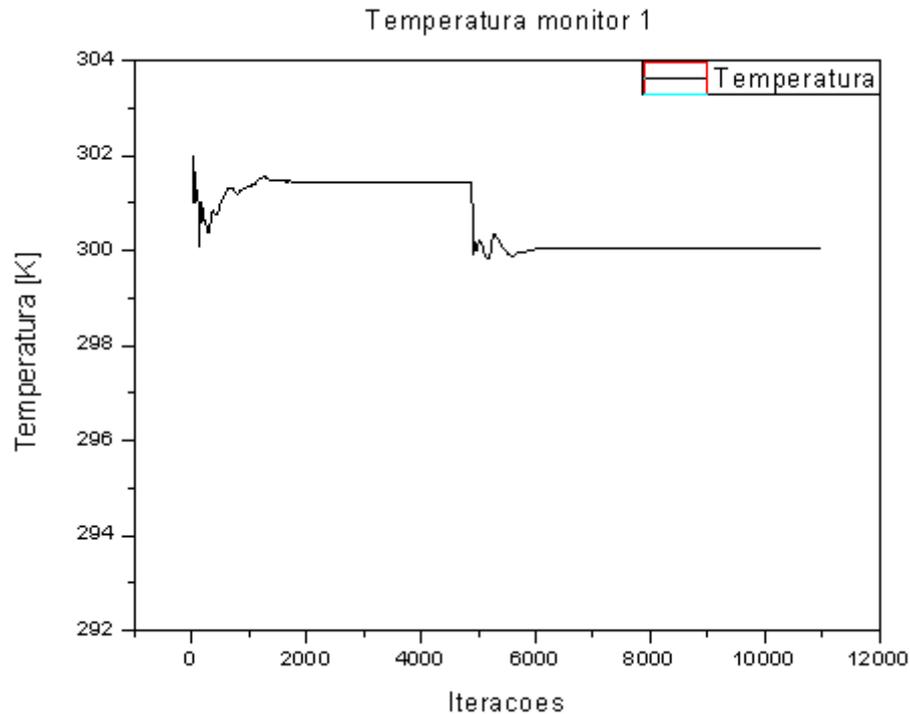


Figura 59. Temperatura no monitor 1. Fonte: Elaboração Própria

A simulação realizada nas Figuras (58) e (59) foram para o fluido frio. A simulação iniciou-se em primeira ordem até a convergência e, após, mudou-se para a segunda ordem. O critério para a convergência foi o seguinte: esperou-se que os valores de temperaturas ficassem constantes e depois alterou-se a ordem até, a mesma, apresentar valores constantes também.

Pelas figuras, é possível perceber que a diferença entre as ordens é pouco. A maior diferença é observada no monitor 0, onde, na convergência, em primeira ordem tem um valor de temperatura de aproximadamente 301 K e em segunda ordem, 299 K. Uma diferença de 2 kelvins (0,66%) para temperaturas que alcançam 300 K é insignificante.

É possível que os valores para a combustão nas duas ordens iriam ter uma diferença maior em relação aos cálculos com o fluido frio, mas por falta de potência computacional e tempo necessário, não foi possível simular todos os casos para a segunda ordem na combustão.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Posteriormente a validação da malha e dos métodos, a metodologia da solução foi utilizada para a simulação da combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  no ignitor do tipo tocha alterando a energia cinética do oxidante para estudar o efeito da chama e do fluxo de calor na superfície. Foram feitos seis cálculos diferentes, variando o fluxo de massa do oxidante e mantendo o do combustível constante. Esse parâmetro foi modificado para gerar simulações com razões equivalentes ( $\Phi$ ) de 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 1 e 1.3.

Como já visto, a razão equivalente é um parâmetro de medida da quantidade de oxidante e combustível em uma mistura. Então, para os diferentes valores de  $\Phi$ , foram estudados os comportamentos da combustão e das espécies químicas. A tabela abaixo mostra como foi calculado os diferentes  $\Phi$ .

Tabela 5. Relação de velocidades, fluxos de massas e razões equivalentes. Fonte: Elaboração Própria

Vf [m/s]	$\dot{m}_f$ [kg/s]	Vox [m/s]	$\dot{m}_{ox}$ [kg/s]	KER	$\Phi$
12,4	0,000433	18	0,001335	4,476393	1,297127
12,4	0,000433	23,5	0,001743	7,629901	0,993544
12,4	0,000433	33	0,002447	15,04565	0,707524
12,4	0,000433	39	0,002892	21,01418	0,598674
12,4	0,000433	47	0,003485	30,5196	0,496772
12,4	0,000433	58	0,004301	46,4712	0,402557

A Tabela (5) demonstra como foi feito para encontrar as diferentes razões equivalentes. Para isso, a velocidade do combustível (Vf) e o fluxo de massa do mesmo ( $\dot{m}_f$ ) foram mantidos constantes, então aumentou-se a velocidade e, conseqüentemente, o fluxo de massa do oxidante, assim o valor de  $\Phi$  decresceu. Ainda pela Tab. (5), KER é uma “razão da energia cinética”, esse parâmetro foi calculado dividindo-se a energia cinética do oxidante pela a do combustível.

Todas essas mudanças nas razões equivalentes influenciam diretamente na distribuição da chama gerada dentro do ignitor. A imagem a seguir demonstra o comportamento da região de interesse da combustão para diferentes razões equivalentes.

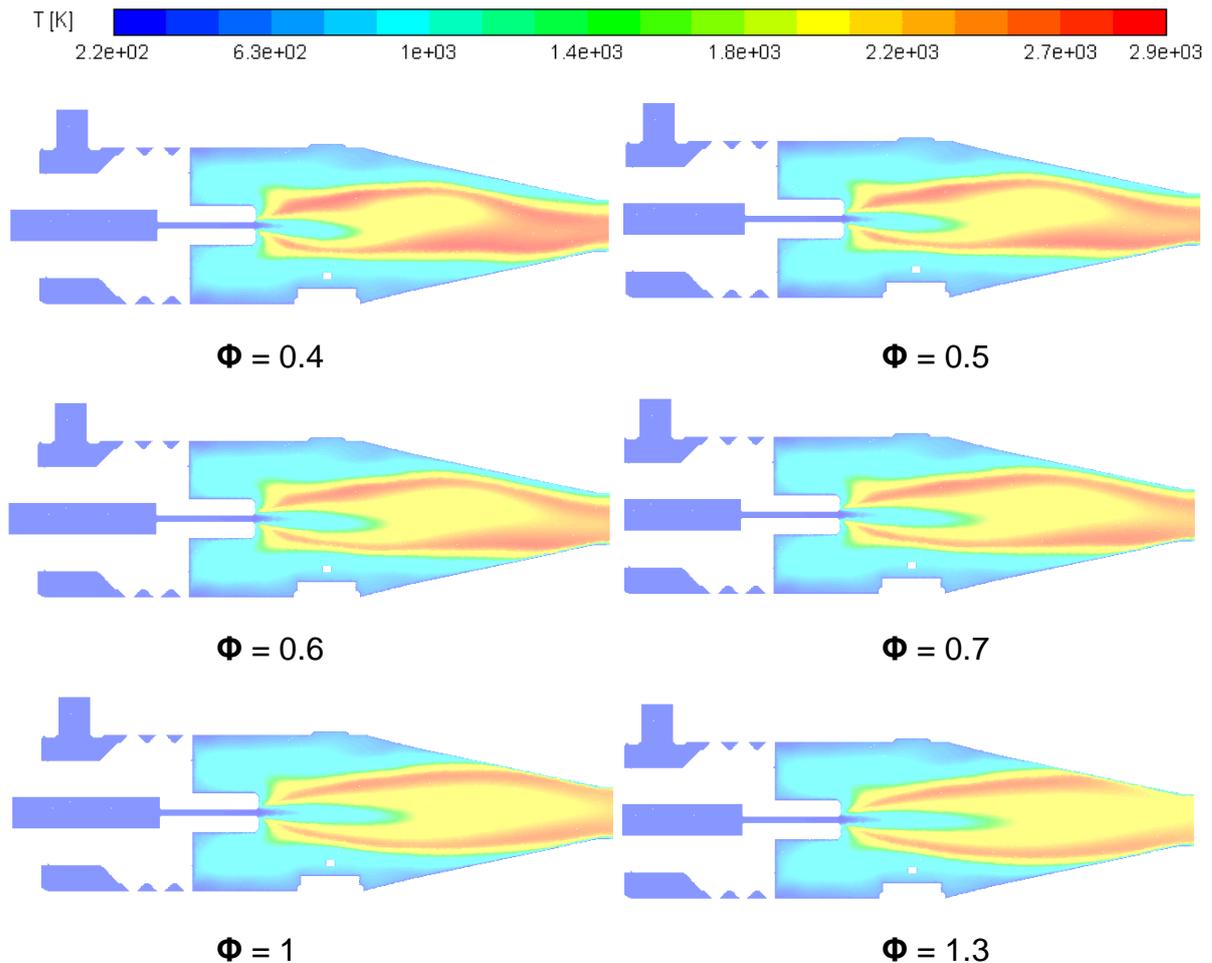


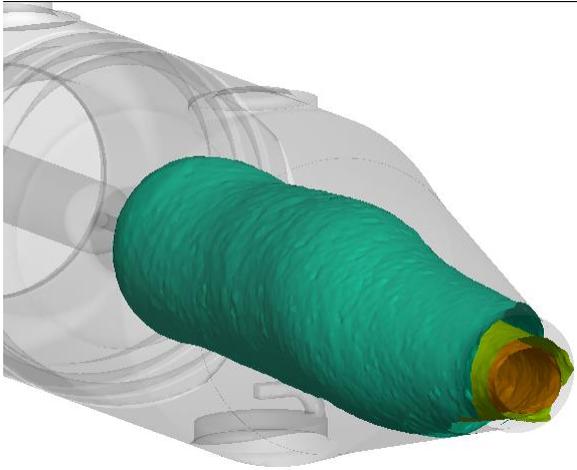
Figura 60. Região de interesse da combustão para os diferentes valores de  $\Phi$ .  
Fonte: Elaboração Própria

Pela Figura (60) é possível perceber que quanto menor o  $\Phi$  (maior a energia cinética do oxidante), menor a área de abrangência da região da combustão. Entretanto, observa-se que quanto mais restrita a chama, maior o desenvolvimento da mesma. No caso de  $\Phi$  igual 0.4, a chama apresenta uma região de temperaturas mais elevadas que as demais e ainda, essa zona de temperaturas altas, é mais desenvolvida.

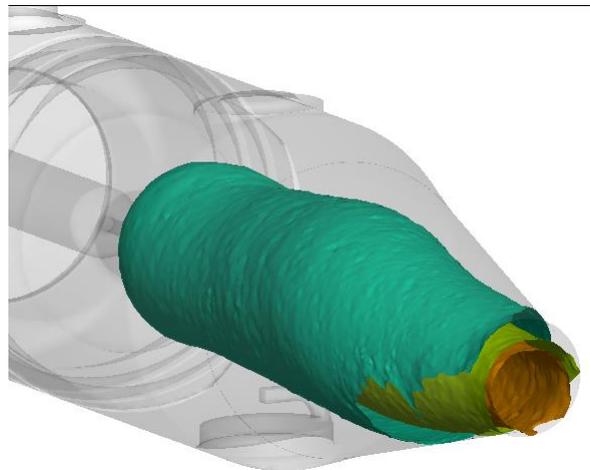
Vale ressaltar também que com o aumento da razão equivalente, as maiores temperaturas da chama vão do centro para o exterior. Esse comportamento pode prejudicar um dos requisitos do projeto, o de auto resfriamento das paredes externas. Para um melhor entendimento do comportamento da chama gerado, as figuras a seguir retratam essa conduta para três campos de temperaturas ( $T = 1200$  K,  $T = 2200$  K e  $T = 2600$  K).



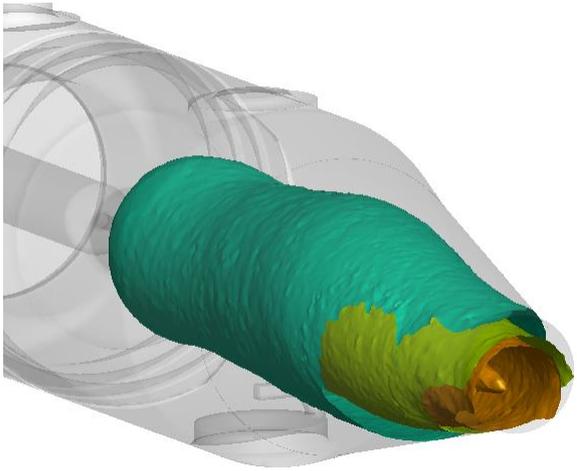
Temperature: 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800 2000 2200 2400 2600 2800



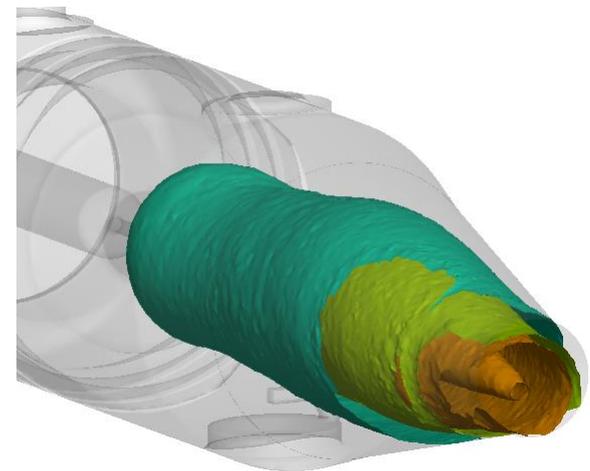
$\Phi = 0.4$



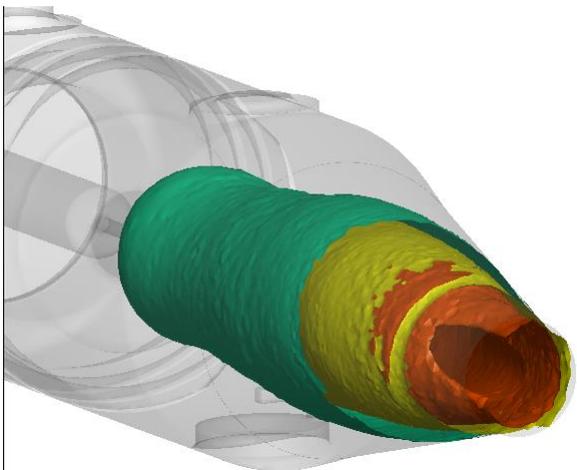
$\Phi = 0.5$



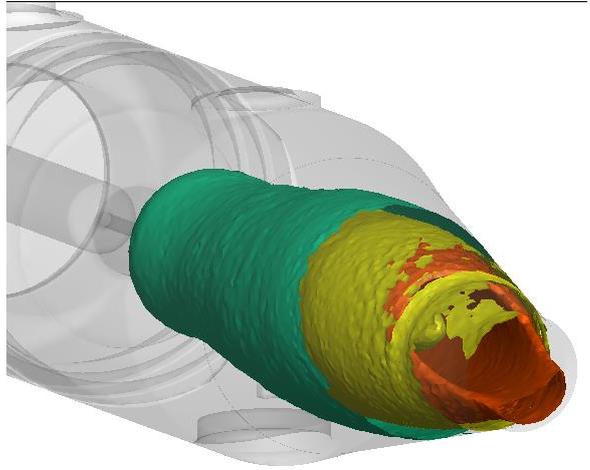
$\Phi = 0.6$



$\Phi = 0.7$



$\Phi = 1$



$\Phi = 1.3$

Figura 61. Comportamento dos campos de temperaturas para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

A Figura (61) evidencia o que foi relatado para a chama na Fig. (60), pois demonstra que o comportamento da região de interesse da combustão segue a conduta relatada, menor o valor da razão equivalente, mais concentrada é a chama.

É possível evidenciar também que os campos de temperaturas alargam-se a medida que  $\Phi$  aumenta, fazendo com que as maiores temperaturas encontrem-se em contato com a parede. Vale ressaltar o comportamento rotacional das chamas motivados pela injeção do oxidante.

Além disso, observa-se que a temperatura máxima registrada para  $\Phi = 1.3$  é menor do que a para  $\Phi = 0.4$ , conforme mostram as Fig. (60) e (61). Com o intuito de demonstrar o comportamento da chama a altas temperaturas, o campo de temperatura  $T = 2700$  K, comum para todas as simulações, pode ser observado na imagem que se segue.

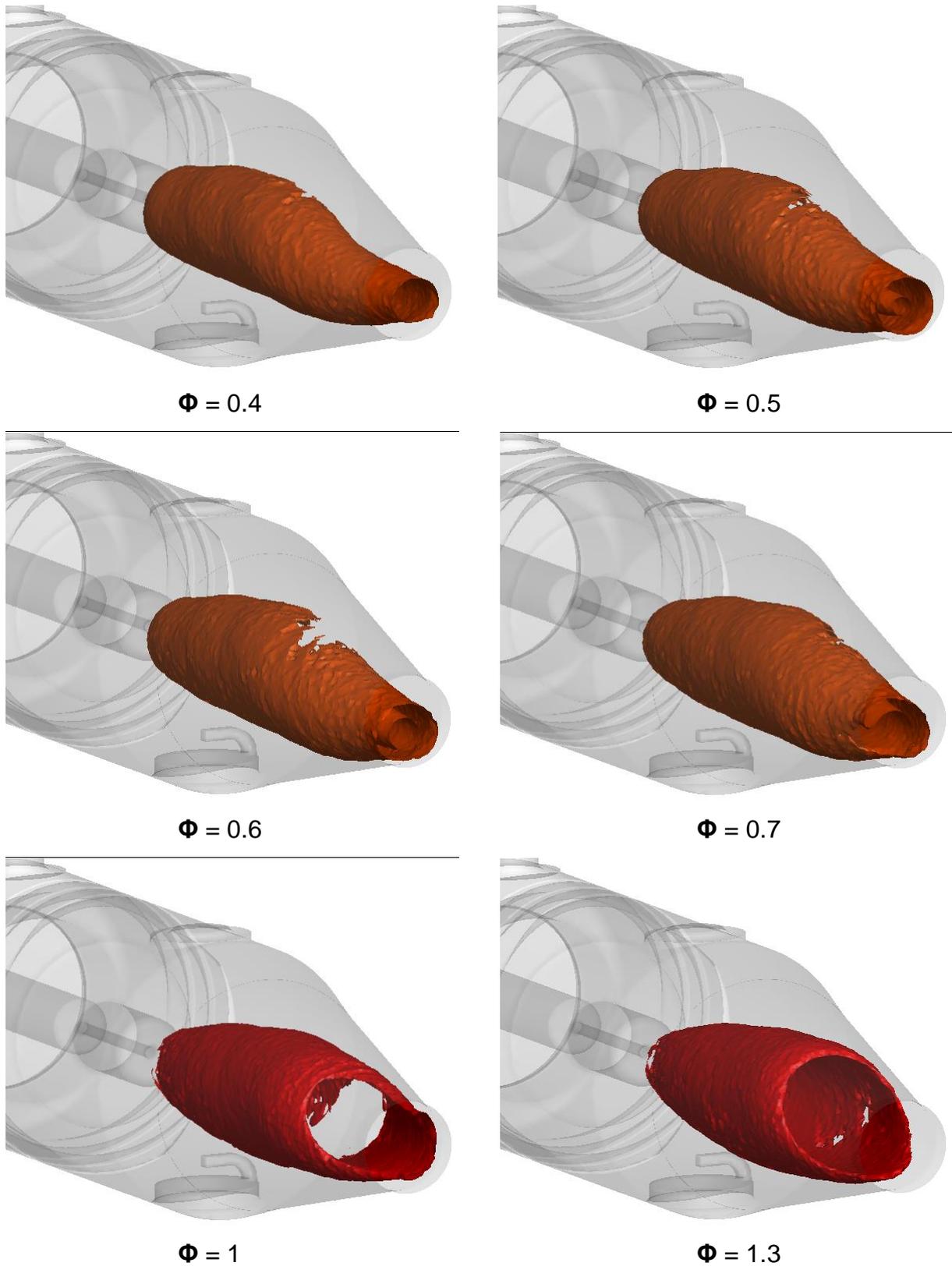


Figura 62. Campo de temperatura  $T = 2700$  K para os diferentes valores de  $\Phi$ .

Fonte: Elaboração Própria

Mas uma vez é perceptível que para uma razão equivalente menor (maior energia cinética do oxidante), o campo de temperatura é mais concentrado, enquanto que o mesmo amplia-se muito com a diminuição da concentração de oxigênio. Ainda, para entender melhor esse comportamento, a figura abaixo relata como  $\phi$  local altera-se ao longo da chama.

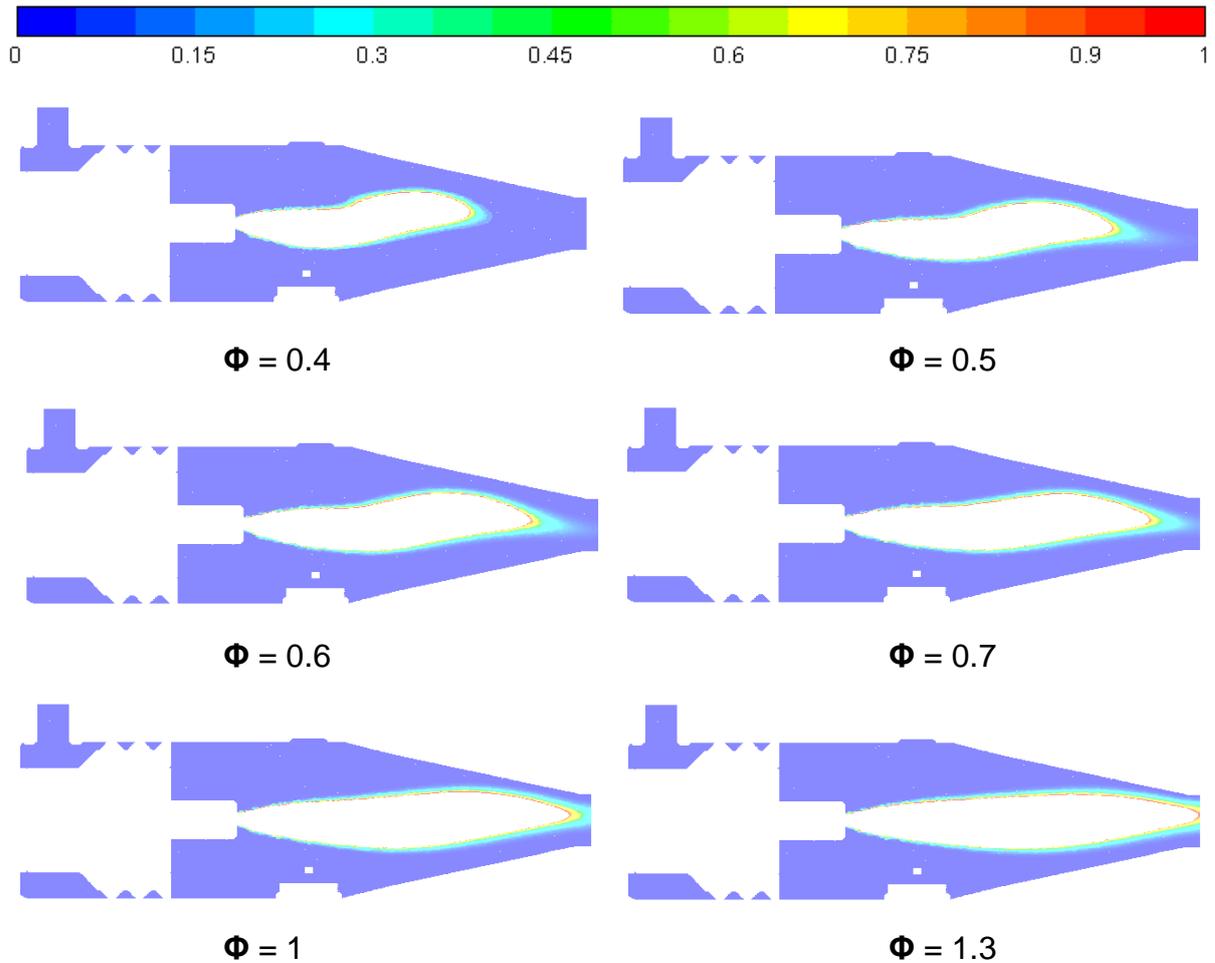


Figure 63. Evolução de  $\phi$  local para os diferentes valores de  $\Phi$  total. Fonte: Elaboração Própria

Pela Figura (63), percebe-se essa mudança de razões equivalentes para uma escala de 0 a 1. Os locais vazados no ignitor indicam que  $\phi$  é maior do que 1. É interessante notar que a região em vermelho na figura indica razão equivalente estequiométrica e é nessa região onde encontram-se as maiores temperaturas. Essas diferenças nas temperaturas ainda podem ser apresentadas medindo os

valores da própria em uma mesma região (zona de medição página 62). A figura abaixo relata isso.

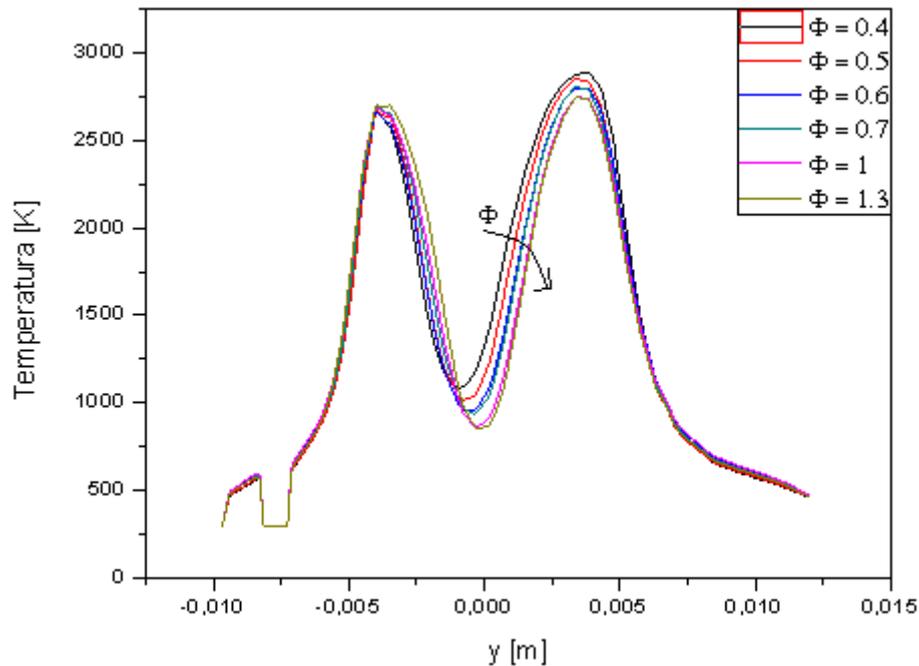


Figure 64. Temperaturas para diferentes razões equivalentes na zona de medição.  
Fonte: Elaboração Própria

A Figura (64) apresenta os valores de temperaturas para as diferentes razões equivalentes na zona de medição. A figura evidencia que quanto menor o  $\Phi$ , maior a temperatura. Então, para alcançar temperaturas mais elevadas, a mistura, combustível oxidante, deve ser pobre em combustível, assim a região de interesse da combustão é mais restrita e a chama se desenvolve mais completamente.

Com o aumento da razão equivalente, a região de abrangência da chama aumenta e, assim, o fluxo de calor na superfície também se eleva. A figura abaixo demonstra o fluxo de calor na região externa para os diferentes  $\Phi$ .



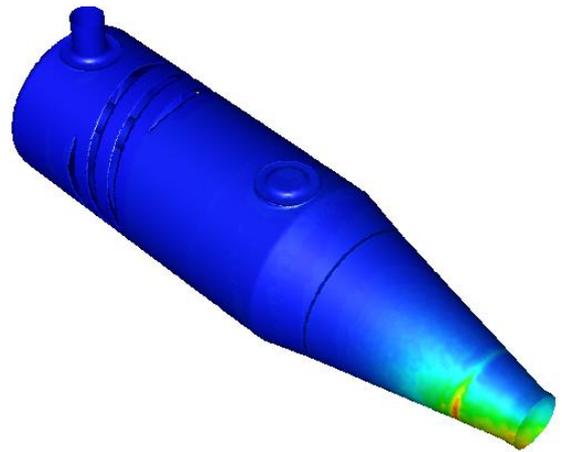
$\Phi = 0.4$



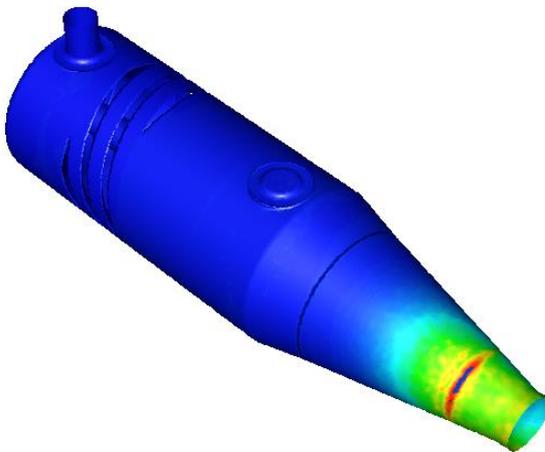
$\Phi = 0.5$



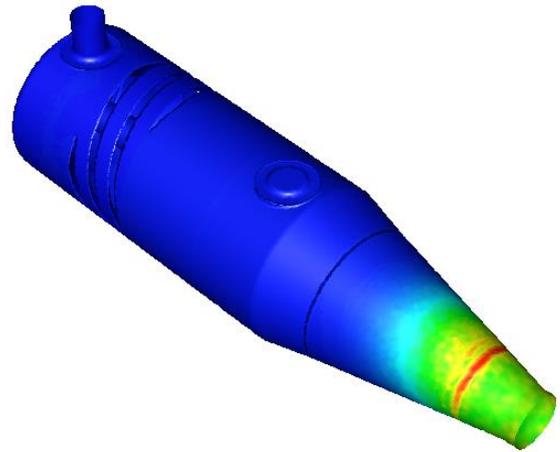
$\Phi = 0.6$



$\Phi = 0.7$



$\Phi = 1$



$\Phi = 1.3$

Figura 65. Fluxo de calor na superfície para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

A Figura (65) demonstra que o fluxo de calor na superfície aumenta com o aumento da razão equivalente. Esse resultado é explicado pelo comportamento da chama, em que maiores as razões equivalentes, maior o contato dos campos de alta temperatura com a superfície e, assim, maior o fluxo de calor nessa região. A figura a seguir relata esse comportamento, mostrando a relação da chama com o fluxo de calor na região externa.

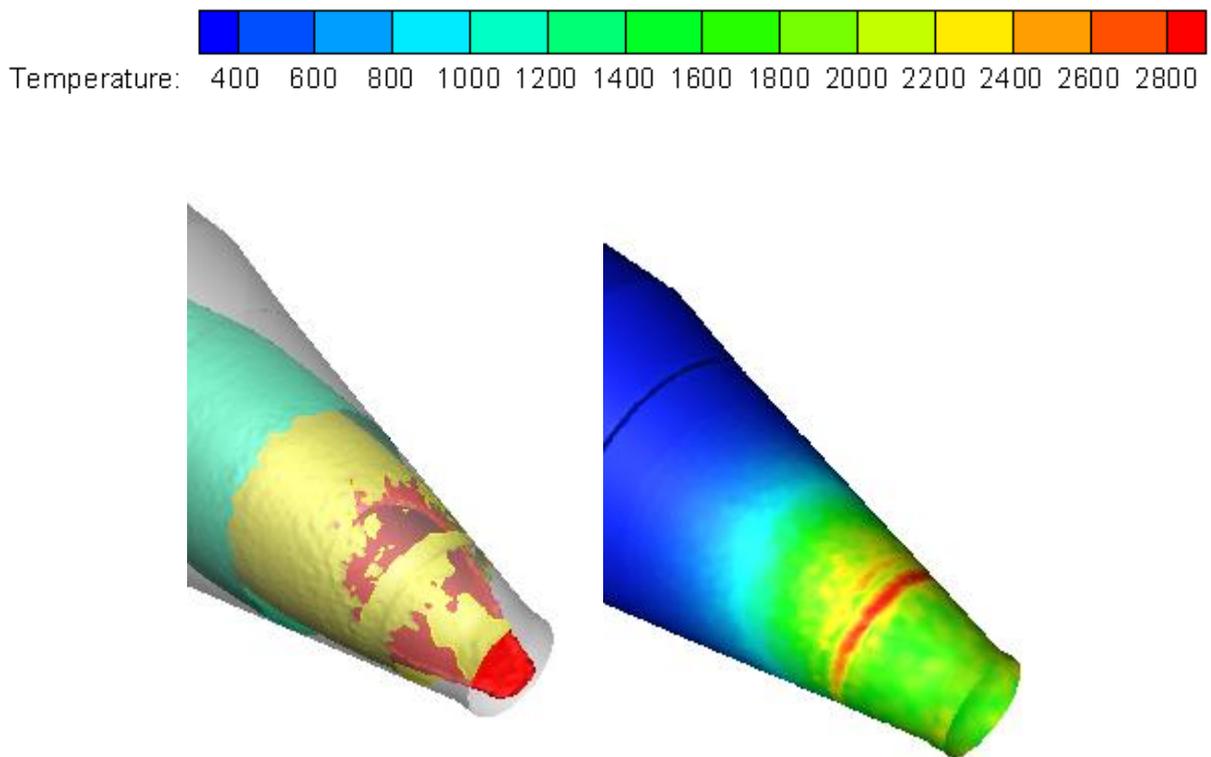


Figura 66. Campos de temperaturas versus fluxo de calor na superfície. Fonte: Elaboração Própria

A Figura (66) relaciona os campos de temperaturas com o fluxo de calor na superfície para  $\Phi$  igual a 1.3. A escala indica os valores dos campos de temperatura para a imagem à direita, enquanto a imagem à esquerda estabelece o fluxo de calor. Percebe-se que o fluxo de calor é bem relevante na região da saída, isso se deve ao fato de os campos de temperaturas elevadas abrangerem o mesmo local. Para

demonstrar melhor esse comportamento, os valores máximos do fluxo de calor foram plotados para os diferentes  $\Phi$ .

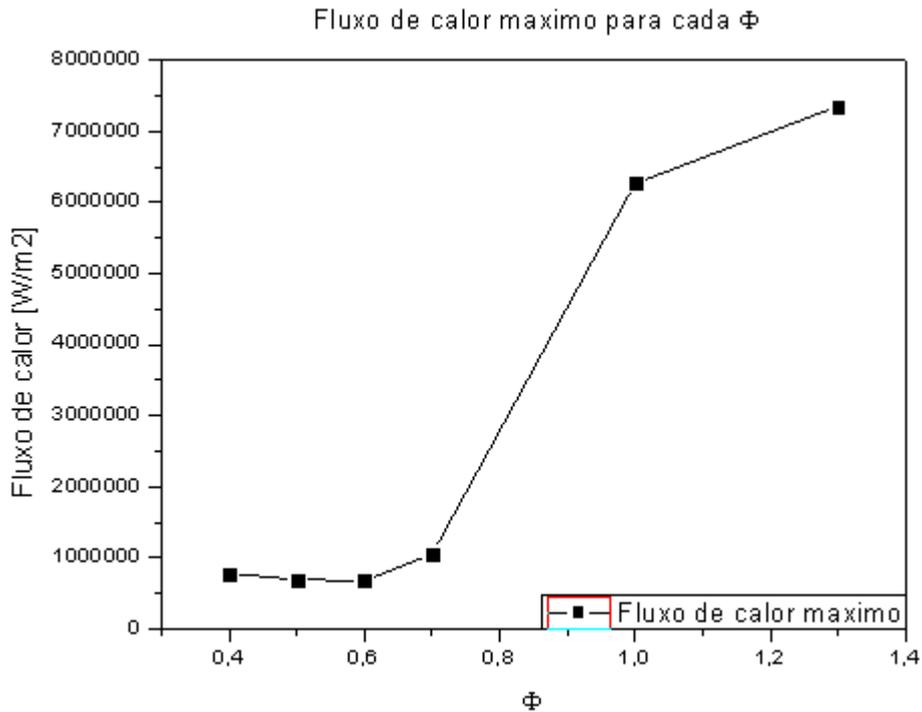


Figura 67. Fluxo de calor máximo para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

A Figura (67) reforça tudo o que foi dito para o fluxo de calor, pois através da imagem percebe-se que o fluxo de calor máximo na superfície aumenta com o crescimento da razão equivalente, porque quanto maior o  $\Phi$ , mais a chama aproxima-se da parede externa fazendo com que o fluxo aumente nessa região.

Os resultados da Figura (67) foram obtidos no Fluent Ansys® através de uma linha transversal passando exatamente onde o fluxo tem o maior valor. Pelas Fig. (65) e (66), percebe-se que isso ocorre na parte superior do ignitor próximo a região da saída.

Pode ser medido também a potência térmica liberada na combustão. Esse parâmetro é calculado pela seguinte fórmula,

$$\dot{q} = \dot{m}_e h_e - \dot{m}_{ox} h_{ox} - \dot{m}_f h_f, \quad (12)$$

onde,  $\dot{q}$  é a potência térmica,  $\dot{m}$  é o fluxo de massa e  $h$ , a entalpia. Os subíndices  $e$  indicam as propriedades na saída,  $ox$ , propriedades do oxidante e  $f$ , do combustível. Essa potência térmica pode ser calculada para a entalpia estática, que leva em consideração só a energia interna do fluido, ou para a entalpia total, que é a soma da entalpia estática com a energia cinética do fluido. A partir dos dados fornecidos pelas simulações, calculou-se a potência térmica para as diferentes razões equivalentes.

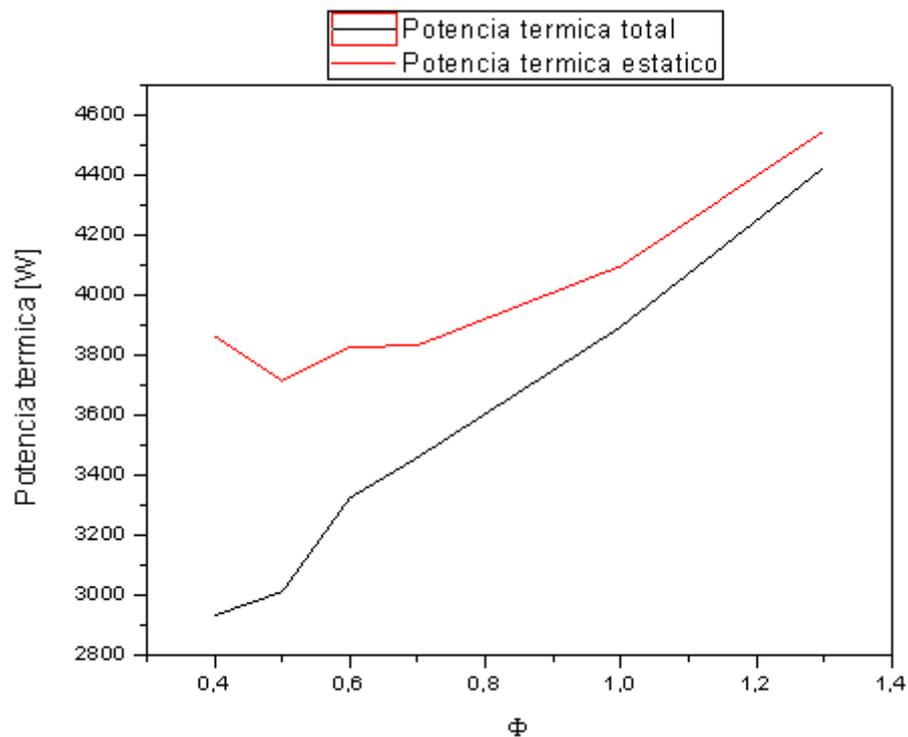


Figura 68. Potência térmica total e estática. Fonte: Elaboração Própria

Através da Figura (68), percebe-se a potência térmica total e estática liberado pela combustão. A potência térmica total relaciona-se com a entalpia total e a estática com a entalpia estática. Nota-se que levando em consideração somente a energia interna, a potência térmica é maior e observa-se também que aumentando a razão equivalente, o  $\dot{q}$  eleva-se. Então, quanto mais abrangente for a região da combustão, maior potência é liberado pela reação.

O calor gerado pela combustão é associado a uma eficiência de combustão, pois nem toda a energia contida no combustível é liberada na combustão, existem perdas no processo. Para calcular quanto a combustão simulada foi eficiente, utilizou-se a seguinte fórmula,

$$\dot{q} = \dot{m}rQ\eta, \quad (13)$$

onde,  $Q$  é o poder calorífico do metano (pela literatura  $Q = 50 \text{ MJ/kg}$ ) e  $\eta$  é a eficiência da combustão. A figura abaixo relaciona a eficiência gerada pelo fluxo de calor total com o estático (TURNNS ,2000).

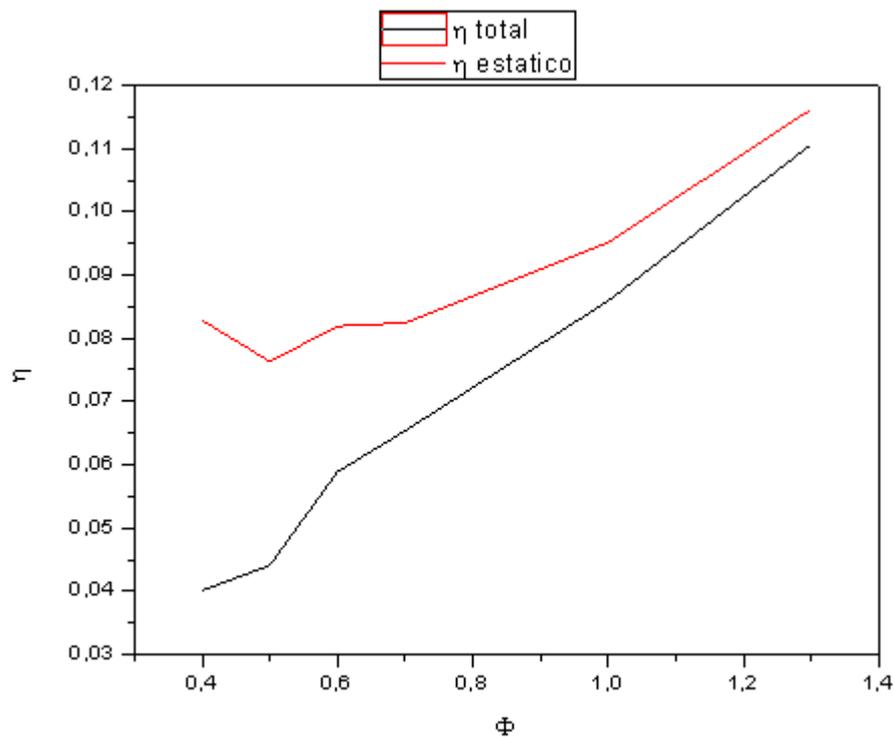


Figura 69. Eficiência da combustão total e estática. Fonte: Elaboração Própria

Quanto menor o valor da eficiência, maiores são as perdas. Pela Fig. (69), percebe-se que a combustão estática é mais eficiente que a total, pois se se considerar a energia cinética do fluido, maiores serão as perdas. Observa-se também que quanto menor a razão equivalente, menores as eficiências. Isso se deve pelo fato de que a razão da energia cinética é maior para menores  $\Phi$  gerando mais perdas durante a combustão.

Como o ignitor estudado será usado para ignizar os propelentes híbridos de um motor de foguete, é interessante saber o quanto de potência será liberado dentro do motor. Para isso, calculou-se apenas a potência térmica na região da saída do ignitor, conforme a fórmula abaixo,

$$\dot{q}_e = \dot{m}_e h_e. \quad (14)$$

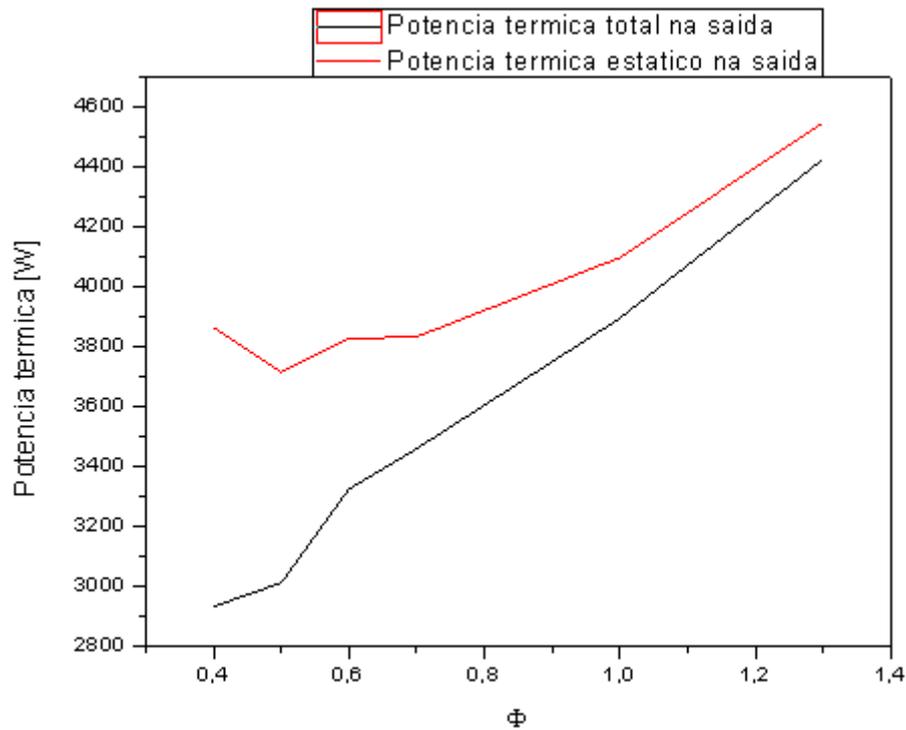


Figura 70. Potência térmica total e estática na região da saída do ignitor. Fonte: Elaboração Própria

A potência térmica liberada na saída segue o mesmo comportamento do liberado pela combustão. Percebe-se que quanto maior a razão equivalente, maior a potência térmica liberada.

Pelas figuras da potência térmica, observa-se que a diferença entre a total e a estática é maior para menores valores de razão equivalente. Isso ocorre pois a menores  $\Phi$ , o fluxo de massa de oxigênio é maior, então a energia cinética do fluido também é maior. Pois, como visto, as chamas apresentam um comportamento rotacional, isso é devido a injeção em espiral do oxigênio, com isso, pode-se afirmar que a energia cinética do oxidante tem uma relevância bem maior do que a do combustível e conforme diminui o fluxo de massa do oxidante, a energia cinética decresce, fazendo com que a potência térmica total se aproxime da estática.

Todas essas alterações nos comportamentos das chamas com a mudança da razão equivalente podem ser explicadas pelas espécies químicas. Pois, apesar de manter o fluxo de massa do combustível constante, o comportamento da injeção do

mesmo é alterado com a mudança do oxidante. As Fig. (71) e (72) demonstram como o metano e o oxigênio alteram-se com as mudanças da razão equivalente.

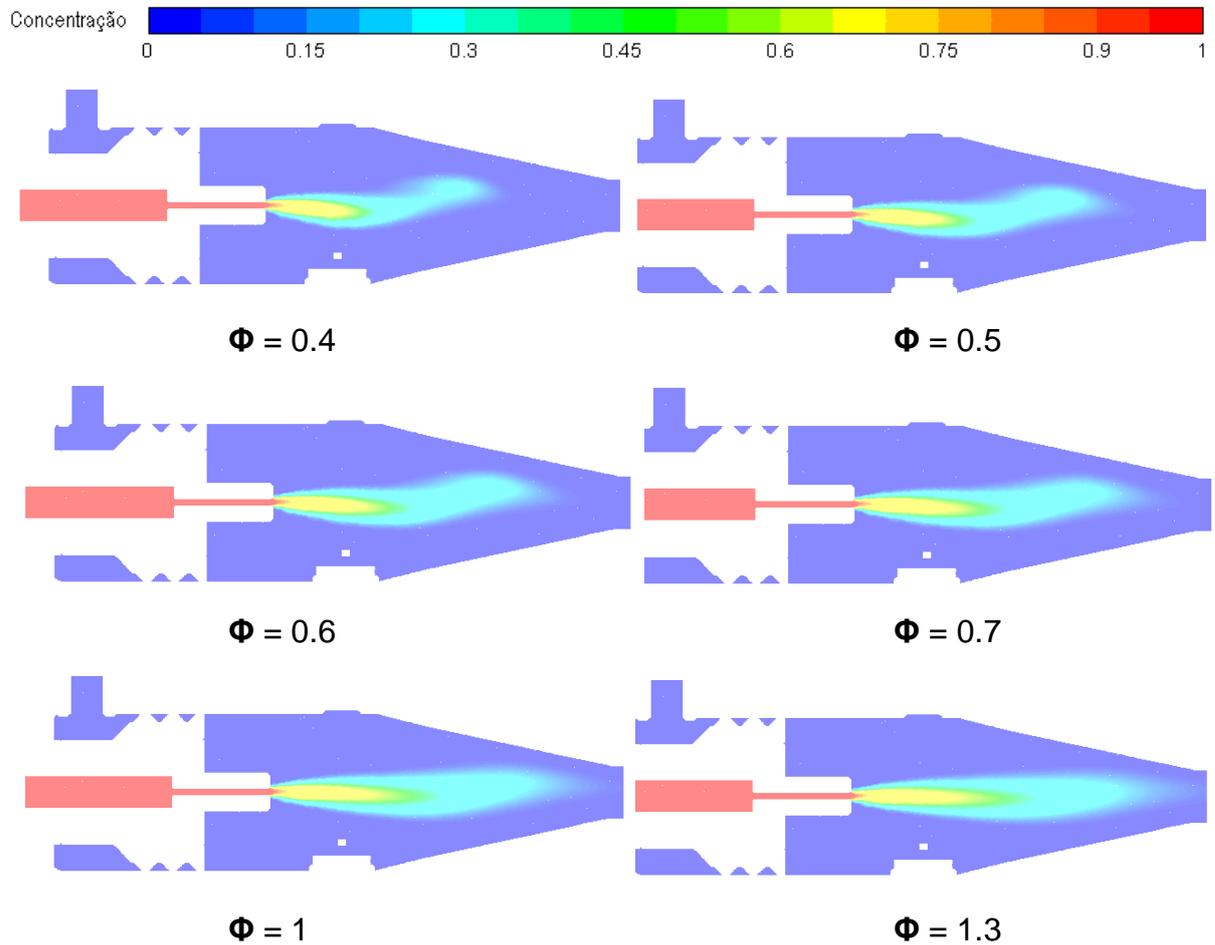


Figura 71. Injeção do  $\text{CH}_4$  para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

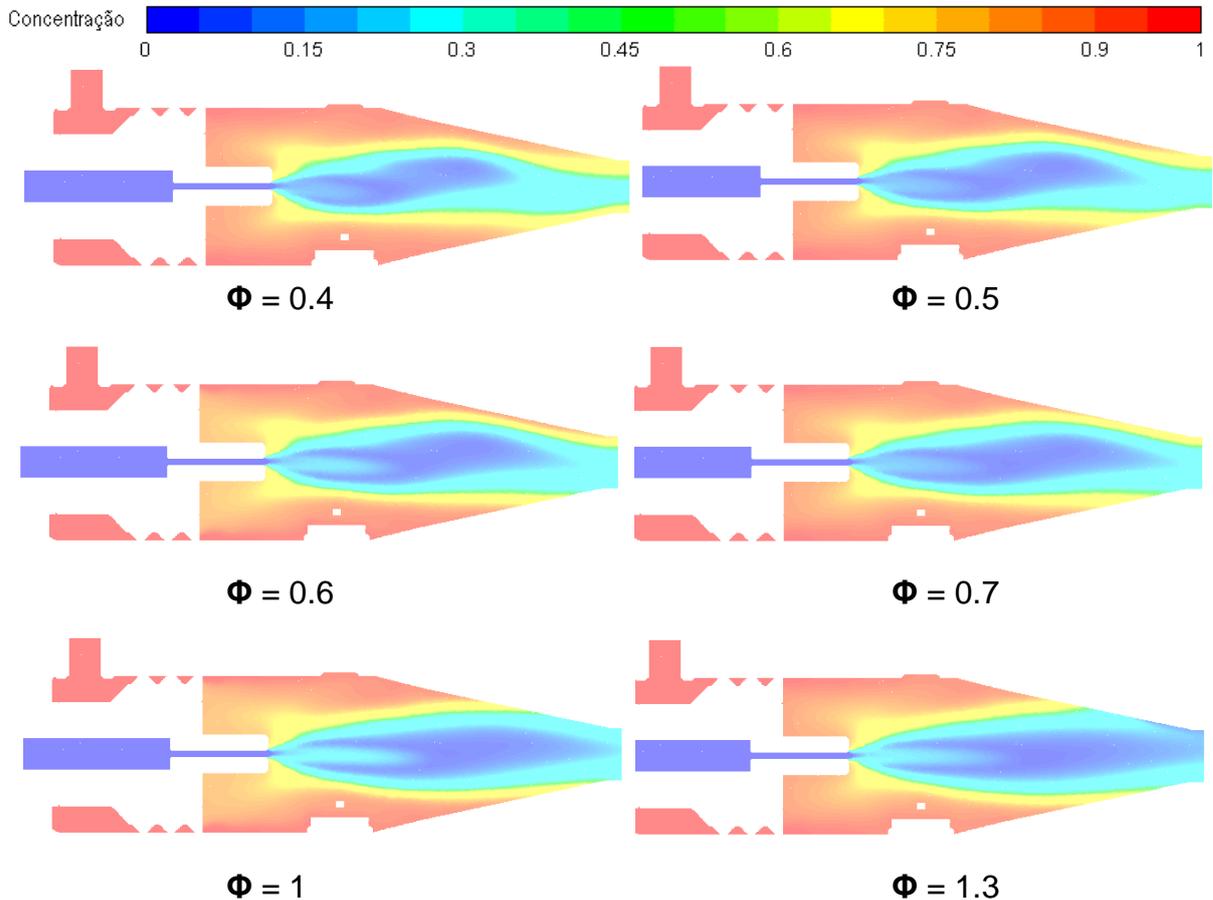


Figura 72. Injeção do O<sub>2</sub> para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

Através da Figura (71), pode-se perceber a injeção de metano dentro do ignitor. O fluxo de massa do combustível mante-se constante, mas conforme aumenta a razão equivalente, o fluxo de massa do oxidante diminui. Então a porcentagem de metano no ignitor aumenta e isso é visível pelas figuras, à medida que  $\Phi$  aumenta o jato de injeção de metano também cresce.

A Figura (72) demonstra o comportamento do oxidante descrito no parágrafo anterior. Conforme a razão equivalente aumenta, o oxigênio dentro do ignitor diminui. Percebe-se que a região mais afetada por essa mudança é a da saída, pois a concentração de O<sub>2</sub> nesse local só diminui com o aumento de  $\Phi$ .

Essa crescente da razão equivalente apresenta impactos direto na combustão CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>, pois isso altera a concentração das espécies químicas relacionadas a essa

combustão. Abaixo, é mostrado a concentração das espécies químicas para os diferentes valores de  $\Phi$ .

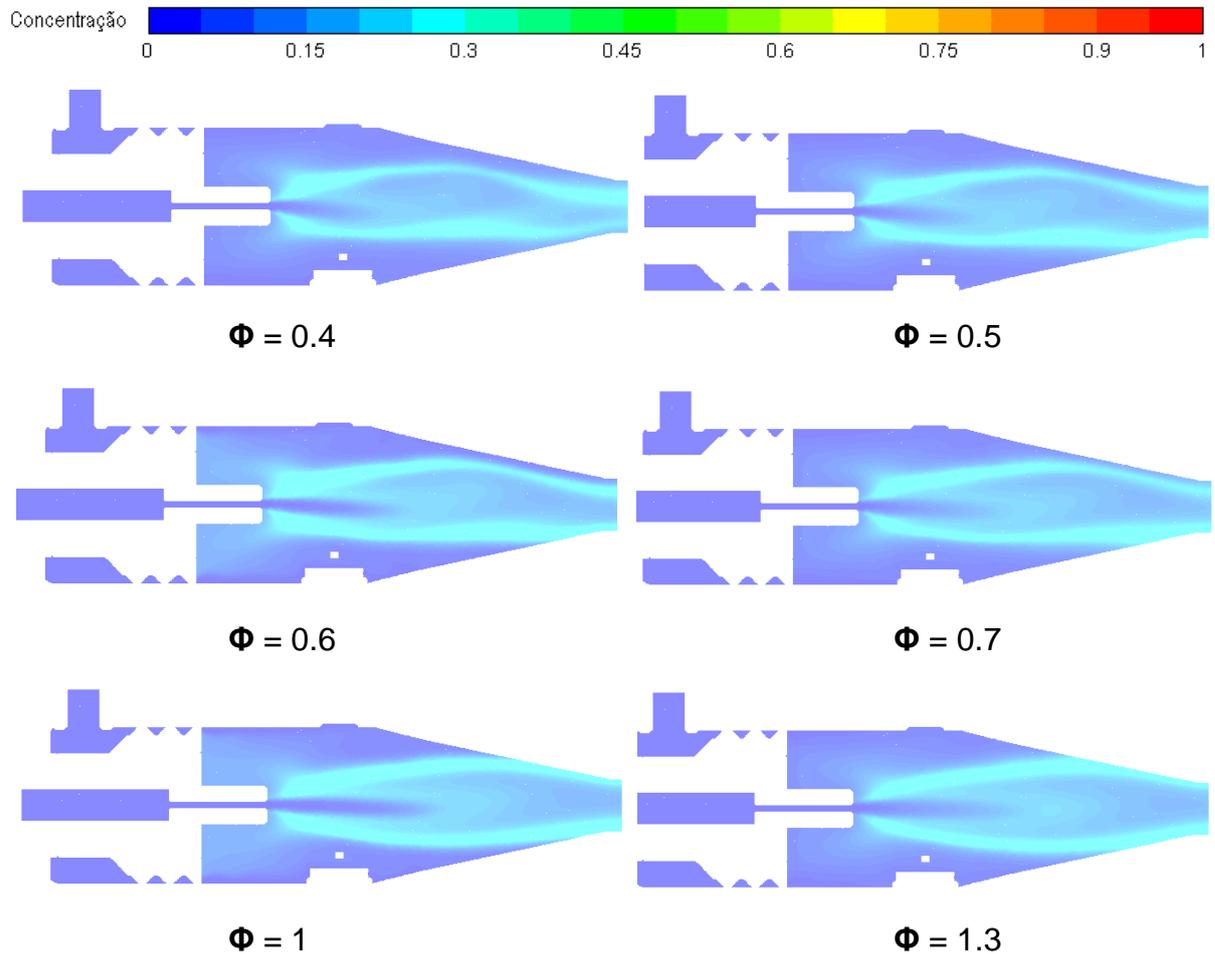


Figura 73. Concentrações de  $\text{CO}_2$  para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

Pela Figura (73), percebe-se que com o aumento da razão equivalente, as concentrações de  $\text{CO}_2$  ficam mais espaçadas pelo ignitor. Para  $\Phi$  menores,  $\text{CO}_2$  é mais restrito enquanto que, para  $\Phi$  maiores, o mesmo alarga-se mais pela região do ignitor.

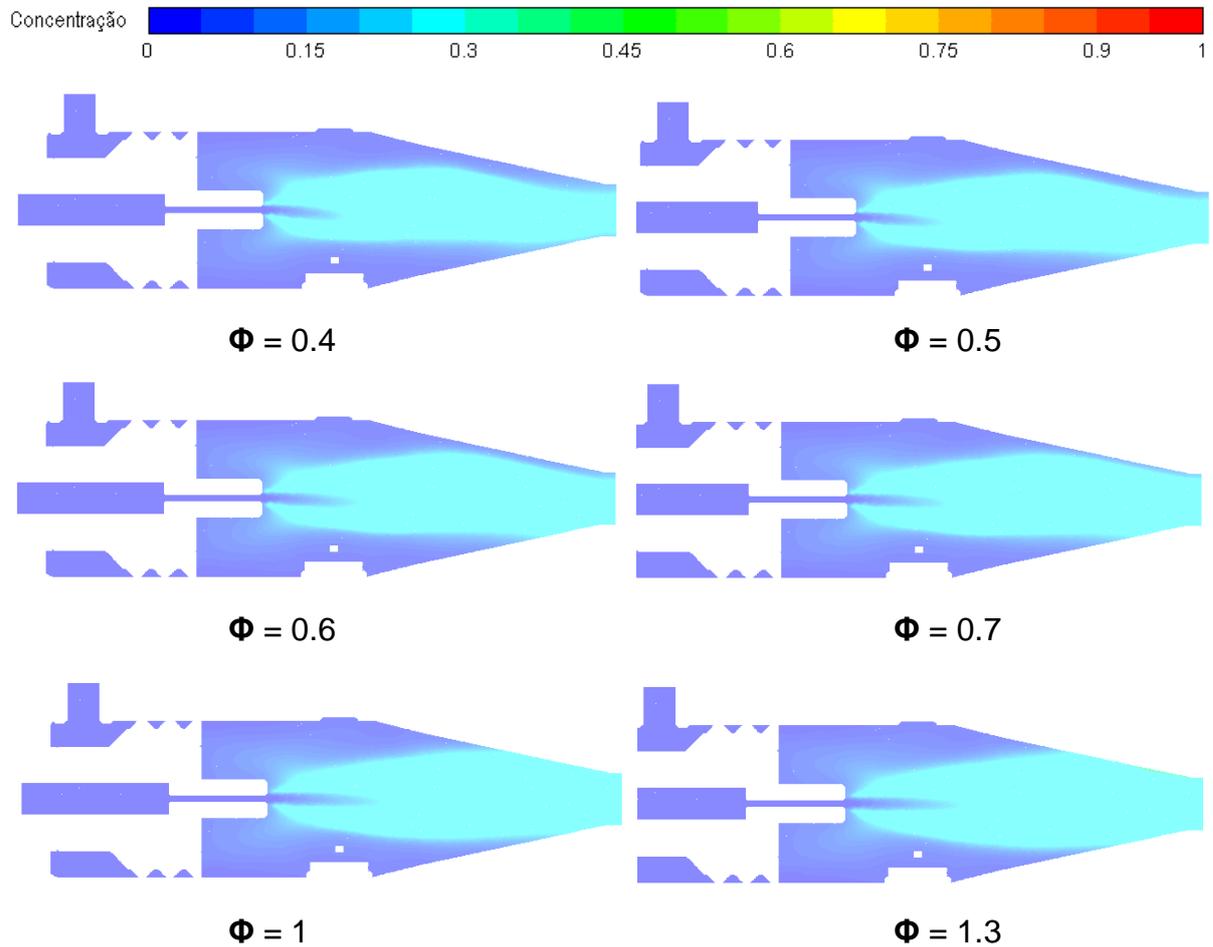


Figura 74. Concentrações de H<sub>2</sub>O para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

Para a água, pode-se observar o mesmo comportamento do CO<sub>2</sub>. Através da Fig. (74), observa-se que a concentração de H<sub>2</sub>O segue a mesma disposição da de CO<sub>2</sub>, conforme  $\Phi$  aumenta, a área de abrangência da água fica maior.

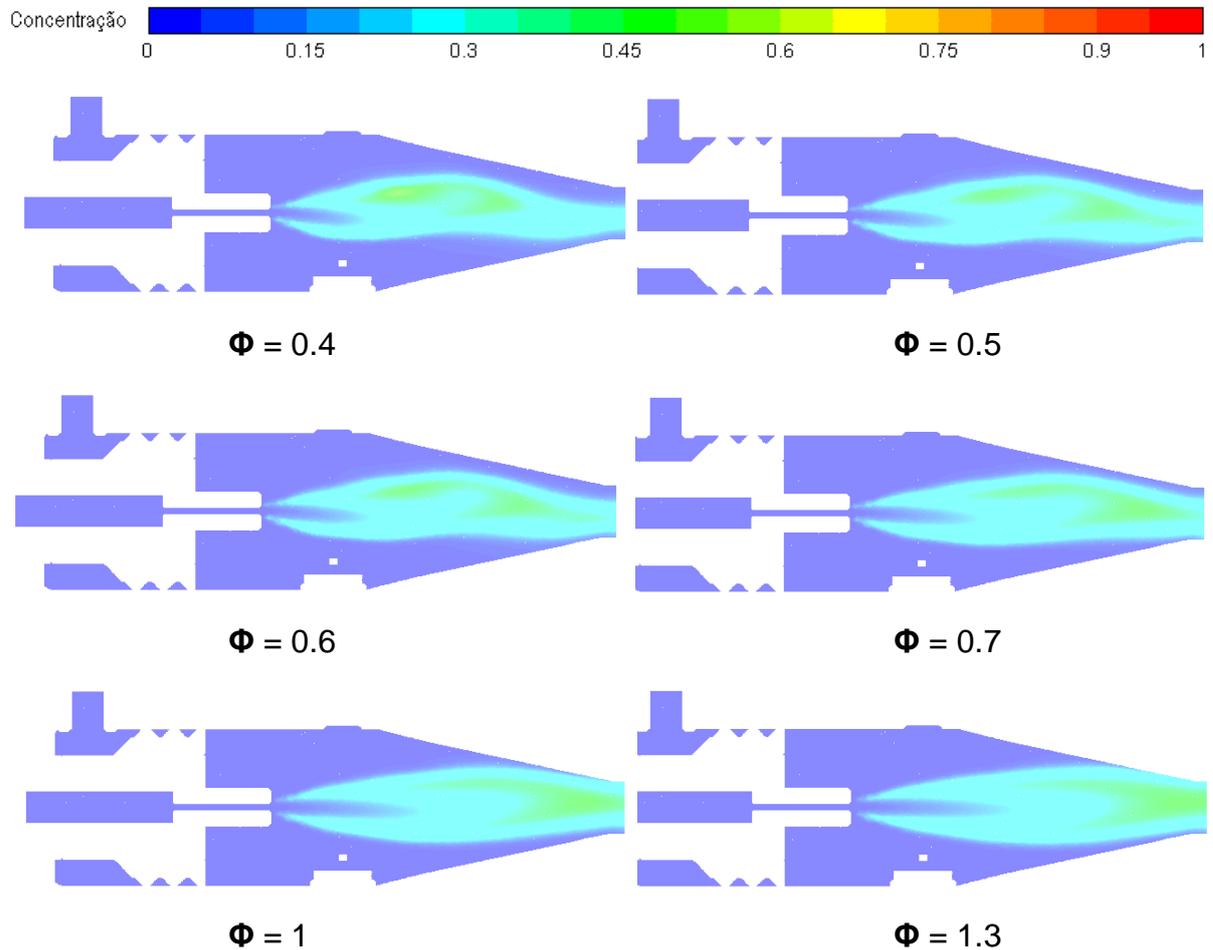


Figura 75. Concentrações de CO para os diferentes valores de  $\Phi$ . Fonte: Elaboração Própria

Para CO, observa-se o mesmo comportamento das espécies químicas anteriores, a medida que a razão equivalente aumenta a área de abrangência também aumenta. Entretanto, pela Fig. (75), pode-se perceber um comportamento diferentes das demais, a região de maior concentração de CO desloca-se para a região da saída do ignitor ao passo que  $\Phi$  aumenta.

As outras espécies químicas da combustão CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> não foram mostradas pois as mesmas apresentam uma concentração muito pequena e quase impercebível para a escala de 0 a 1. Mas, essas espécies apresentam o mesmo

comportamento das demais com a crescente da razão equivalente, a região de abrangência das concentrações também aumenta.

Com isso, é perceptível que as menores temperaturas das chamas estão relacionadas a concentrações baixas de oxigênio, o mesmo dita, também, o comportamento da combustão dentro do ignitor.

Portanto, através das figuras acima, fica claro que as concentrações das espécies químicas alteram-se ao mudar as razões equivalentes. Então, na região de saída do ignitor, as concentrações das espécies são diferentes também, a figura abaixo relata esse comportamento.

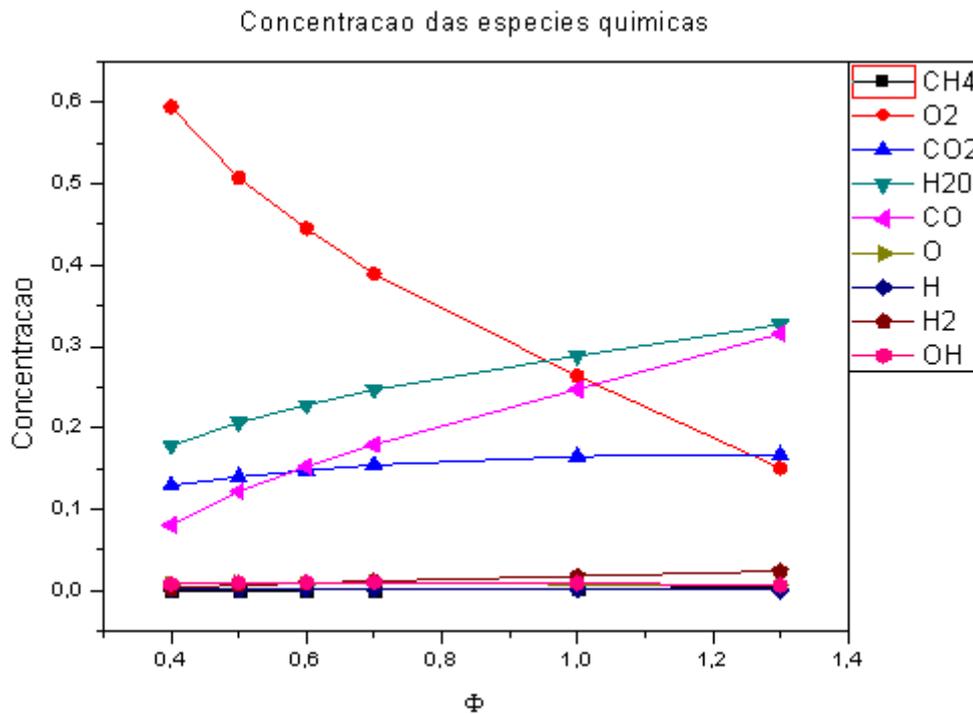


Figura 76. Concentração das espécies químicas na região da saída do ignitor. Fonte: Elaboração Própria

Pela Figura (76), observa-se as concentrações das espécies químicas na região da saída. Percebe-se que as maiores concentrações são para O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO e CO<sub>2</sub>. Conforme  $\Phi$  diminui, as concentrações de O<sub>2</sub> só aumentam, pois para  $\Phi$  menor do que um, a mistura é rica em oxidante. Porém, quando a razão equivalente apresenta valores maiores que uma unidade, a mistura tem menos oxigênio e a combustão produz mais H<sub>2</sub>O e CO.

Essa figura é de suma importância pois mostra as concentrações das espécies que estão sendo injetadas na câmara de combustão do foguete. Nos cálculos preliminares foram obtidos resultados semelhantes, então é feita uma comparação entre os resultados na saída para as simulações e os cálculos no CEA®.

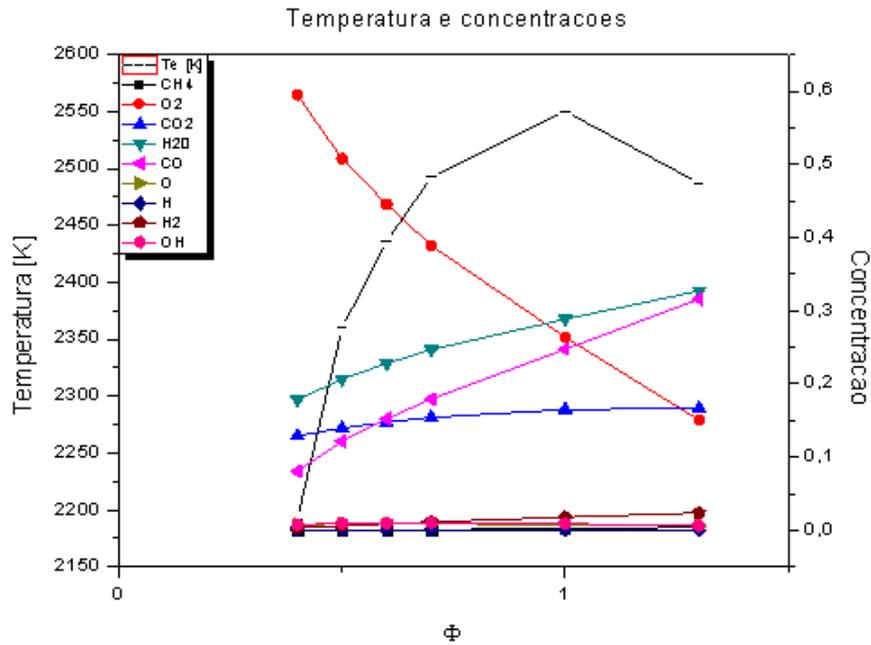


Figura 77. Temperatura e concentrações das espécies químicas na saída calculados pelo Fluent. Fonte: Elaboração Própria

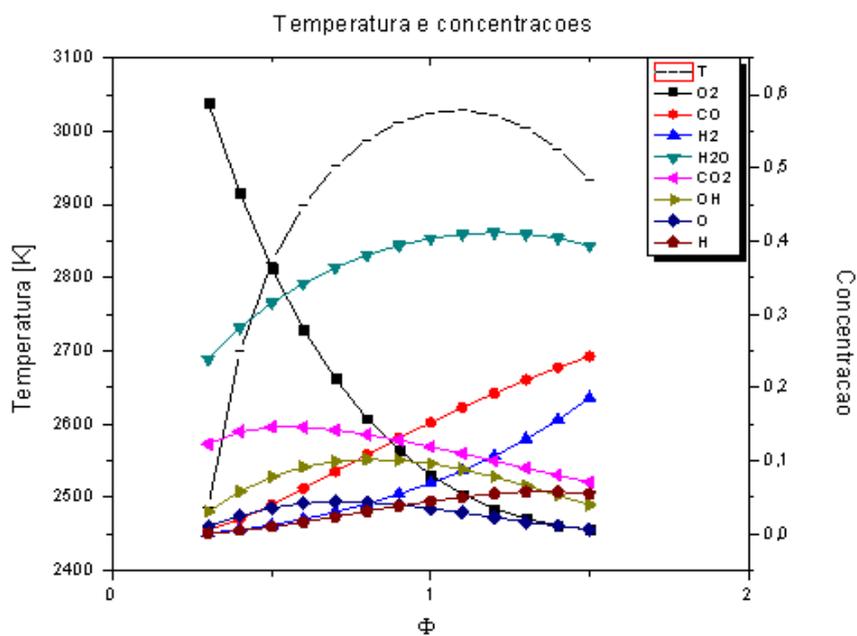


Figura 78. Temperatura e concentrações das espécies químicas na saída calculados pelo CEA. Fonte: Elaboração Própria

A Figura (77) traz os resultados obtidos pelas simulações e a (78), pelos cálculos preliminares no CEA<sup>®</sup>. Através dessas duas figuras, pode-se perceber que as propriedades apresentam comportamentos semelhantes, entretanto, conforme já dito, os cálculos no CEA<sup>®</sup> são ideais, então os valores encontram-se superestimados.

A temperatura é indicada pela linha tracejada nas duas imagens. As mesmas apresentam comportamento semelhantes nas figuras, mas percebe-se que as escalas para a temperatura são diferentes e isso mostra que nos cálculos ideais a temperatura atinge valores mais altos do que os da simulação. E as espécies químicas também tem maiores concentrações nos cálculos ideais do que na simulação.

Isso se deve, pois, conforme dito, os cálculos do CEA<sup>®</sup> não consideram o tempo de combustão e, ainda, a razão equivalente, fixada como parâmetro de entrada, não se altera durante os cálculos. Para as simulações, as razões equivalentes apresentam valores locais diferentes e isso faz com que as concentrações das espécies alterem-se durante a combustão, então os campos de temperaturas desenvolvidos na chama também vão mudando de valores conforme propaga-se pelo ignitor.

Porém, apesar de todas essas diferenças entre os cálculos de CEA<sup>®</sup> e das simulações, os mesmos apresentam comportamentos semelhantes para as propriedades e isso é muito satisfatória, pois, uma vez que os cálculos reais aproximam-se dos ideais, indicam que as considerações feitas estão corretas e as simulações apresentam resultados confiáveis.

## 7. CONCLUSÃO

A busca por tecnologias espaciais economicamente mais viáveis e de uma simplicidade maior só aumentam a cada dia. Além disso, combustíveis mais eficientes e menos poluentes também se encontra entre os principais temas de estudos para o aperfeiçoamento dessa área.

Esses aprimoramentos podem ocorrer em diversos setores da engenharia aeroespacial. No presente trabalho, estuda-se o aperfeiçoamento do sistema de ignição, o qual é de essencial importância para a propulsão de um foguete. Aprimorar sistemas de ignição significa aumentar as viabilidades das missões espaciais.

O ignitor estudado apresenta algumas inovações em relação aos existentes. O mesmo é de simples fabricação, possui a capacidade de alto-resfriamento pelo movimento do oxidante e permite várias ignições. Além do mais, o referido gera uma tocha que será responsável pela ignição dos propelentes na câmara de combustão.

Entretanto, para a fabricação de tal sistema, vários testes precisam ser feitos e isso encarece muito o projeto, pois fabricar todas as peças e testá-las em várias configurações é algo que necessita de muitos recursos financeiros. Deixando claro a necessidade de uma simulação numérica que represente esses testes com confiabilidade, evitando, assim, muitos testes experimentais.

Ademais, para a simulação representar resultados de maior grau de confiança é fundamental reproduzir a combustão do ignitor da melhor maneira possível. Todavia, cálculos numéricos envolvendo o maior número de reações de combustão, como o GRI Mech, são inviáveis, logo esquemas químicos reduzidos são as melhores opções para isso. O mecanismo JL-R demonstrou ser o mais adequado para representar a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  em comparação aos outros esquemas reduzidos, razão pelo qual foi escolhido nesse trabalho.

Cálculos preliminares foram realizados no CEA<sup>®</sup> e após a comparação com os dados experimentais constatou-se que os valores de temperatura dos cálculos eram bem superiores aos dos testes. Isso é explicado, pelo fato, do software ser um programa que faz cálculos de maneira ideal, ou seja, não há perdas, a chama é homogênea e a combustão ocorre instantaneamente, considerando uma queima completa do combustível a baixas razões equivalentes.

Entretanto, esses cálculos foram importantes para definir os parâmetros de entrada para as simulações e para entender como comportam-se a temperatura e as espécies químicas da combustão.

O intuito inicial desse trabalho era de, após todas as simulações, comparar os dados encontrados com os testes experimentais, mas infelizmente os resultados dos testes ainda não foram finalizados, então o escopo do trabalho foi alterado. A partir disso, foram realizadas simulações para razões equivalentes diferentes, para, assim, entender melhor como a combustão  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  comporta-se no caso estudado.

Desta maneira, o fluxo de massa e velocidade do combustível manteve-se constante, enquanto essas mesmas propriedades para o oxidante foram aumentadas, fazendo a razão equivalente diminuir e a razão da energia cinética aumentar. Com isso, foram avaliados os comportamentos da chama, fluxo de calor e das espécies químicas para os diferentes valores de  $\Phi$ .

Cada valor diferente da razão equivalente, significou uma mudança nas propriedades avaliadas. A chama apresenta temperaturas maiores para os menores  $\Phi$ , pois assim gera uma região mais restrita para a mesma desenvolvendo-se melhor. Para os maiores  $\Phi$ , a chama é mais abrangente e apresenta temperaturas menores.

Avaliando a propriedade de auto resfriamento do ignitor, quanto menor a razão equivalente, mais a superfície consegue ser resfriada, pois nessas condições o fluxo de oxidante é maior e restringe a chama, evitando que a mesma encoste nas paredes do ignitor. O que melhor se adapta a essa propriedade é o  $\Phi = 0.4$ .

Como a chama é mais restringida para as menores razões equivalentes, então o fluxo de calor liberado na superfície também é menor. Contudo, os maiores  $\Phi$  disponibilizam mais potência térmica para a câmara de combustão do foguete e apresentam uma combustão mais eficiente. Levando isso em consideração,  $\Phi = 1.3$  é o que apresentou o melhor resultado.

As espécies químicas também se alteram com as mudanças da razão equivalente. Percebe-se que com a redução do oxidante, as concentrações de metano alcançam áreas maiores e isso faz com que a chama tenha uma maior abrangência. As outras espécies químicas apresentam o mesmo comportamento, aumentando  $\Phi$ , as áreas de englobamento das mesmas também crescem.

Avaliando a região da saída, razões equivalentes menores do que um fornecem mais oxigênio para a câmara de combustão, enquanto que para  $\Phi$  maiores que uma unidade, a água é a espécie com maior concentração fornecida.

Então, dependendo dos requisitos da missão, a razão equivalente pode ser mudada. Se for desejado maior eficiência e potência térmica,  $\Phi$  maiores são os mais aconselháveis, porém com  $\Phi$  menores, o ignitor consegue se auto resfriar.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- ACAMPORA L., MARRA F.S., 2017, *Investigation by thermodynamic properties of methane combustion mechanisms under harmonic oscillations in perfectly stirred reactor*, Chemical Engineering Transactions, 57, 1459-1464 DOI: 10.3303/CET1757244.
- BIBRZYCKI, J.; POINSOT, T. *Reduced chemical kinetic mechanisms for methane combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmosphere*. Toulouse, França.
- De OLIVEIRA JUNIOR, L. P. *Análise experimental e teórica de um sistema de ignição tipo tocha baseado na combustão CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>*. Brasília: UnB, 2017.
- FLUENT. *Ansys Fluent 12.0 Theory Guide*. New Hampshire, 2009. Disponível em: <<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node3.htm> >.
- FRASSOLDATI, A. et al. *Simplified kinetic schemes for oxy – fuel combustion*. Gemona del Friuli, Itália, 2014.
- GIORGI, M.G. et al. *Different Combustion Models Applied to High Pressure LOX/CH<sub>4</sub> Jet Flame*. In: 4<sup>th</sup> European Conference for Aerospace Sciences, EUCASS.
- GLASSMAN, I.; YETTER, R. A. *Combustion*. 4<sup>o</sup> edição. San Diego: Elsevier Inc., 2008. 794 p.
- ISA. INSTRUMENTATION, SYSTEM, AND AUTOMATION SOCIETY. TR-12-13-01. *Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors*. Estados Unidos, 1999.
- KUO, K. K. et al. *Fundamental Phenomena on Fuel Decomposition and Boundary-Layer Combustion Processes with Applications to Hybrid Rocket Motors*. University Park, Pennsylvania, 1996.
- MCBRIDE, B. J.; GORDON, S. *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition and Applications: Users Manual and Program Description*. Cleveland: NASA, 1996. 184 p.
- SHYNKARENKO, O. et al. *Design of a nitrous oxide/methane ignition system for hybrid rocket motor*. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 23, 2015, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COBEM, 2015.
- SUTTON, G. P.; BIBLARZ, O. *Rocket Propulsion Elements*. 8<sup>o</sup> edição. Nova Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2010. 786 p.
- URNS, S. R. *An Introduction to combustion: Concepts and Applications*. 2<sup>o</sup> edição. Singapura: McGraw-Hill Higher Education, 2000. 700 p.