

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO DE UMA CHAMA SEM PRÉ-MISTURA  
DE COMBUSTÍVEL DE BAIXO PODER CALORÍFICO NO INTERIOR DE UM TUBO

por

Milton Mario Moreira Pinto Neto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2012

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO NUMÉRICO DE UMA CHAMA SEM PRÉ-MISTURA  
DE COMBUSTÍVEL DE BAIXO PODER CALORÍFICO NO INTERIOR DE UM TUBO

por

Milton Mario Moreira Pinto Neto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey  
UFRGS/DEMEC

Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha  
UFRGS/DEMEC

Prof. Dr. Volnei Borges  
UFRGS/DEMEC

Porto Alegre, 07, Dezembro de 2012.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço minha mãe Susie Ane de Freitas sem a qual não seria possível ter realizado o curso.

PINTO, M. M. M. **Desenvolvimento de um modelo numérico de uma chama sem pré-mistura de combustível de baixo poder calorífico no interior de um tubo.** 2012. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **RESUMO**

O estudo em questão propõe o desenvolvimento de um modelo numérico para analisar o comportamento de uma chama sem pré-mistura para um combustível de baixo poder calorífico no interior de um tubo em escoamento laminar. A ferramenta numérica implementada permite gerar o campo de fração de mistura e o campo de temperatura para o escoamento de ar e combustível no interior do tubo em regime permanente. Para tal, foi construído um modelo axissimétrico para desenvolver as equações de conservação de energia, momento e transporte da fração de mistura utilizando o método dos volumes finitos através do método iterativo de Gauss-Seidel e Power Low como esquema de interpolação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Difusão de chama sem pré-mistura, Campo de temperaturas, Gauss-Seidel.

PINTO, M. M. M. Development of a numerical model to low calorific fuel flame without pre-mixing of fuel inside a tube. 2012. 15 pages. Monograph (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

The study proposes the development of a numerical model to analyse a low calorific fuel flame without pre-mixing inside a tube under laminar flow. The implemented numeric tool allows generating the mixture fraction field and the temperature field to the air-fuel flow inside the tube under permanent regime. Therefore, it was built an axisymmetric model to develop the energy conservation equations for the mixture fraction using the Finite Volume Method through the Gauss-Seidel iterative method and Power Law as interpolation scheme.

**KEYWORDS:** Non-premixed flame diffusion, Temperature field, Gauss-Seidel.

## ÍNDICE

Pág.

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
3.1. Fração de Mistura.....	2
3.2. Estequiometria.....	3
3.3. Entalpia de combustão .....	3
3.4. Fração mássica .....	4
3.5. Temperatura da mistura.....	5
4. METODOLOGIA .....	5
4.1. Modelo Físico.....	5
4.2. Modelo matemático.....	6
4.3. Solução.....	8
5. RESULTADOS .....	8
5.1. Estudo de independência de malha e avaliação da estrutura da chama .....	8
5.2. Estudo da propagação da chama no interior do tubo .....	12
5.3. Estudo da relação ar/combustível na entrada do tubo .....	13
6. CONCLUSÃO .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15

## 1. INTRODUÇÃO

A combustão é um processo o qual decorre de reações químicas exotérmicas entre um combustível e um comburente que depende de diversas variáveis físicas conciliando conceitos da mecânica dos fluídos, termodinâmica e química. Presentes em inúmeras aplicações da engenharia, os processos de combustão são responsáveis pela produção de grande parte da energia no mundo em transporte, usinas termelétricas, processos industriais, aquecimento doméstico, geradores, cozimento de alimentos, etc (Coelho *et alli*, 2007).

A análise do presente trabalho foi desenvolvida para a combustão do metano em ar, porém o modelo gerado pode ser aplicado a outros combustíveis. O metano encontra-se como componente principal nas exalações naturais de regiões petrolíferas, presente em cavidades nos estratos de jazidas de carvão mineral. O metano também é a base do biogás e pode ser produzido pela digestão anaeróbica de matéria orgânica, como lixo e esgotos, através de micro-organismos. As principais fontes de metano são (SAFFIOTI *et alli*, 1968):

- Vulcões de lama e falhas geológicas;
- Resíduos orgânicos decompostos;
- Fontes naturais (pântanos);
- Combustível mineral (o metano é extraído de depósitos geológicos como um combustível mineral juntamente com outros combustíveis hidrocarbonetos);
- Processo de digestão em animais herbívoros;
- Bactérias encontradas em plantações de arroz;
- Aquecimento ou combustão de biomassa anaeróbica.

Intrinsecamente o estudo de um combustível em combustão depende da análise de seu poder calorífico (quantidade de calor liberada na reação de oxidação completa de uma unidade de massa do combustível), o qual pode ser medido em um calorímetro.

Este estudo tem como intuito fazer um *retrofitting* de um calorímetro (figura 1.1) de gás existente no LETA (Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos), visando a sua aplicação para caracterização de combustíveis de baixo poder calorífico. Assim justifica-se o desenvolvimento de uma ferramenta de calculo para suportar este estudo para determinar o comportamento da chama a partir da estimativa dos campos de fração de mistura e de temperatura da difusão da chama no interior do tubo.

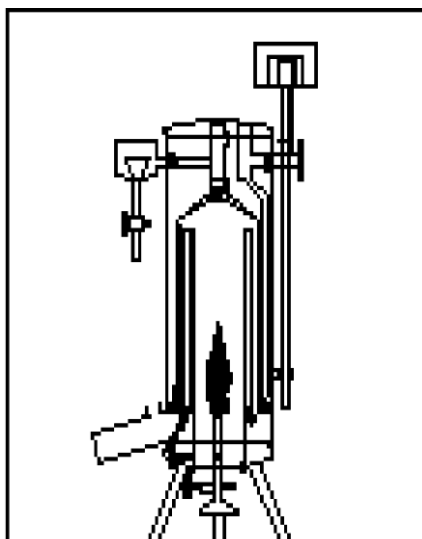


Figura 1.1 - Calorímetro.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver e implementar numericamente um modelo para uma chama sem pré mistura no interior de um tubo. A ferramenta numérica permite gerar o campo de fração de mistura e o campo de temperatura para o escoamento laminar de ar e combustível assim como de sua zona de mistura no interior de um tubo em regime permanente.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1. Fração de Mistura

Para problemas de combustão em que há uma mistura reativa entre dois escoamentos homogêneos, mas distintos, no caso combustível e oxidante, identificados respectivamente pelos índices 1 e 2, pode-se definir uma variável  $F$ , designada por fração de mistura, como sendo a fração mássica de matéria proveniente do combustível (Coelho, 2007).

$$F = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (3.1)$$

Esta definição é aplicável a um volume de controle infinitesimal (isto é muito pequeno do ponto de vista macroscópico, porém de dimensões superiores as moleculares).

A fração de mistura varia entre 0 e 1, sendo zero no caso de só haver oxidante e um no caso de só haver combustível. A fração de mistura é um escalar conservado e pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho F)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} F) = \nabla \cdot (\rho D^M \nabla F) \quad (3.2)$$

Considerando que o número de Lewis varia pouco de espécie para espécie, sendo próximo de um para todas as espécies químicas, é frequente assumir em processos de combustão (Coelho, 2007):

$$L_e = 1$$

Sabendo que o numero de Lewis é dado por:

$$L_e = \frac{Sc}{Pr} = \frac{v/D^M}{v/\alpha} = \frac{\kappa}{\rho D^M C_p} \quad (3.3)$$

Pode-se então assumir o coeficiente difusivo da equação de conservação como:

$$\rho D^M = \frac{\kappa}{C_p} \quad (3.4)$$



O caso em estudo neste trabalho é analisado para a condição de regime permanente, sendo assim a equação da conservação é utilizada da seguinte forma:

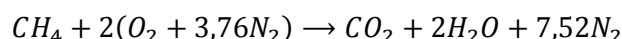
$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} F) = \nabla \left( \frac{\kappa}{C_p} \nabla F \right) \quad (3.5)$$

### 3.2. Estequiometria

Reações de combustão são reações químicas que envolvem a oxidação completa de um combustível. Os principais elementos químicos que constituem um combustível são carbono, hidrogênio e em alguns casos, enxofre, os quais reagem com o oxigênio. Um processo de combustão pode ser descrito por uma reação química global na forma:



Qualquer combustível convencional requer, de acordo com sua composição, uma quantidade específica e calculável de oxigênio (portanto de ar, uma vez que este é o agente comum de fornecimento) para atingir teoricamente uma reação completa. Caso haja menos do que essa quantidade ocorrerá combustão incompleta e, portanto perda de calor potencial. Para o caso de haver mais do que essa quantidade, ocorrerá perdas excessivas de gás de combustão e de temperatura. Para um combustível comum como o metano a equação de combustão em condições estequiométricas é descrita como (Coelho, 2007):



### 3.3. Entalpia de combustão

Todas as reações químicas são acompanhadas pela absorção ou liberação de energia. A energia liberada em processos de combustão pode ser expressa em termos de entalpia ou energia interna das espécies químicas intervenientes, recorrendo ao princípio de conservação da energia expresso através a 1ª lei da termodinâmica. A entalpia de formação de uma substância é a energia associada à reação de formação de uma unidade massa dessa substância a partir dos seus elementos no estado natural.

Considerando uma mistura reativa num sistema aberto, com variação desprezível de energia cinética e potencial, e considerando que só há trabalho realizado pelas forças de pressão, a 1ª lei da termodinâmica permite afirmar que num processo a pressão constante, a energia liberada ou absorvida numa reação química é igual a variação de entalpia da mistura. A entalpia de combustão padrão para a reação de combustão do metano em ar em condições estequiométrica é dada por (Coelho, 2007):

$$\Delta \bar{h}_R^0(T_{ref}) = |\bar{h}_{fCO_2}^0(T_{ref}) + 2\bar{h}_{fH_2O}^0(T_{ref}) + 7,52\bar{h}_{fN_2}^0(T_{ref})| - |\bar{h}_{fCH_4}^0(T_{ref}) + 2\bar{h}_{fO_2}^0(T_{ref}) + 7,52\bar{h}_{fN_2}^0(T_{ref})| \quad (3.6)$$

Onde  $\bar{h}_{F,i}^0$  representa é a entalpia de formação da substância referida  $i$ .

Atendendo que:

$$\bar{h}_{fO_2}^0(T_{ref}) = \bar{h}_{fN_2}^0(T_{ref}) = 0$$

Utilizando dados de tabela se tem (Coelho, 2007):

$$\bar{h}_{f\text{CO}_2}^0(T_{\text{ref}}) = -393522 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{f\text{H}_2\text{O}}^0(T_{\text{ref}}) = -241826 \text{ kJ/kmol}$$

$$\bar{h}_{f\text{CH}_4}^0(T_{\text{ref}}) = -74873 \text{ kJ/kmol}$$

A entalpia de combustão do metano resulta:

$$\Delta \bar{h}_R^0(T_{\text{ref}}) = -802301 \text{ kJ/kmol}$$

### 3.4. Fração mássica

Considerando que a equação 3.1 seja aplicada em um pequeno volume,  $F$  é apenas um tipo de fração mássica formada pela combinação das frações mássicas de combustível, oxidante e produtos. As quais são relacionadas de acordo com a sua posição em relação à chama (Turns, 2000).

Região no interior da chama ( $F_{\text{estequiométrico}} < F \leq 1$ ):

$$Y_F = \frac{F - F_{\text{estequiométrico}}}{1 - F_{\text{estequiométrico}}} \quad (3.7)$$

$$Y_{Ox} = 0 \quad (3.8)$$

$$Y_{Pr} = \frac{1 - F}{1 - F_{\text{estequiométrico}}} \quad (3.9)$$

Na camada da chama ( $F = F_{\text{estequiométrico}}$ ):

$$Y_F = 0 \quad (3.10)$$

$$Y_{Ox} = 0 \quad (3.11)$$

$$Y_{Pr} = 1 \quad (3.12)$$

Região exterior a chama ( $0 \leq F < F_{\text{estequiométrico}}$ ):

$$Y_F = 0 \quad (3.13)$$

$$Y_{Ox} = 1 - \frac{F}{F_{\text{estequiométrico}}} \quad (3.14)$$

$$Y_{Pr} = \frac{F}{F_{\text{estequiométrico}}} \quad (3.15)$$

Onde  $Y_F$ ,  $Y_{Ox}$  e  $Y_{Pr}$  são respectivamente fração mássica de combustível, oxidante e produtos. Para o caso em questão de combustão do metano:

$$F_{\text{estequiométrico}} = 0,21645$$

### 3.5. Temperatura da mistura

Para determinar a temperatura da mistura como função da fração de mistura é utilizada a equação de energia de Shvab-Zeldovich (Turns, 2000):

$$h = \sum Y_i \bar{h}_{F,i}^0 + \int_{T_{ref}}^T C_p \Delta T \quad (3.16)$$

Onde  $h$  é a entalpia da mistura e também um escalar conservado, que para uma geometria axissimétrica pode ser escrito como:

$$\nabla \cdot (r\rho\vec{v}h) = \nabla \cdot \left( r \frac{\kappa}{C_p} \nabla h \right) \quad (3.17)$$

Considerando as condições já citadas para o caso em análise, número de Lewis unitário e regime permanente, além de desconsiderar o termo da energia cinética na equação da conservação para entalpia.

## 4. METODOLOGIA

Os métodos numéricos resolvem uma ou várias equações diferenciais obtidas do modelamento matemático do problema investigado. A resolução consiste na substituição das derivadas existentes nestas equações, por expressões algébricas aproximadas que envolvem a função incógnita. Na solução numérica, se aceita como hipótese inicial, ter um número discreto de pontos, isto é, um número finito de pontos, logo, se aceita também que a solução terá um determinado erro que pode ser controlado a partir desta quantidade de pontos. Quanto maior for o número de pontos mais perto da solução exata ficará a solução numérica. Porém, quanto maior a quantidade de pontos, maior será o número de variáveis e maior será o número de equações. Portanto, maior será o esforço computacional para encontrar os valores procurados. Dentro dos métodos numéricos existem diversos caminhos diferentes para resolver as equações diferenciais, dentre eles: o Método dos Volumes Finitos (MVF), o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). A presente análise será desenvolvida usando o Método dos Volumes Finitos.

O MVF consiste em aproximar a equação que representa o fenômeno através da conservação da propriedade do material num volume elementar. Isto pode ser feito fazendo um balanço da propriedade em questão no volume elementar ou de controle e também através da integração sobre o volume de controle, no tempo e no espaço, da equação na forma conservativa (Maliska, 2004).

### 4.1. Modelo Físico

O modelo físico (figura 4.1) representa o tubo do calorímetro e a saída do alimentador de combustível por onde ocorrem, respectivamente, as entradas de ar e combustível ambos com a mesma temperatura de entrada, no caso arbitrado para uma temperatura ambiente de 300K, da qual decorrem os valores iniciais para as outras propriedades dos dois fluidos. Já as velocidades de entrada de ar e combustível são as condições iniciais em estudo no presente trabalho para se poder analisar o comportamento da combustão conforme varia relação ar/combustível das vazões mássicas na entrada do tubo.

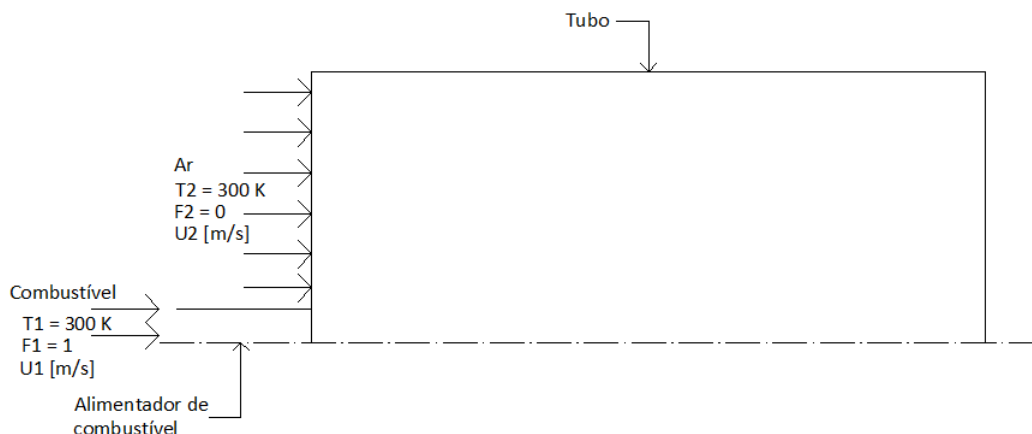


Figura 4.1 - Modelo físico.

Outra condição de entrada é a fração de mistura que de acordo com sua definição na equação 3.1 deve ser unitária na saída do alimentador de combustível onde há apenas combustível e nulo no restante da entrada do tubo onde há apenas ar. Fato que decorre da condição imposta de chama sem pré-mistura.

#### 4.2. Modelo matemático

A geometria do interior do tubo e do escoamento foi dividida de forma semelhante à malha exposta na figura 4.2 onde é possível aplicar o método de Gauss-Seidel.

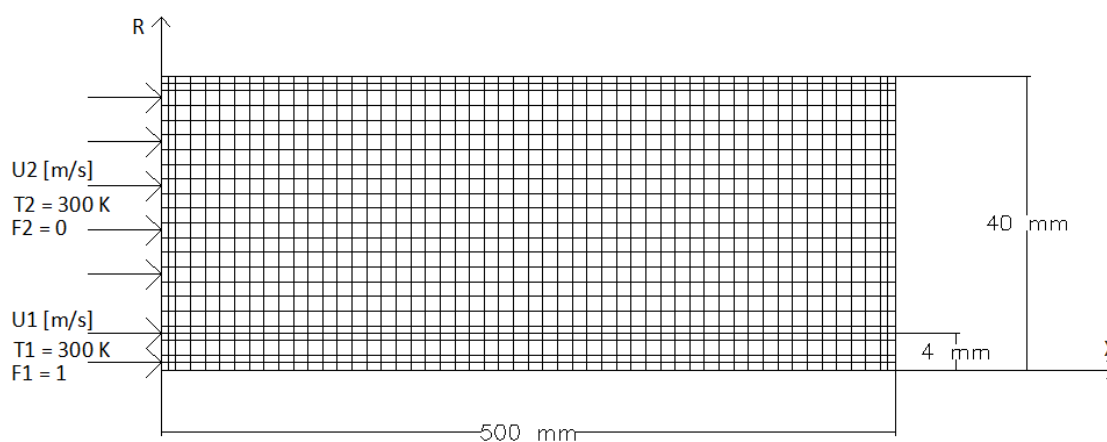


Figura 4.2 - Modelo físico na condição como foi desenvolvida a análise.

O método de Gauss-Seidel utiliza a seguinte equação para um escalar conservado " $\phi$ " (Maliska, 2004):

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (4.1)$$

Onde " $b$ " representa o termo fonte que para o tubo em questão é nulo. Sendo assim o coeficiente " $a_P$ " fica:

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (4.2)$$



O método iterativo de Gauss-Seidel foi implementado para calcular o campo de fração de mistura utilizando a linguagem FORTRAN 90 conforme a sequência de operações lógicas do fluxograma da figura 4.4.

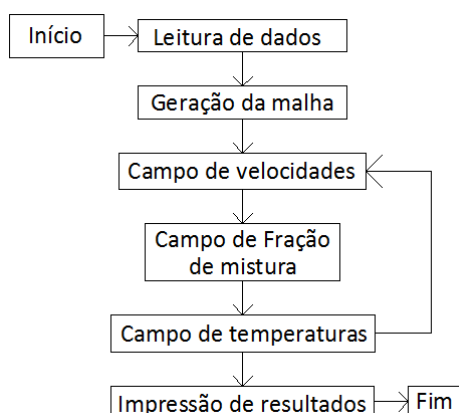


Figura 4.4 – Fluxograma do código desenvolvido.

O algoritmo desenvolvido começa pela entrada das propriedades de ar e combustível para uma temperatura inicial para gerar um campo de velocidades que é utilizado para calcular um campo de fração de mistura que fornece valores para o cálculo do campo de temperaturas. Após este processo é atualizado o valor das propriedades em função da temperatura no escoamento para atualizar os campos de velocidade e fração de mistura, *loop* realizado até o desenvolvimento pleno do escoamento no interior do tubo. O campo de velocidades utilizado desconsidera a variação de pressão do escoamento no interior do tubo.

### 4.3. Solução

Para a análise do campo de fração de mistura do escoamento de ar e combustível no interior do tubo foram geradas malhas sucessivamente cada uma mais refinada do que a anterior tendo em vista obter convergência nos valores das frações de mistura de conferência.

Onde para cada malha estabelecida foi utilizado como critério de convergência a variação relativa “ $\varepsilon$ ”.

$$\varepsilon = \left| \frac{\Phi_p - \Phi_p^0}{\Phi_p^0} \right| \leq 10^{-8} \quad (4.5)$$

Sendo para o caso em questão:

$\Phi_p$  = valor atual da fração de mistura de conferência

$\Phi_p^0$  = valor da iteração anterior da fração de mistura de conferência

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Estudo de independência de malha e avaliação da estrutura da chama

Após desenvolver a rotina de acordo com as equações apresentadas faz-se necessário um estudo de refino de malha para se obter convergência nos valores de conferência arbitrados para verificar a independência de malha do modelo numérico.

O estudo foi realizado para uma velocidade de entrada de 0,5m/s igual para os dois escoamentos de ar e metano, onde os resultados para as malhas geradas são mostrados a seguir:

A primeira malha (721 pontos em X e 112 pontos em R) reproduziu o campo de fração de mistura exposto na figura 5.1:

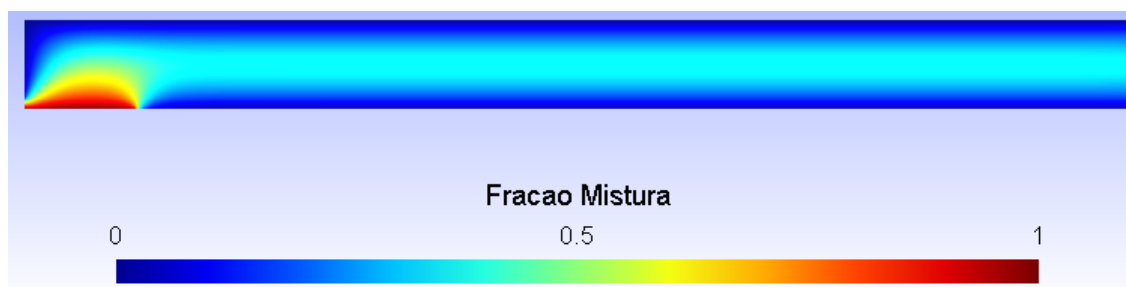


Figura 5.1 – Campo de fração de mistura para uma malha de 721x112 pontos

A segunda malha (901 pontos em X e 140 pontos em R) reproduziu o campo de fração de mistura exposto na figura 5.2:

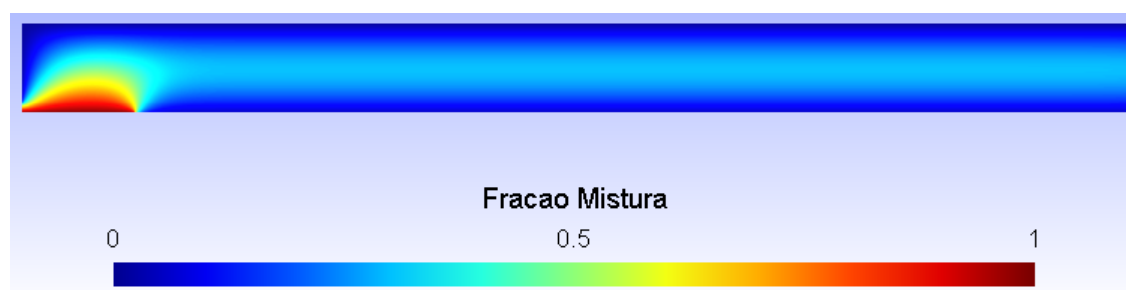


Figura 5.2 – Campo de fração de mistura para uma malha de 901x140 pontos

A terceira malha (1081 pontos em X e 168 pontos em R) reproduziu o campo de fração de mistura exposto na figura 5.3:

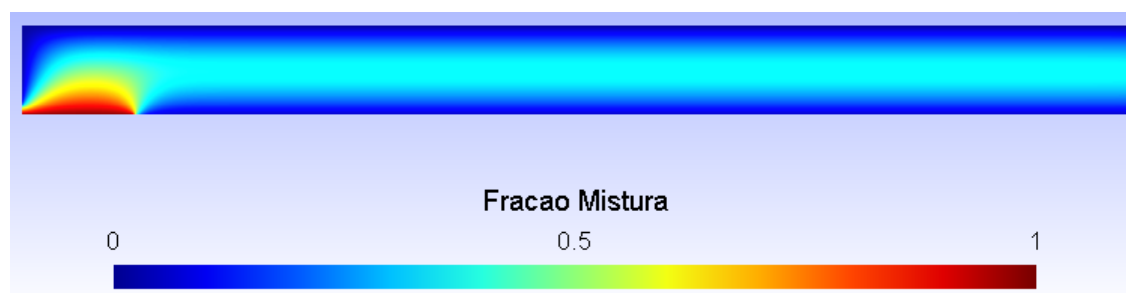


Figura 5.3 – Campo de fração de mistura para uma malha de 1081x168 pontos.

Para cada malha descrita anteriormente foi conferida a fração de mistura em dois pontos denominados FMC1 e FMC2, cujos valores estão expostos na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Tabela de convergência.

Malha	pontos		FMC1	Diferença [%]	FMC2	Diferença [%]
	X	R				
1	721	112	0,760179		0,856010	
2	901	140	0,769687	1,251	0,862289	0,734
3	1081	168	0,771164	0,192	0,864185	0,220

Na tabela 5.1 observa-se que a diferença diminui conforme a malha é refinada, sendo no último modelo uma diferença de 0,22%, fato que indica a convergência do modelo para a condição proposta.

Visto que o modelo apresenta convergência faz-se necessário comparar a estrutura da chama calculada frente ao formato esperado pela literatura para as condições propostas. De acordo com Turns (2000) a estrutura para um jato laminar reativo nestas condições apresenta um comportamento conforme o exposto na figura 5.4.

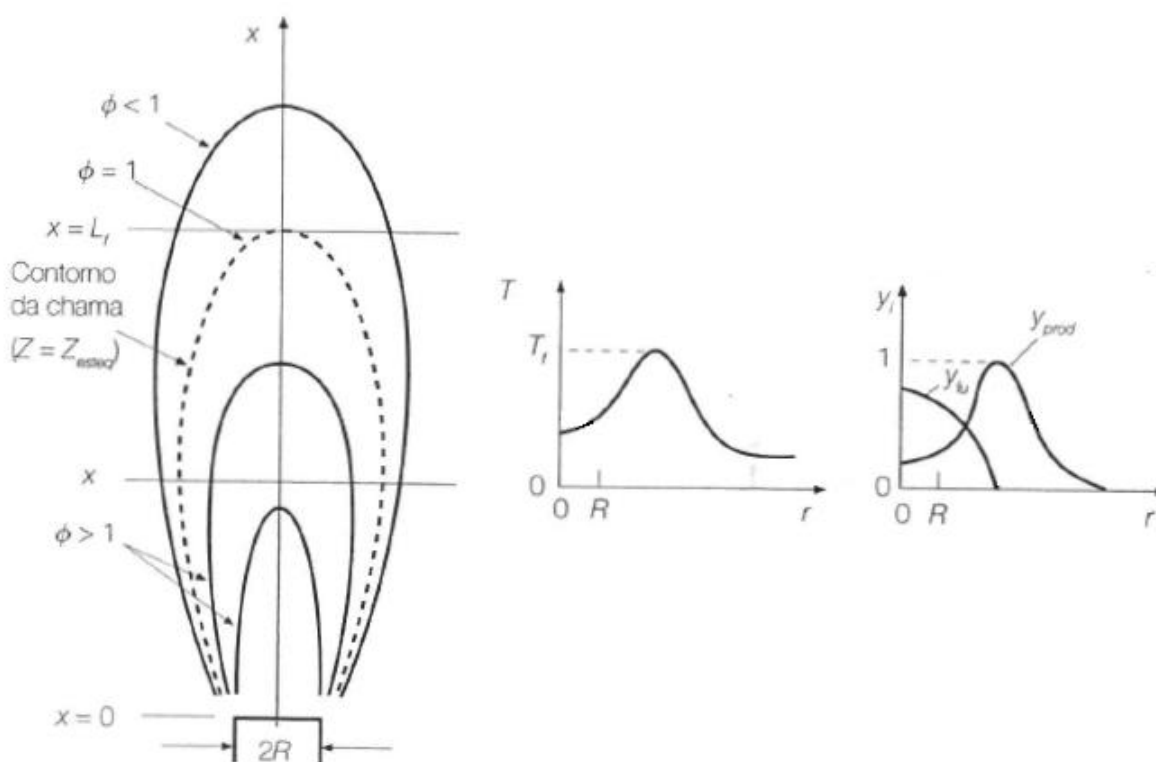


Figura 5.4 – Estrutura de um jato laminar reativo (adaptado de Turns, 2000).

A partir dos resultados da fração de mistura e entalpia podem ser obtidos dados para traçar um gráfico da temperatura em função do raio (figura 5.5) e um gráfico das frações mássicas em função do raio (figura 5.6), ambos em uma posição “x” de aproximadamente metade da altura da chama conforme visto na figura 5.4.



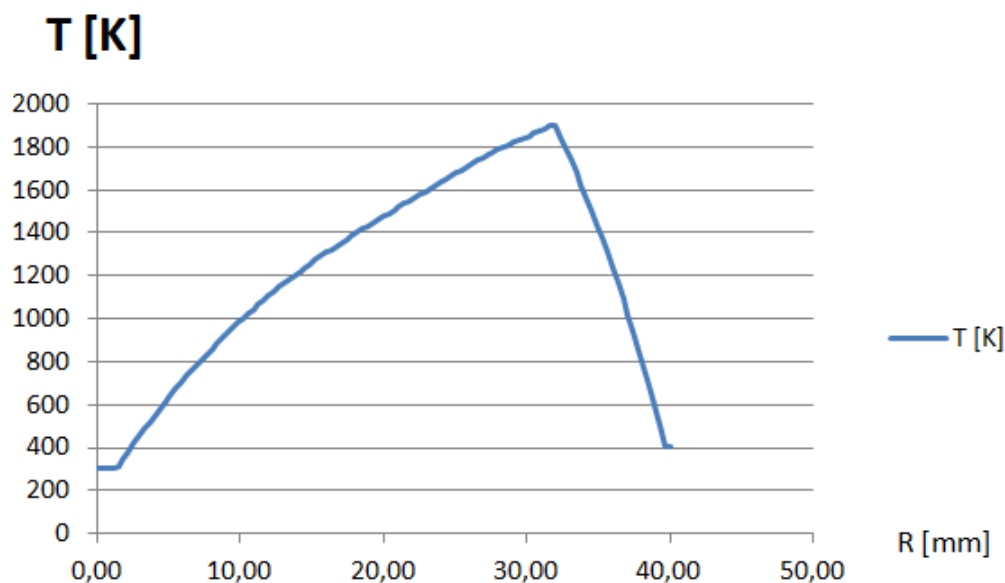


Figura 5.5 – Gráfico da temperatura em [K] a longo do raio.

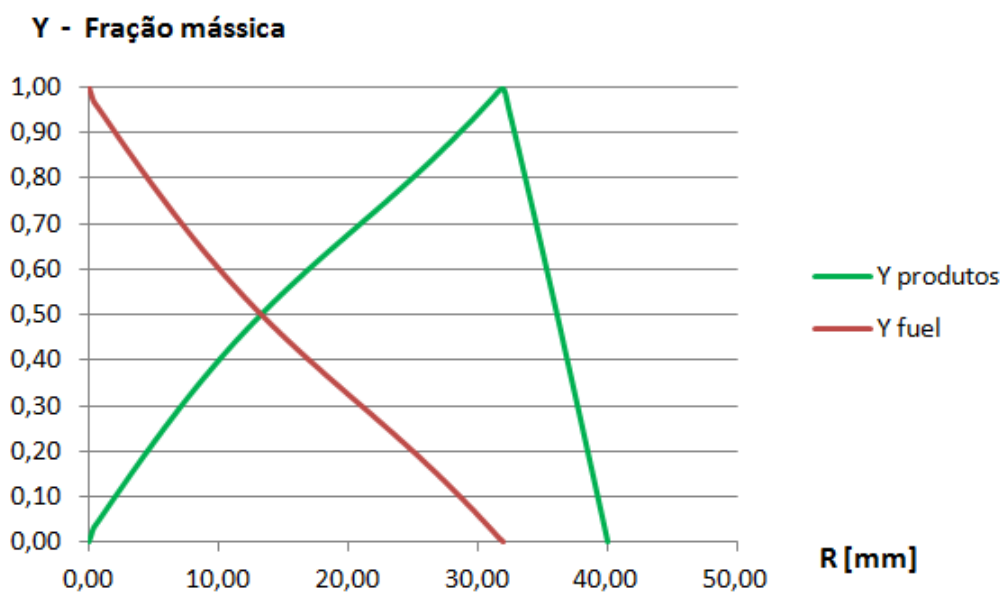


Figura 5.6 – Gráfico das frações mássicas a longo do raio.

A figura 5.6 apresenta a fração mássica dos produtos (indicada como “Y produtos”) e a fração mássica do combustível (indicada como “Y fuel”). Nas figuras 5.5 e 5.6 não é apresentado o raio da alimentação de combustível que vale 4mm.

Comparando os resultados de temperatura e frações mássicas observa-se que o modelo representa qualitativamente a estrutura de um jato laminar reativo. Para se obter uma distribuição mais suave da temperatura e das frações mássicas seria necessário refinar a malha.

## 5.2. Estudo da propagação da chama no interior do tubo

Análise realizada para verificar o comportamento da chama conforme é aumentada a velocidade de entrada, no caso considerada igual para os dois escoamentos de ar e metano.

Para uma velocidade de entrada de 0,5m/s é obtido o campo de temperaturas exposto na figura 5.7:

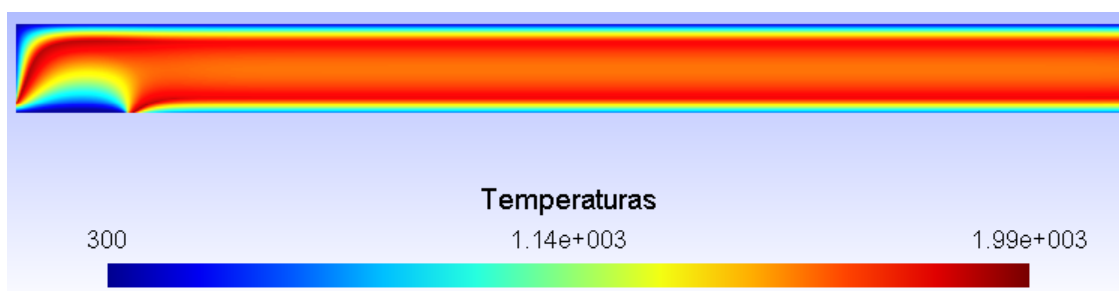


Figura 5.7 – Campo de temperaturas em [K] para uma velocidade de entrada de 0,5m/s.

Para uma velocidade de entrada de 0,75m/s é obtido o campo de temperaturas exposto na figura 5.8:

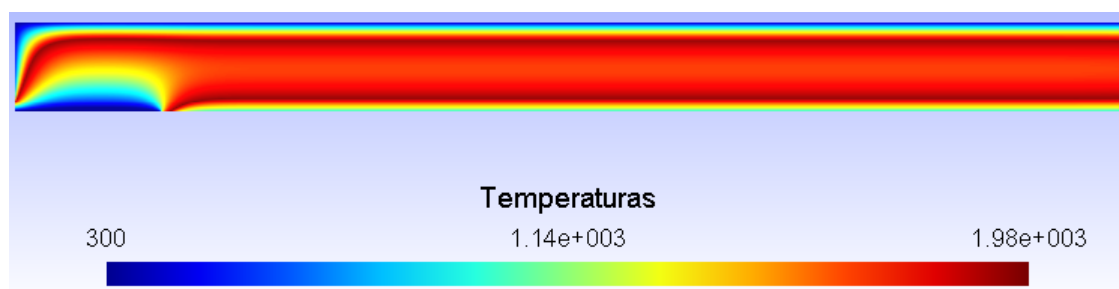


Figura 5.8 – Campo de temperaturas em [K] para uma velocidade de entrada de 0,75m/s.

Para uma velocidade de entrada de 1m/s é obtido o campo de temperaturas exposto na figura 5.9:

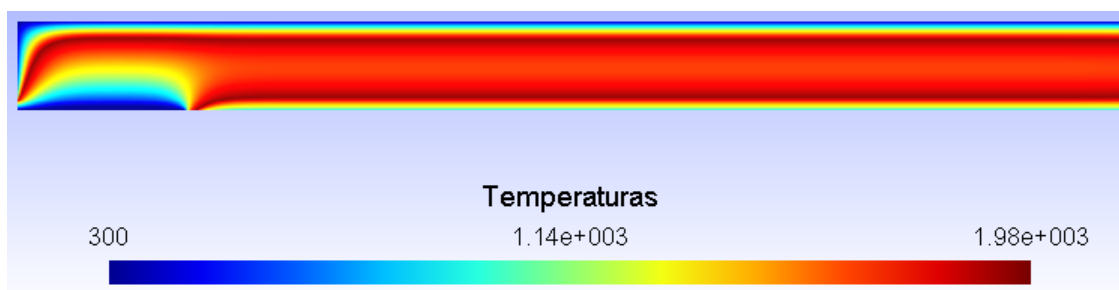


Figura 5.9 – Campo de temperaturas em [K] para uma velocidade de entrada de 1m/s.

Nas figuras 5.7, 5.8 e 5.9 é observado que o modelo representa a propagação de chama no interior do tubo conforme aumenta a velocidade.

### 5.3. Estudo da relação ar/combustível na entrada do tubo

No referido estudo é analisado o comportamento do escoamento quando ocorre diferença nas velocidades de entrada do ar e do combustível. No modelo numérico as velocidades de entrada são identificadas como:

U1: velocidade de entrada do combustível.

U2: velocidade de entrada do ar.

Considerando o ar com uma velocidade de entrada de 0,1m/s e o combustível com uma velocidade de entrada de 1m/s é obtido um campo de fração de mistura exposto na figura 5.10 e um campo de temperaturas exposto na figura 5.11:

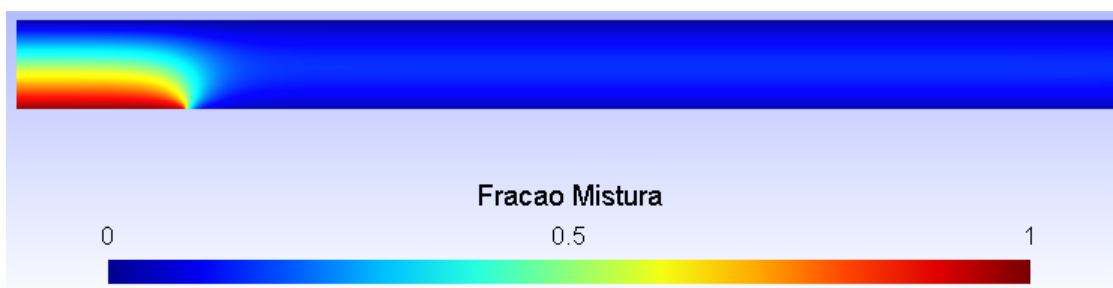


Figura 5.10 – Campo de fração de mistura para  $U1 = 1\text{m/s}$  e  $U2 = 0,1\text{m/s}$ .

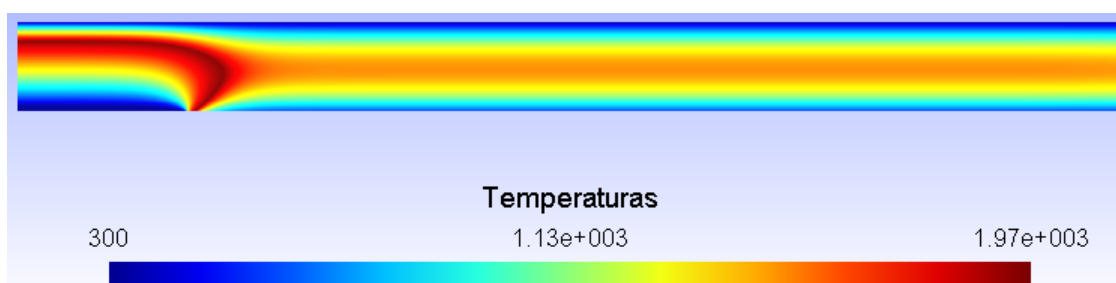


Figura 5.11 – Campo de temperaturas em [K] para  $U1 = 1\text{m/s}$  e  $U2 = 0,1\text{m/s}$ .

Considerando o ar com uma velocidade de entrada de 0,5m/s e o combustível com uma velocidade de entrada de 1m/s é obtido o campo de temperatura exposto na figura 5.12:

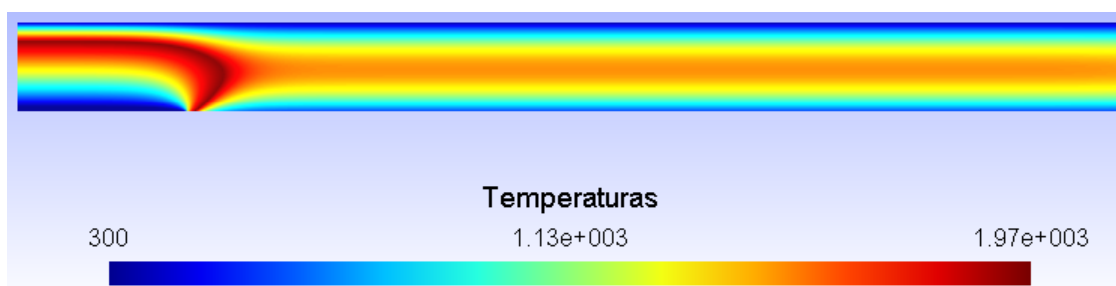


Figura 5.12 – Campo de temperaturas em [K] para  $U1 = 1\text{m/s}$  e  $U2 = 0,5\text{m/s}$ .

Considerando o ar com uma velocidade de entrada de 1m/s e o combustível com uma velocidade de entrada de 0,5m/s é obtido um campo de fração de mistura exposto na figura 5.13 e um campo de temperaturas exposto na figura 5.14:

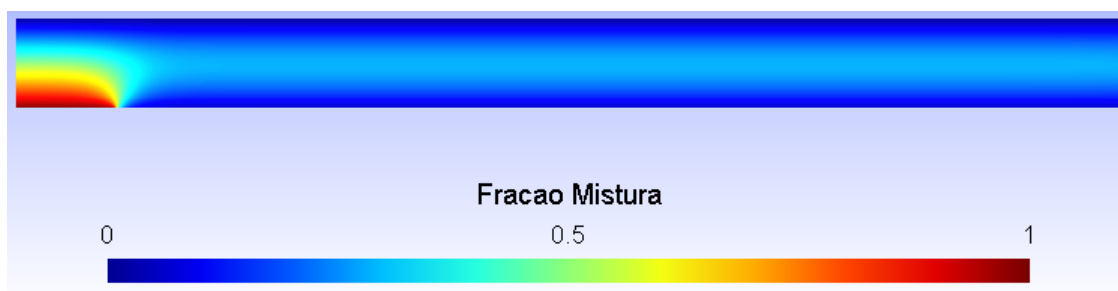


Figura 5.13 – Campo de fração de mistura para  $U_1 = 0,5\text{m/s}$  e  $U_2 = 1\text{m/s}$ .

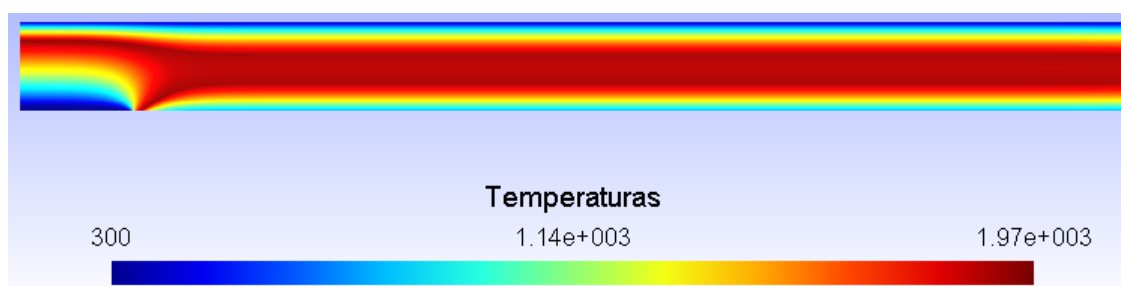


Figura 5.14 – Campo de temperaturas em [K] para  $U_1 = 0,5\text{m/s}$  e  $U_2 = 1\text{m/s}$ .

O modelo desenvolvido apresentou um campo de temperaturas de maior intensidade nos valores da temperatura conforme é aumentada a quantidade de entrada ar em relação ao combustível, ou seja, ocorre uma produção maior de calor. Sabe-se que para realizar a combustão é necessária uma quantidade de ar estequiométrica, chamada ar teórico. Entretanto, para assegurar a combustão completa é comum se utilizar um “excesso de ar” de modo a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama.

Também pode ser visualizado que o modelo representou mudança do escoamento na entrada do tubo para quando as velocidades de entrada não são iguais. Porém o modelo implementado não representa os efeitos de borda do escoamento no final do tubo.

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para o campo de fração de mistura do escoamento no interior do tubo apresentam distribuições semelhantes para as malhas geradas e indicam convergência como visto pela análise da fração de mistura de conferência. O modelo numérico representou um campo temperaturas de maior intensidade nos valores da temperatura conforme é aumentada a quantidade de entrada ar em relação ao combustível, ou seja, ocorre uma produção maior de calor. Portanto o método iterativo como foi aplicado esta de acordo com o modelo físico e representa o comportamento esperado para o escoamento nas condições informadas. Para um melhor resultado faz-se necessário desenvolver um campo de velocidades mais detalhado para o escoamento.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Coelho, P., Costa, M., “**Combustão**”, Orion, São Paulo, 2º edição, 2007.

Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine, “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, LCT, Rio de Janeiro, 6º edição, 2008.

MALISKA, C.R., “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**”, LCT, Rio de Janeiro, 2º edição, 2004.

Notas de aula da cadeira de Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, ENG 03008, 2011.

SAFFIOTI, W., “**Fundamentos de Química**”, Companhia Editora Nacional, Brasil, 2º edição, 1968.

TURNER, S.R., “**An introduction to combustion**”, MC Graw Hill, USA, 2º edition, 2000.