

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Projeto aero-termodinâmico de uma câmara de combustão para
microturbina a gás derivada de um turbo-compressor automotivo**

Newton Kiyoshi Fukumasu

São Paulo
2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Projeto aero-termodinâmico de uma câmara de combustão para
microturbina a gás derivada de um turbo-compressor automotivo**

Trabalho de conclusão do curso de graduação do
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Newton Kiyoshi Fukumasu

Orientador: Prof. Dr. Guenther Carlos
Krieger Filho

São Paulo

2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Fukumasu, Newton Kiyoshi

Projeto aero-termodinâmico de uma câmara de combustão para microturbina a gás derivada de turbo-compressor automotivo / N.K. Fukumasu. -- São Paulo, 2006.

p. 39

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Turbina a gás 2.Termodinâmica 3.Combustão 4.Aerodinâmica 5.Dinâmica dos fluidos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão bibliográfica	3
2.1	Escoamento interno em tubos	3
2.1.1	Escoamento invíscido vs. viscoso	3
2.1.2	Escoamento laminar vs. turbulento	5
2.2	Metodologia de cálculos aplicados a CFD	6
2.2.1	Método dos volumes finitos	6
2.3	Modelagem dos efeitos de turbulência	8
2.3.1	Modelo de turbulência “k – ϵ ”	8
2.3.2	Modelo de turbulência “RSM”	9
2.4	Modelo de combustão	10
3	Materiais e Métodos	12
3.1	Definição da geometria	12
3.2	Análises realizadas	12
3.2.1	Análise do tipo de bico injetor	13
3.2.2	Análise sobre os modelos de turbulência e de combustão	14
3.2.3	Estudo dos misturadores	14
3.2.4	Estudo do diâmetro do combustor com misturador do tipo “swirler”	15
3.3	Discretização da geometria	15
3.4	Condições de contorno	16

4	Resultados.....	18
4.1	Análise do tipo de bico injetor	18
4.2	Análise sobre os modelos de turbulência e de combustão	19
4.3	Estudo dos misturadores	23
4.4	Estudo do tamanho do combustor com misturador do tipo “swirler”	27
5	Conclusão.....	31
6	Bibliografia	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.2.1: Diferenças entre escoamentos laminar e turbulento no ponto A

Figura 2.2.1.1: Exemplo de discretização de uma geometria em um domínio computacional por meio de células de quatro lados

Figura 2.4.1: Distribuição das frações mássicas das espécies em função da fração de mistura combustível/ar (fonte: Griffiths e Barnard)

Figura 3.1.1: Geometria projetada da câmara de combustão

Figura 3.2.1.1: Bico injetor com fluxo radial e axial, não simultâneos

Figura 3.2.3.1: Misturador do tipo “swirler”

Figura 3.2.3.2: Misturador do tipo “bluff-body”

Figura 3.2.4.1: Geometria com variação do diâmetro do combustor (d)

Figura 3.3.1: Exemplo de uma malha gerada no combustor

Figura 4.1.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de turbulência “k- ϵ ”

Figura 4.1.2: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de turbulência “k- ϵ ”

Figura 4.1.3: Distribuição da concentração mássica de combustível para ambos os bicos injetores de combustível na saída do combustor com o modelo de turbulência “k- ϵ ” e sem reação química

Figura 4.2.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de turbulência “k- ϵ ”

Figura 4.2.2: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de turbulência “k- ϵ ”

Figura 4.2.3: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de turbulência “RSM”

Figura 4.2.4: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de turbulência “RSM”

Figura 4.2.5: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo axial sem o modelo de combustão (m/s)

Figura 4.2.6: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo radial sem o modelo de combustão (m/s)

Figura 4.2.7: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de combustão (m/s)

Figura 4.2.8: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de combustão (m/s)

Figura 4.3.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o misturador do tipo “bluff-body”

Figura 4.3.2: Distribuição da concentração mássica de combustível para o misturador do tipo “swirler”

Figura 4.3.3: Linhas de corrente do escoamento com a configuração de misturador do tipo “bluff-body”

Figura 4.3.4: Linhas de corrente do escoamento com a configuração de misturador do tipo “swirler”

Figura 4.3.5: Perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “bluff-body” (m/s)

Figura 4.3.6: Visão frontal do perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo Figura 4.3.7: Perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” (m/s)

Figura 4.3.8: Visão frontal do perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” (m/s)

Figura 4.4.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o misturador do tipo “swirler” e combustor com diâmetro de 95,25mm

Figura 4.4.2: Linhas de corrente do escoamento com a configuração de misturador do tipo “swirler” e combustor de 95,25mm

Figura 4.4.3: Perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” e combustor de diâmetro de 95,25mm (m/s)

Figura 4.4.4: Visão frontal do perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” e combustor de diâmetro de 95,25mm (m/s)

Figura 4.4.5: Perfil de velocidades num plano longitudinal com diâmetro do combustor de 63,50mm (m/s)

Figura 4.4.6: Perfil de velocidades num plano longitudinal com diâmetro do combustor de 95,25mm (m/s)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me incentivarem, apoiarem e agüentarem nas horas das difíceis decisões tomadas durante este início do longo trajeto de minha vida.

Agradeço ao professor Dr. Guenther Carlos Krieger Filho e aos membros do laboratório de engenharia térmica e energia pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao laboratório de fenômenos de superfície pela disponibilidade dos equipamentos para a realização deste trabalho.

1 INTRODUÇÃO

Devido à demanda energética atual, outros processos para a geração de energia elétrica se fazem necessárias. A utilização de uma microturbina a gás, acoplada a um gerador elétrico, é uma solução estudada por diversos centros de pesquisas e, em sua forma mais simples, baseia-se em uma câmara de combustão e um turbo-compressor automotivo, alcançando uma produção, estimada em trabalhos anteriores, de até 7 kW de potência útil.

Utilizando-se a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), avaliaram-se as propriedades de uma câmara de combustão para o acionamento dessa instalação. A câmara original, baseada na geometria anular de fluxo direto, contém basicamente um difusor na entrada, um combustor (liner), um casco (casing) e um misturador.

Os primeiros resultados obtidos com as simulações numéricas foram avaliados experimentalmente através de uma bancada de testes, de forma a calibrar os modelos matemáticos de turbulência e combustão empregados. Serviram como base quantitativa de comparação a temperatura de exaustão dos gases de combustão e as vazões mássicas de ar e combustível para a estabilidade da chama. De forma qualitativa, comparou-se a fração mássica de combustível não queimado e a geração de CO. Este primeiro estudo definiu qual modelo de turbulência melhor representa o escoamento interno no combustor e qual a influência do modelo de combustão sobre o escoamento médio.

Foram realizados estudos sobre a aerodinâmica e a influência no processo de mistura de dois misturadores encontrados na literatura, conhecidos por “Bluff-Body” e “Swirler”, além de dois tipos de bico injetor de combustível, um de fluxo radial e, outro, axial.

De forma a complementar o estudo dos misturadores do tipo “swirler” foi feita uma análise sobre a influencia do tamanho do combustor em relação ao diâmetro do misturador.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Escoamento interno em tubos

Usualmente dutos são utilizados para o transporte de substâncias entre duas localidades diferentes. Uma aplicação importante de escoamentos em tubos é na mudança das propriedades termodinâmicas dos fluidos, como no caso de túneis de ventos.

Com a diversidade de aplicações existentes, o estudo do escoamento em dutos se divide, geralmente, em quatro categorias: escoamentos invíscidos, viscosos, laminares e turbulentos.

2.1.1 *Escoamento invíscido vs. viscoso*

De acordo com Munson (1997), aplicando a segunda lei de Newton a uma partícula fluida que percorre uma linha de corrente, obtém-se a equação 2.1.1.1, a qual é conhecida como equação do movimento de Euler. As hipóteses adotadas foram de escoamento em regime permanente, viscosidade nula no fluido, escoamento com fluido incompressível e a consideração de uma partícula fluida com movimento de corpo rígido.

$$\rho \cdot \vec{g} - \nabla p = \rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) \quad \text{Equação 2.1.1.1}$$

Verifica-se experimentalmente que essa equação é válida para escoamentos com velocidades inferiores a 30% da velocidade do som no meio e em que as influências de barreiras, como paredes, são desprezíveis.

Para escoamentos com maiores velocidades, com influência de barreiras e/ou transientes no tempo, as propriedades são melhor representadas por um conjunto de equações conhecido como Equações de Navier-Stokes. Esse conjunto de equações considera a conservação da massa, equação 2.1.1.2, conservação da quantidade de movimento, equação 2.1.1.3 e conservação da energia, equação 2.1.1.4 no escoamento. Nessas equações, ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade do fluido, $\vec{u}$ é o vetor de velocidades, t é o tempo, p é a pressão total, $\vec{g}$ é a aceleração da gravidade, k é o coeficiente de difusão térmica, i é a energia interna, T é a temperatura e Φ se refere a uma função de dissipação, de acordo com Versteeg e Malalasekera (1998).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad \text{Equação 2.1.1.2}$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \cdot \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad \text{Equação 2.1.1.3}$$

$$\frac{\partial (\rho \cdot i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot i \cdot \vec{u}) = -p \cdot \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \Phi \quad \text{Equação 2.1.1.4}$$

Entretanto, geralmente este conjunto de equações não é completo sem a utilização de uma equação de estado para o fluido, uma vez que existem, para o caso em três dimensões, cinco equações e seis incógnitas.

2.1.2 Escoamento laminar vs. turbulento

Os escoamentos encontrados na natureza podem ser classificados em escoamentos laminares, em transição ou turbulentos. Esta classificação pode ser verificada com o cálculo do número de Reynolds. Para tubos, este número se baseia no diâmetro de entrada do duto e é apresentado pela equação 2.1.2.1, em que u_D é o módulo da velocidade na direção normal a secção transversal de diâmetro D .

$$Re_D = \frac{\rho \cdot u_D \cdot D}{\mu}$$

Equação 2.1.2.1

Tipicamente, escoamentos laminares em dutos possuem números de Reynolds inferiores a 2.100 e escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos, superiores a 4.000, de acordo com Munson (1997). Logo, a faixa entre estes dois extremos representa a transição de um caso para o outro. A diferença entre os escoamentos é representada na figura 2.1.2.1.

Verifica-se, experimentalmente, que a turbulência é um fenômeno que adiciona uma variação temporal aleatória as características do escoamento.

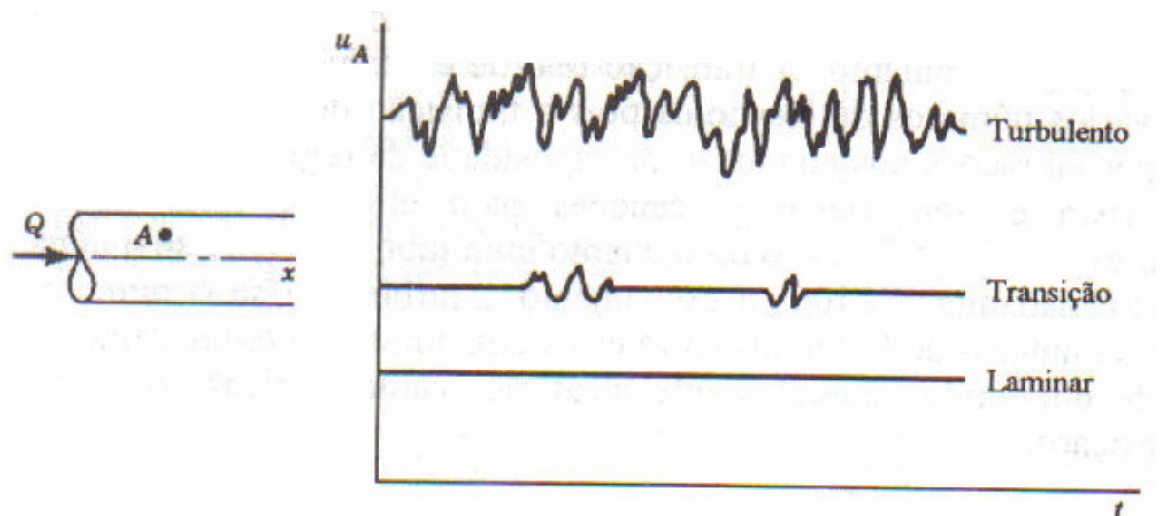


Figura 2.1.2.1: Diferenças entre escoamentos laminar e turbulento no ponto A

2.2 Metodologia de cálculos aplicados a CFD

A dinâmica dos fluidos computacional (“Computational Fluid Dynamics”) se divide em três principais métodos: método das diferenças finitas, dos volumes finitos e dos elementos finitos. Esses métodos matemáticos se diferenciam no modo como representam as equações fundamentais das quantidades transportadas no escoamento, como o conjunto de equações de Navier-Stokes já apresentado.

Devido a sua intuitiva interpretação física, o método dos volumes finitos é amplamente difundido, em que a geometria é dividida em uma grande quantidade de volumes menores, nos quais as quantidades transportadas são conservadas em cada célula, através dos fluxos nas faces. Assim, será discutido em detalhes, apenas este método neste texto. Detalhes sobre os outros métodos podem ser encontrados em Versteeg e Malalasekera (1998), em Maliska (1995), entre outros.

2.2.1 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos utiliza a discretização da geometria estudada em células menores de forma a realizar a integração das equações de transporte em cada célula e, assim, obter um sistema algébrico de equações discretas no espaço e no tempo.

As quantidades que governam o escoamento podem ser modeladas por uma equação de transporte genérica segundo Versteeg e Malalasekera, dada pela equação 2.2.1.1, em que Θ é a quantidade de interesse, Γ é um coeficiente de difusão e S_Θ é um termo de fonte associado a essa quantidade. Tal equação satisfaz tanto as

quantidades vetoriais quanto as escalares, como o campo de velocidades do escoamento e a temperatura do fluido, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho\Theta)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \Theta \cdot \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \cdot \nabla \Theta) + S_{\Theta} \quad \text{Equação 2.2.1.1}$$

O conjunto de células que representa a geometria inicial é chamado de domínio computacional. As células podem ter diversos formatos, dos quais os mais utilizados são os hexaedros e os tetraedros, em casos tri-dimensionais. Similarmente, casos bi-dimensionais são representados por quadriláteros e triângulos. A figura 2.2.1.1 apresenta um domínio computacional, também conhecido como malha ou *grid*.

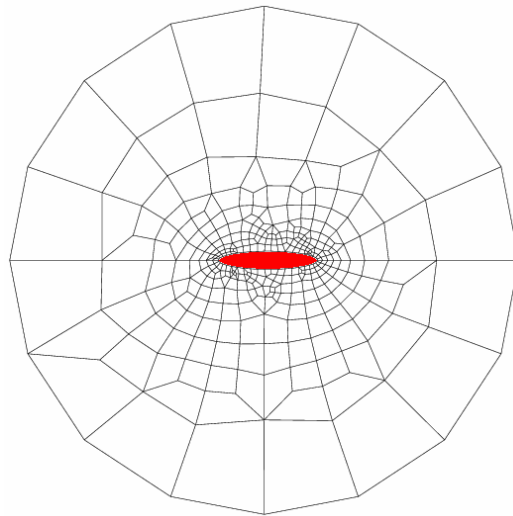


Figura 2.2.1.1: Exemplo de discretização de uma geometria em um domínio computacional por meio de células de quatro lados

2.3 Modelagem dos efeitos de turbulência

Os efeitos da turbulência sobre as quantidades analisadas do escoamento podem ser tratados de duas formas: modelados ou calculados diretamente.

Devido a grande complexidade de previsão desses efeitos, existem inúmeros modelos que foram desenvolvidos ao longo dos anos e representam em maior ou menor grau as variações devido à turbulência nos sistemas.

Como alternativa a predição dos resultados, os efeitos devidos à turbulência podem ser calculados, entretanto demandariam uma grande capacidade computacional. Este tipo de solução é chamado de “DNS” ou simulação numérica direta, na qual todas as escalas turbulentas, ou seja, todas as perturbações espaciais e temporais são resolvidas.

2.3.1 Modelo de turbulência “ $k-\varepsilon$ ”

Um dos modelos mais difundidos é o “ $k-\varepsilon$ ”, o qual se baseia no transporte de dois escalares: a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação turbulenta (ε). Segundo Hoffmann (2000) e Wilcox (2004), a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação podem ser representadas pelas equações 2.3.1.1 e 2.3.1.2 respectivamente. Nessas equações, u' é a flutuação da velocidade na direção i , j ou k .

$$k = \frac{1}{2} \left(u'^2_i + u'^2_j + u'^2_k \right) \quad \text{Equação 2.3.1.1}$$

$$\varepsilon = \nu_t \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \quad \text{Equação 2.3.1.2}$$

Este modelo faz o acoplamento com as equações de transporte de quantidade de movimento pela viscosidade do sistema, de forma a definir essa viscosidade como a soma entre a viscosidade molecular, inerente ao fluido, e a turbulenta, devida ou modelo empregue e expressa pela equação 2.3.1.3, na qual c_μ é uma constante encontrada através de experimentos.

$$\mu_t = \rho \cdot c_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{Equação 2.3.1.3}$$

2.3.2 Modelo de turbulência “RSM”

Um modelo mais complexo pode ser baseado nas tensões de Reynolds e são chamados de “**Reynolds Stress Models**”. Estes modelos foram desenvolvidos considerando as grandes e pequenas variações das propriedades devido às deformações da partícula fluida no escoamento. Este modelo representa melhor os escoamentos com alto índice de rotacionalidade, geometrias complexas ou situações em que grandes forças sobre os corpos são encontradas, segundo Versteeg e Malalasekera.

A formulação básica desse modelo é dada pela equação 2.3.2.1, na qual R_{ij} é a tensão de Reynolds, P_{ij} é a taxa de produção dessas tensões, D_{ij} é a taxa de difusão, ε_{ij} é a taxa de dissipação, Π_{ij} é o termo associado ao transporte turbulento devido à interação entre as deformações e a pressão aplicada em cada célula e Ω_{ij} é o transporte dessas tensões devido à rotação do fluido.

$$\frac{dR_{ij}}{dt} = P_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad \text{Equação 2.3.2.1}$$

Como a maioria dos modelos de turbulência, os apresentados nessa seção dependem de constantes de integração, as quais são encontradas por meio da experimentação de casos específicos ou a solução numérica pelo método direto de pequenas regiões, possibilitando a calibração dos modelos.

2.4 Modelo de combustão

Os modelos de combustão são empregados para realizar o transporte das espécies no escoamento, bem como converter as concentrações de reagentes em produtos. Esses modelos podem considerar que ocorram ou não as reações químicas, de modo a permitir a análise da eficiência de combustão, bem como da concentração de produtos, como NO_x e CO , gases extremamente poluentes e danosos a saúde humana.

Um dos modelos utilizados na combustão não previamente misturada é o “Flamelet model” o qual modela uma chama, possivelmente, turbulenta como um conjunto de chamas laminares individuais. Uma das principais restrições desse modelo é que ele considera que a reação de combustão é extremamente rápida, de modo a não compreender efeitos de desequilíbrio, como ignição, extinção ou reações extremamente lentas, como a formação de NO_x , segundo Griffiths e Barnard (1995).

Este modelo se baseia no transporte de um escalar definido como fração de mistura (f), e apresenta o bordo da chama de combustão na região em que as concentrações de combustível e oxidante alcançam a relação estequiométrica. A figura 2.4.1 apresenta, genericamente, a distribuição das concentrações mássicas dos reagentes e dos produtos em função da fração de mistura. Nesta figura, f_{st} é a fração de mistura estequiométrica, m_{fu} é a fração mássica de combustível, m_{ox} é a fração

mássica de oxidante, m_{pr} é a fração mássica da geração dos produtos e m_{in} é a fração mássica dos elementos inertes.

Este modelo utiliza gráficos semelhantes ao da figura 2.4.1 para, em cada célula, verificar qual a concentração de cada reagente e, consequentemente, de cada produto. Podendo subdividir uma equação de reação de combustão em inúmeras reações intermediárias.

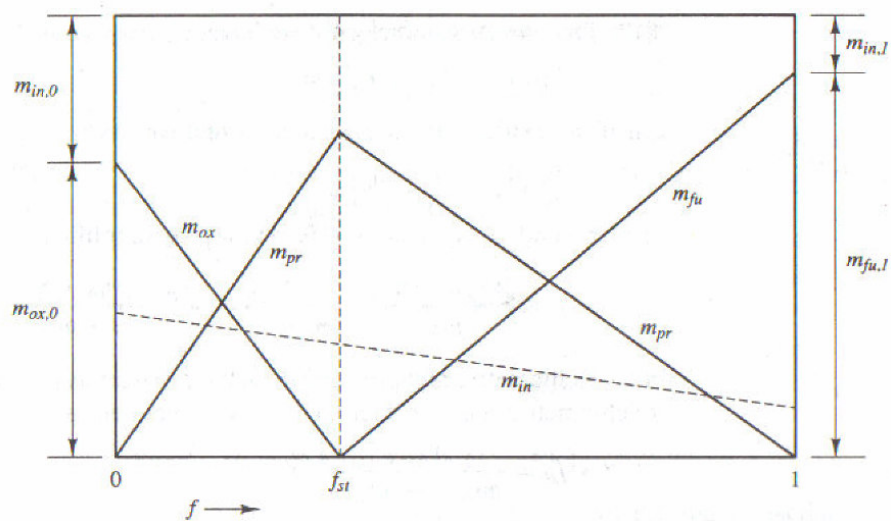


Figura 2.4.1: Distribuição das frações mássicas das espécies em função da fração de mistura combustível/ar (fonte: Griffiths e Barnard)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Definição da geometria

A geometria da câmara de combustão foi gerada a partir do trabalho de Donadio (2004). A figura 3.1.1 apresenta essa geometria. Os componentes estão apresentados nas diferentes cores: azul – casco, vermelho – combustor e laranja – misturador, no caso, do tipo “swirler”.

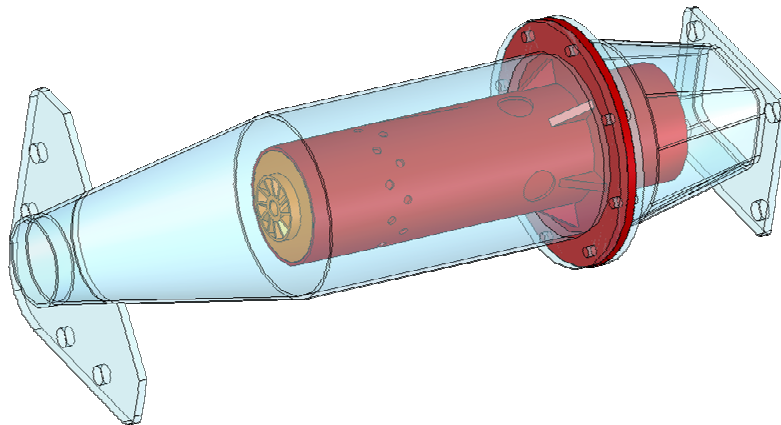


Figura 3.1.1: Geometria projetada da câmara de combustão

Devido à importância da estabilidade da chama interna ao combustor e do tamanho da geometria completa, optou-se por simplificar a geometria simulada baseada apenas em três itens: o bico injetor, o misturador e o combustor. Permitindo que o estudo se concentrasse na obtenção do comportamento da mistura combustível/ar.

3.2 Análises realizadas

Definida a geometria a ser estudada, realizaram-se os seguintes estudos:

- Análise do tipo de bico injetor;

- Análise sobre os modelos de turbulência e de combustão;
- Estudo dos misturadores;
- Estudo do tamanho do combustor com misturador do tipo “swirler”.

Todos os estudos foram realizados com o programa CFX[®] da Ansys Inc. na versão 10.0. Foi utilizado um cluster com 12 processadores e um total de 8Gb de memória para a realização das simulações.

3.2.1 Análise do tipo de bico injetor

Nesta análise, verificou-se a influencia sobre o processo de mistura devido ao bico injetor de combustível. Duas geometrias de bico injetor foram estudadas. A figura 3.2.1.1 apresenta estas geometrias, em que uma apresenta um escoamento radial e, a outra, axial.

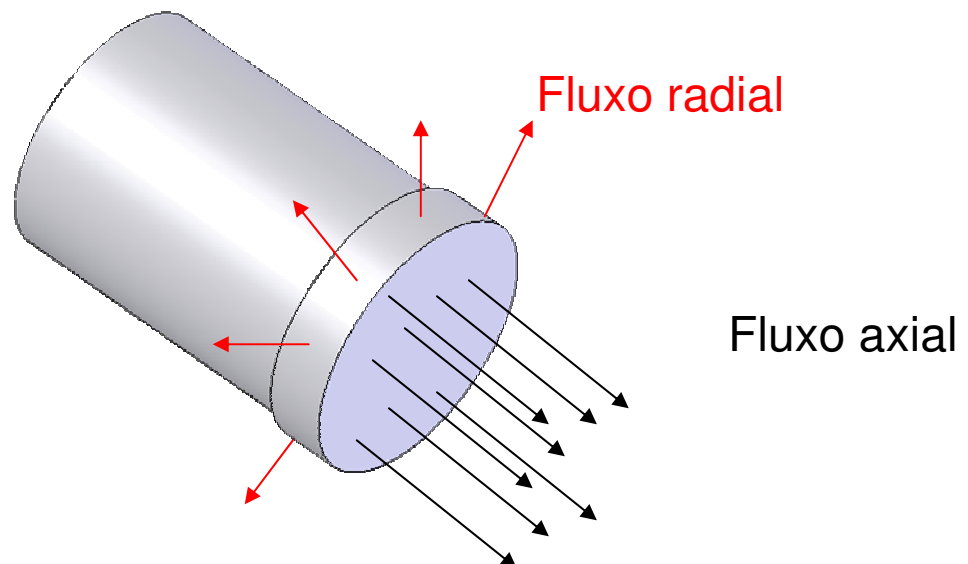


Figura 3.2.1.1: Bico injetor com fluxo radial e axial, não simultâneos

3.2.2 Análise sobre os modelos de turbulência e de combustão

A análise sobre os modelos de turbulência foi realizada para permitir a melhor escolha entre os modelos “k-ε” e o “RSM”.

As simulações com o modelo de combustão permitiram analisar o comportamento dos gases e uma previsão qualitativa sobre a eficiência do processo de combustão devido ao uso dos misturadores.

3.2.3 Estudo dos misturadores

Dois misturadores, um do tipo “swirler” e outro do tipo “bluff-body”, foram analisados de modo a permitir a verificação da influência sobre o processo de mistura entre o combustível e o ar e a conseqüente eficiência de combustão. As geometrias desses misturadores são apresentadas pelas figuras 3.2.3.1 e 3.2.3.2, respectivamente.

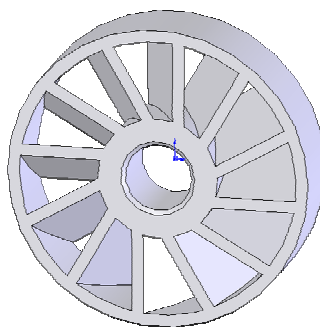


Figura 3.2.3.1: Misturador do tipo “swirler”

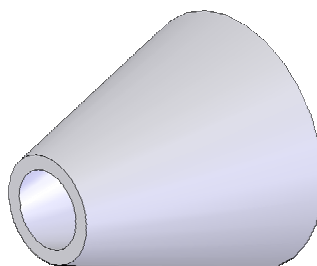


Figura 3.2.3.2: Misturador do tipo “bluff-body”

3.2.4 Estudo do diâmetro do combustor com misturador do tipo “swirler”

Para ampliar os conhecimentos da influência sobre o escoamento de um misturador do tipo “swirler”, realizou-se um estudo com a variação do diâmetro do combustor, mantidas todas as outras dimensões constantes.

A figura 3.2.4.1 apresenta a geometria geral a ser estudada, com um misturador do tipo “swirler” e o diâmetro do combustor a ser variado (d). Foram adotados dois valores para d : 63.50mm e 95.25mm.

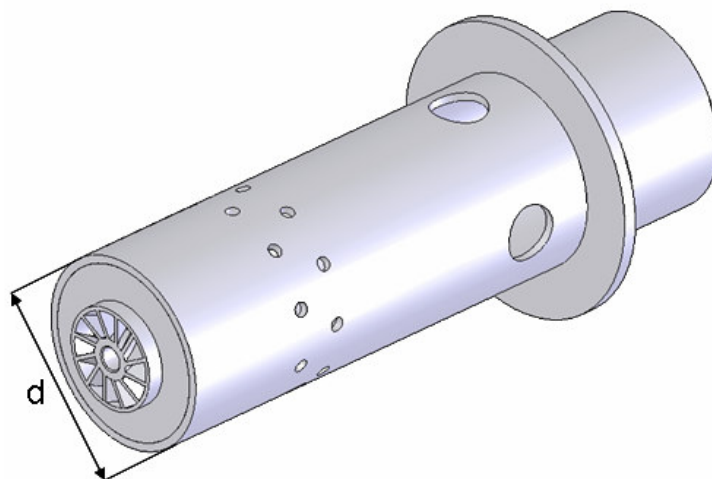


Figura 3.2.4.1: Geometria com variação do diâmetro do combustor (d)

3.3 Discretização da geometria

A geometria estudada foi discretizada em elementos tetraédricos devido a sua facilidade de acomodação em geometrias complexas, como no caso do misturador do tipo “swirler”.

O domínio computacional dividiu a geometria base em quatro devido à periodicidade do escoamento longitudinal. Assim, a figura 3.3.1 apresenta uma das malhas utilizadas.

Para cada análise foi criada de uma malha diferente, pois as geometrias não eram iguais. Assim, um estudo de refino de malha foi realizado, de forma que o número de elementos do domínio computacional foi escolhido considerando as variações dos resultados, isto é, o número de elementos da malha foi aumentado até que os resultados não variassem mais, dado que todas as outras condições permanecessem constantes. Logo, a quantidade de células final variou entre 1,5 a 3,5 milhões. As malhas foram criadas no programa ICEM[®] da Ansys Inc.

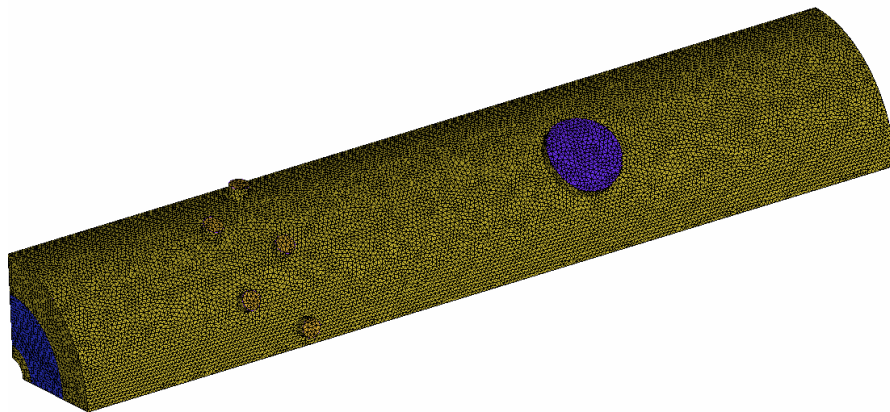


Figura 3.3.1: Exemplo de uma malha gerada no combustor

3.4 Condições de contorno

As condições de contorno aplicadas ao escoamento na geometria base foi:

- Fluxo total de ar: 0,0045 kg/s;
- Fluxo de combustível: 0,003 kg/s de propano;

O fluxo de ar foi dividido de forma que apenas 33% entrasse pelo misturador e, o restante, entrasse pelos furos de diluição.

Para o caso do uso do bico axial, uma redução no fluxo de combustível foi necessária para permitir a compatibilidade das velocidades na saída do bico quando do uso do bico radial. Assim, no caso do bico de fluxo axial, o fluxo mássico de combustível foi de 0,0008 kg/s.

4 RESULTADOS

4.1 Análise do tipo de bico injetor

Os resultados da análise do bico injetor são apresentados pelas figuras 4.1.1 e 4.1.2, as quais se referem à distribuição da concentração mássica de combustível num plano longitudinal para os bicos de fluxo axial e radial, respectivamente. Nestas simulações, utilizou-se o modelo de turbulência “k- ϵ ” e não se consideraram reações químicas, permitindo a simples mistura dos reagentes pelo transporte de suas propriedades.

A figura 4.1.3 apresenta a distribuição radial da concentração mássica de combustível na saída do combustor. Verifica-se, por meio destas figuras, que a distribuição de combustível é mais homogênea na configuração com o bico injetor radial, propiciando uma melhor mistura entre os reagentes.

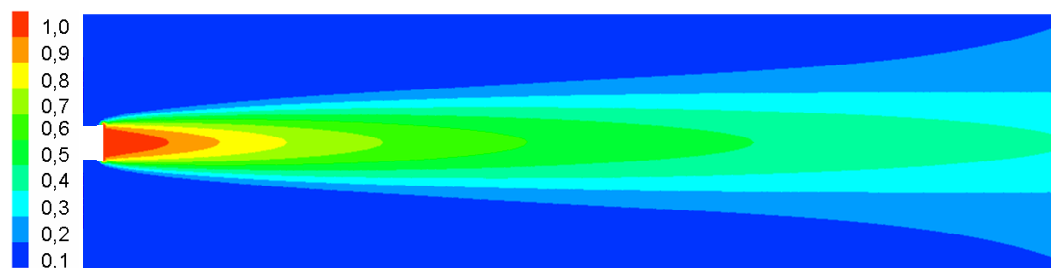


Figura 4.1.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de turbulência “k- ϵ ”



Figura 4.1.2: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de turbulência “k- ϵ ”

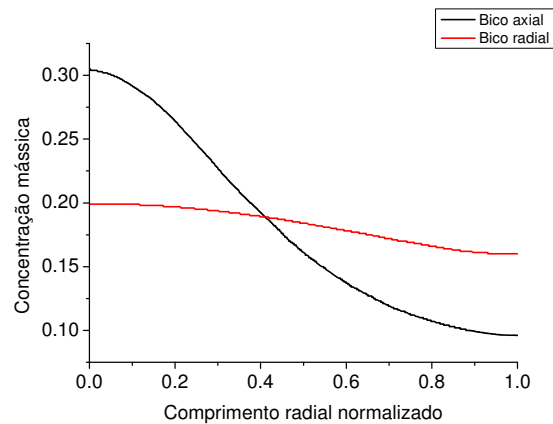


Figura 4.1.3: Distribuição da concentração mássica de combustível para ambos os bicos injetores de combustível na saída do combustor com o modelo de turbulência “k-ε” e sem reação química

4.2 Análise sobre os modelos de turbulência e de combustão

Devido ao fato de se analisar apenas o transporte das propriedades dos reagentes, como apresentado pelas figuras 4.1.1 e 4.1.2, perdem-se informações importantes do escoamento, como a aceleração do fluido devido a reação de combustão e concentração mássica dos produtos na saída do combustor.

Assim, as figuras 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4 apresentam as mesmas simulações apresentadas na seção 4.1, porém com o modelo de combustão acionado. As figuras 4.2.1 e 4.2.2 são resultados das simulações com o modelo de turbulência “k-ε”, já as figuras 4.2.3 e 4.2.4, o modelo de turbulência empregado foi um baseado nas tensões de Reynolds (“RSM”).

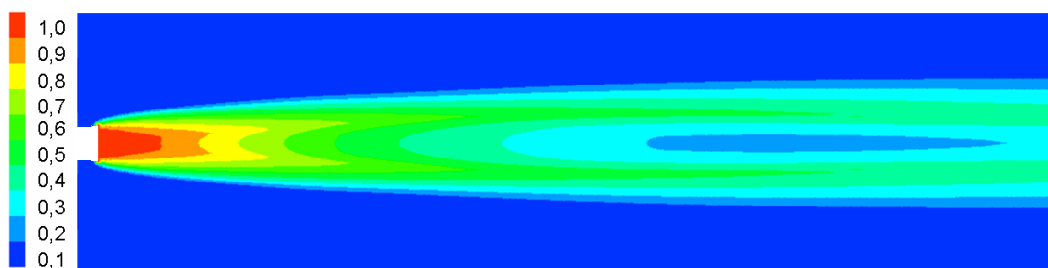


Figura 4.2.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de turbulência “ $k-\epsilon$ ”

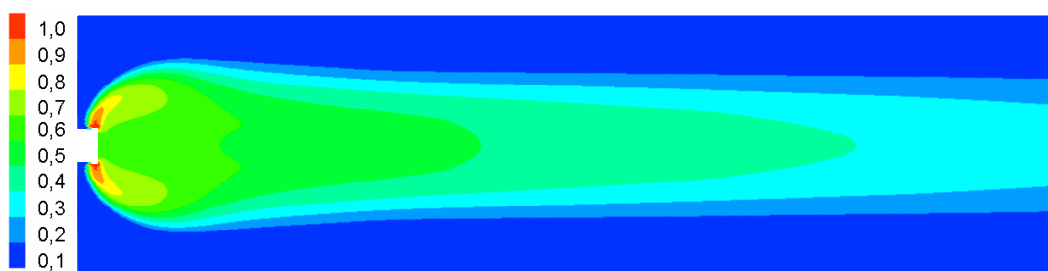


Figura 4.2.2: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de turbulência “ $k-\epsilon$ ”

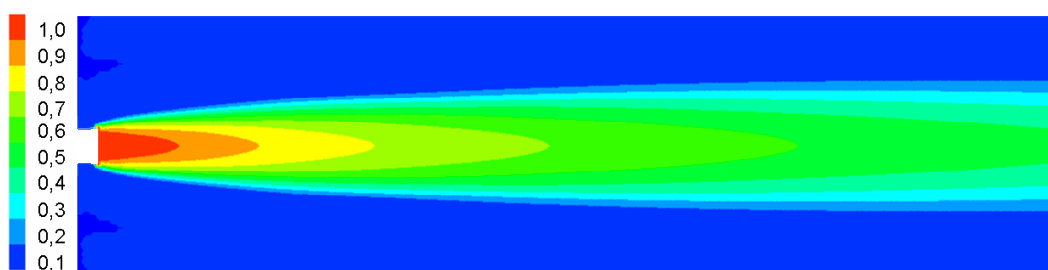


Figura 4.2.3: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de turbulência “RSM”

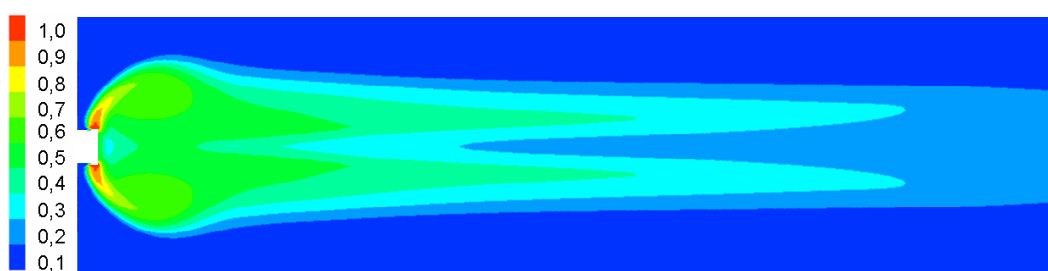


Figura 4.2.4: Distribuição da concentração mássica de combustível para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de turbulência “RSM”

A distribuição de combustível das figuras 4.2.1 e 4.2.3 é relativa ao uso do bico injetor de combustível com fluxo axial. De acordo com a literatura, na linha de

centro do escoamento em jatos laminares, praticamente não ocorre reação, mantendo a concentração de combustível uniforme, como apresentado pela figura 4.2.3, diferentemente da figura 4.2.1.

Entretanto, para a configuração de bico injetor radial, verificamos que o inverso se aplica, isto é, na figura 4.2.4, verifica-se uma variação na concentração de combustível na linha de centro. Isto ocorre devido à recirculação do fluido, que ao realizar a reação química, retorna os produtos da combustão, aquecidos, em direção ao bico injetor.

Como a recirculação é um fenômeno altamente rotacional, verifica-se que o modelo de turbulência “k-ε” não foi capaz de representar o escoamento em sua totalidade, de modo que a partir desta seção, todas as simulações serão baseadas no modelo das tensões de Reynolds.

As figuras 4.2.5, 4.2.6, 4.2.7 e 4.2.8 apresentam a distribuição de velocidades do escoamento num plano longitudinal do combustor. As figuras 4.2.5 e 4.2.6 não levam em consideração os processos de reação química, isto é, foi simulado apenas o processo de mistura pelo transporte das propriedades dos reagentes.

Já os resultados apresentados pelas figuras 4.2.7 e 4.2.8 levaram em consideração a reação química, de modo que se verifica um aumento na velocidade média do escoamento. Isto é devido ao acoplamento da variação da densidade com a temperatura do fluido, gerando um empuxo, acelerando o fluido. Portanto, para uma boa representação do escoamento do fluido interno ao combustor, se faz necessária o uso de um modelo de combustão, que no caso presente foi o “Flamelet model”.

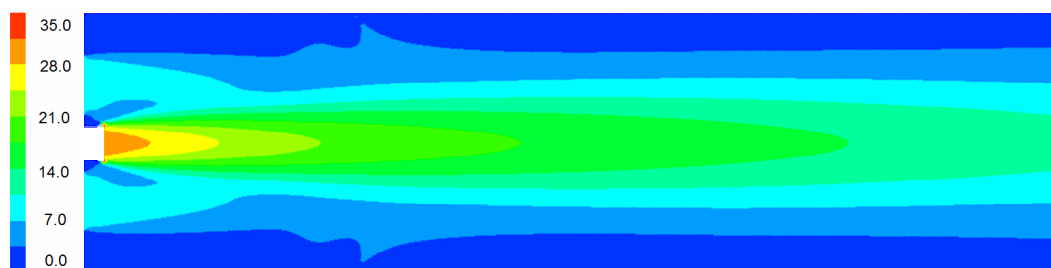


Figura 4.2.5: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo axial sem o modelo de combustão (m/s)



Figura 4.2.6: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo radial sem o modelo de combustão (m/s)

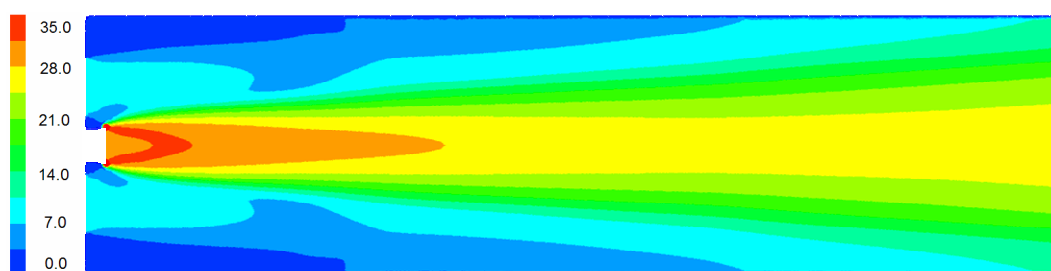


Figura 4.2.7: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo axial com o modelo de combustão (m/s)

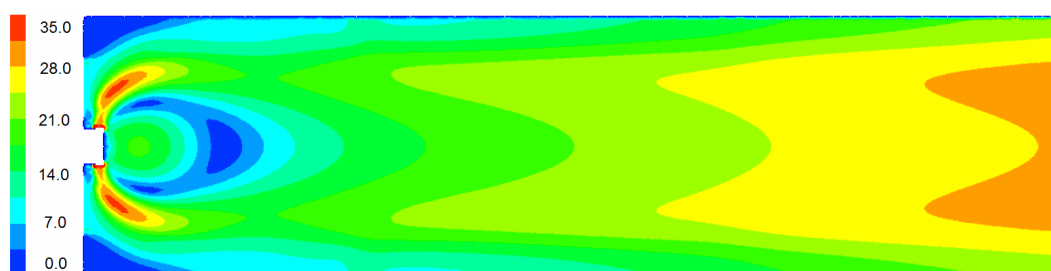


Figura 4.2.8: Distribuição de velocidades para o bico injetor de fluxo radial com o modelo de combustão (m/s)

4.3 Estudo dos misturadores

Dois tipos de misturadores, conhecidos por “bluff-body” e “swirler”, foram analisados. As figuras 4.3.1 e 4.3.2 apresentam a distribuição da concentração de combustível para a utilização do misturador do tipo “bluff-body” e “swirler”, respectivamente.

Verifica-se pela figura 4.3.1, dadas às condições de contorno aplicadas na seção 3.4, que a mistura entre o ar e o combustível ficou mais concentrada próximo à linha de centro do combustor. Já na figura 4.3.2, essa tendência não se verificou, uma vez que com a alta rotacionalidade imposta ao fluido pela utilização do misturador do tipo “swirler”, elevou o nível de mistura próximo a região do bico injetor.

Para a configuração com misturador do tipo “bluff-body”, verificou-se, na saída do combustor, a existência de aproximadamente 35% de combustível que não participou das reações químicas. Para o caso com o misturador do tipo “swirler”, essa fração era de 11%. Com esses números, constata-se que o processo de mistura quando usado um misturador do tipo “swirler” é mais intenso, de modo a garantir uma maior eficiência no processo de combustão.

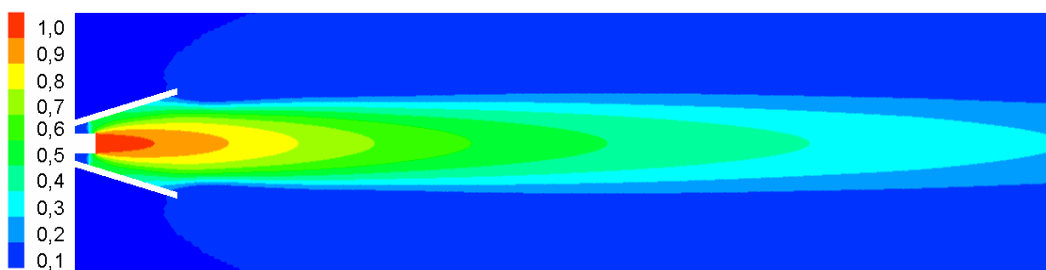


Figura 4.3.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o misturador do tipo “bluff-body”

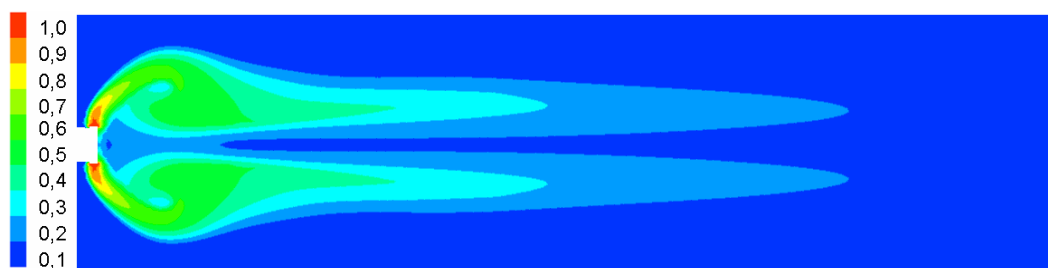


Figura 4.3.2: Distribuição da concentração mássica de combustível para o misturador do tipo “swirler”

As figuras 4.3.3 e 4.3.4 apresentam as linhas de corrente para as configurações com misturadores do tipo “bluff-body” e “swirler”, respectivamente. Pela figura 4.3.4, nota-se uma grande estrutura turbulenta próxima à região de entrada do combustor e um núcleo de recirculação próximo a linha de centro. Devido a essas estruturas, o escoamento realiza um processo de mistura dos reagentes de forma mais eficiente, quando comparada com as estruturas geradas pelo escoamento devido ao uso do misturador do tipo “bluff-body”, como apresentado pela figura 4.3.3.

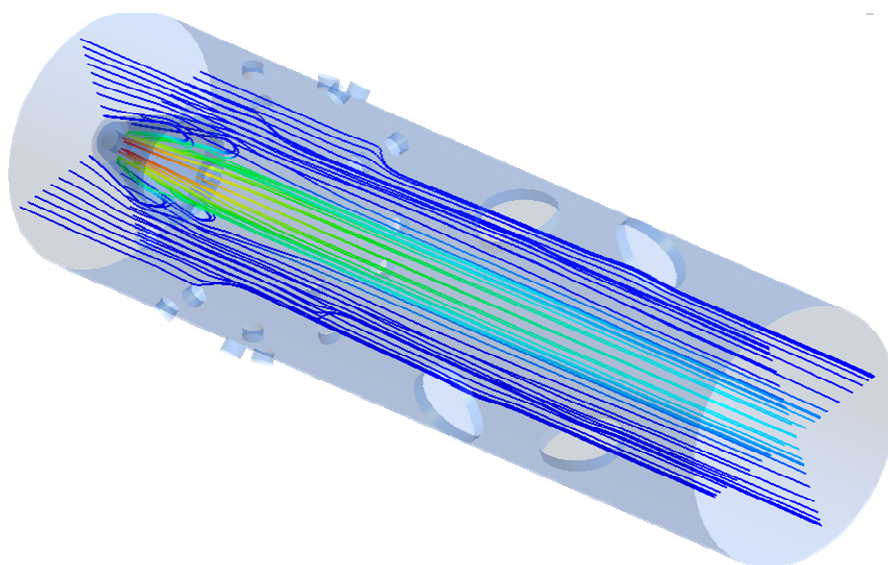


Figura 4.3.3: Linhas de corrente do escoamento com a configuração de misturador do tipo “bluff-body”

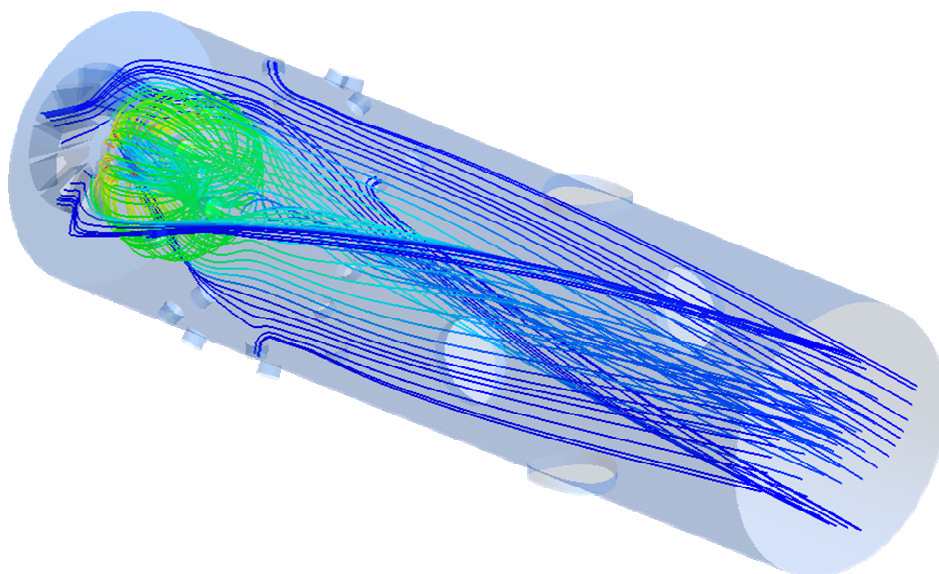


Figura 4.3.4: Linhas de corrente do escoamento com a configuração de misturador do tipo “swirler”

As figuras 4.3.5 e 4.3.6 apresentam o perfil de velocidades, próximo a entrada do combustor, devido ao uso do misturador do tipo “bluff-body”. Já as figuras 4.3.7 e 4.3.8 apresentam o perfil de velocidades devido ao uso do misturador do tipo “swirler”.

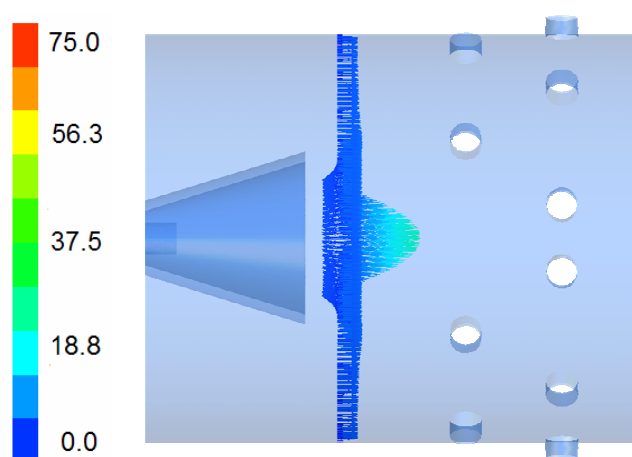


Figura 4.3.5: Perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “bluff-body” (m/s)

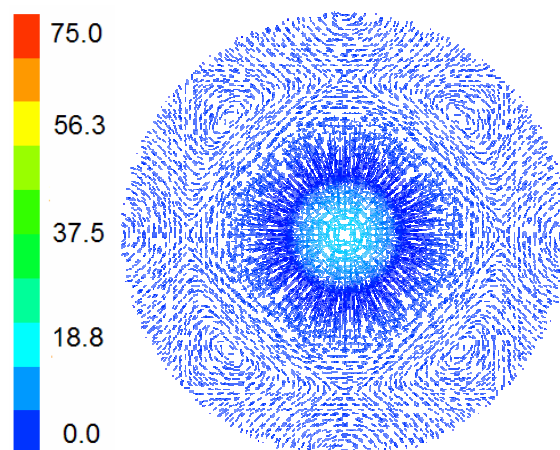


Figura 4.3.6: Visão frontal do perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “bluff-body” (m/s)

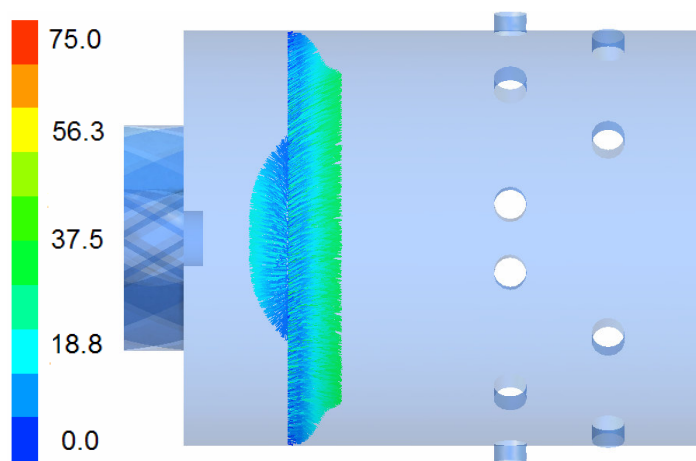


Figura 4.3.7: Perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” (m/s)

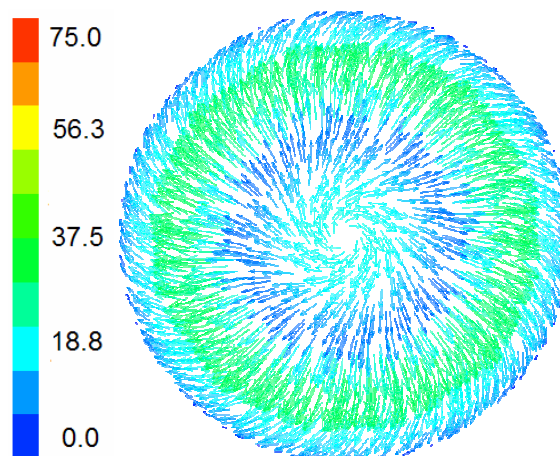


Figura 4.3.8: Visão frontal do perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” (m/s)

Destas figuras, verifica-se um perfil do tipo jato axial, com baixa componente tangencial da velocidade, para a configuração com misturador do tipo “bluff-body”. Entretanto, para a configuração com “swirler”, a velocidade tangencial é tão importante quanto as outras componentes. Verifica-se ainda na figura 4.3.7 um núcleo de recirculação com velocidade negativa, o que garante um reaproveitamento dos produtos de combustão para o aquecimento dos reagentes.

4.4 Estudo do tamanho do combustor com misturador do tipo “swirler”

A figura 4.4.1 apresenta a distribuição da concentração de combustível para a configuração com o misturador do tipo “swirler” e com diâmetro de 95,25mm. Comparando-se esse resultado com o da figura 4.3.2, verifica-se um aumento no tamanho da estrutura turbulenta próxima a entrada do combustor e uma concentração de combustível menor nas regiões de recirculação e da linha de centro.

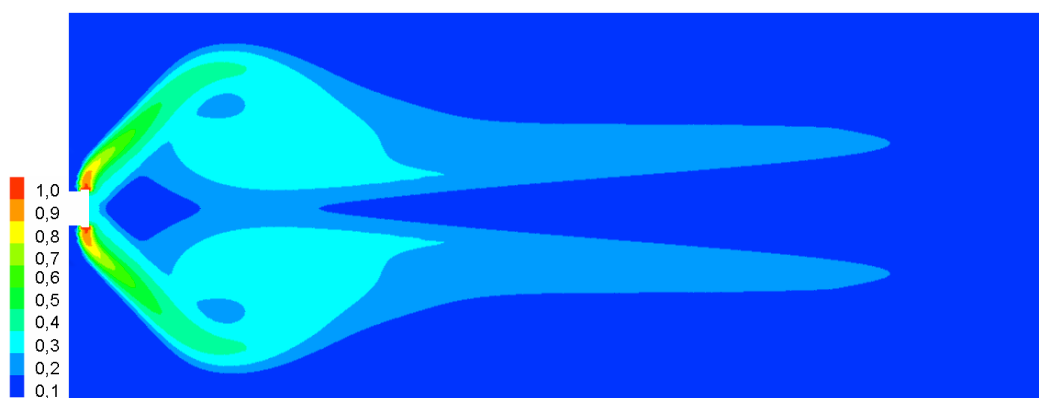


Figura 4.4.1: Distribuição da concentração mássica de combustível para o misturador do tipo “swirler” e combustor com diâmetro de 95,25mm

A figura 4.4.2 apresenta as linhas de corrente devido a essa nova geometria e as figuras 4.4.3 e 4.4.4 mostram o perfil de velocidades próximo a entrada do combustor.

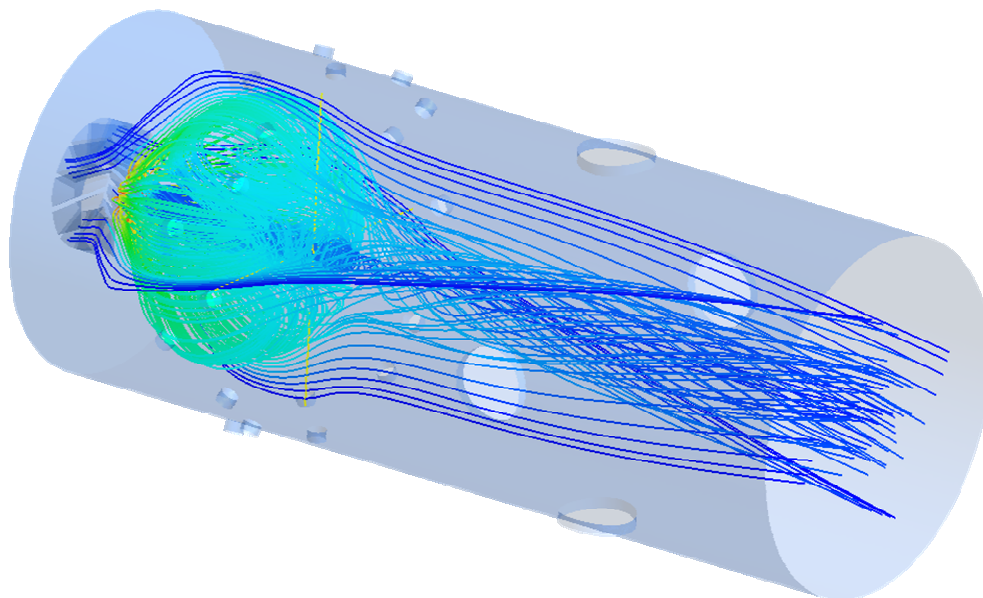


Figura 4.4.2: Linhas de corrente do escoamento com a configuração de misturador do tipo “swirler” e combustor de 95,25mm

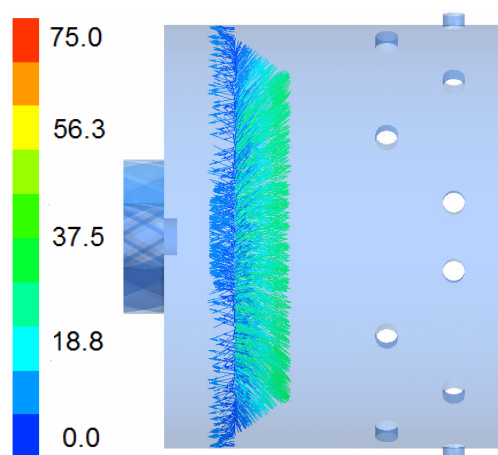


Figura 4.4.3: Perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” e combustor de diâmetro de 95,25mm (m/s)

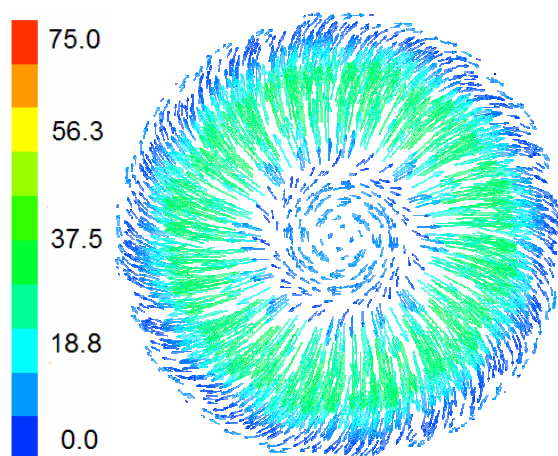


Figura 4.4.4: Visão frontal do perfil de velocidades próximo a saída do misturador do tipo “swirler” e combustor de diâmetro de 95,25mm (m/s)

Pela figura 4.4.3, verifica-se uma diminuição da velocidade na região do núcleo de recirculação comparado com a figura 4.3.7, o que permite um maior tempo para a realização da mistura entre os reagentes.

As figuras 4.4.5 e 4.4.6 apresentam a distribuição de velocidades num plano longitudinal do combustor. Dessas figuras, constata-se que com o aumento do diâmetro do combustor, houve um aumento radial na estrutura turbulenta devida ao uso do misturador do tipo “swirler” e, como esperado, a velocidade no núcleo desta estrutura é menor na figura 4.4.6.

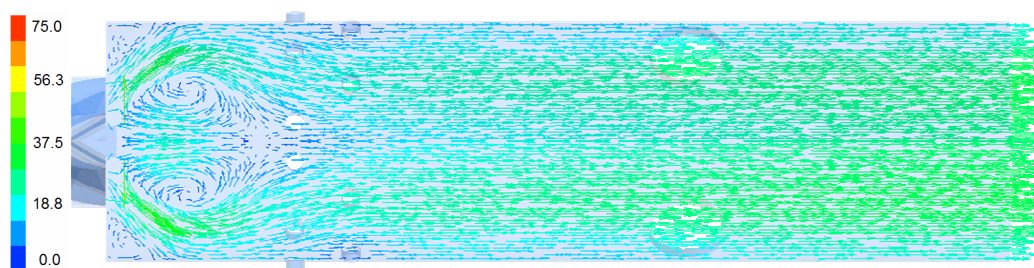


Figura 4.4.5: Perfil de velocidades num plano longitudinal com diâmetro do combustor de 63,50mm (m/s)

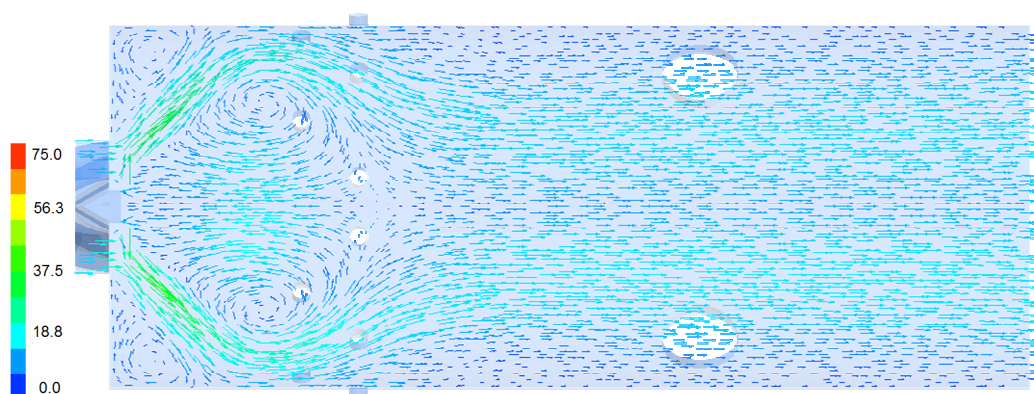


Figura 4.4.6: Perfil de velocidades num plano longitudinal com diâmetro do combustor de 95,25mm (m/s)

Comparando-se as quantidades de combustível na saída do combustor, obteve-se, para a configuração com diâmetro de 95,25mm, o valor de 18% de combustível que não participou das reações químicas. Entretanto, quando comparados os valores de geração de CO, o combustor com 63,50mm apresentou 14% contra 8% de concentração relativa aos componentes na saída, para o combustor de diâmetro de 95,25mm.

Esses dados indicam que a diferença no processo de transformação de combustível em produtos de combustão não é tão significativa quanto à redução na geração de CO, de uma configuração para outra.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou o estudo do processo de mistura e da identificação do escoamento interno a uma câmara de combustão simplificada pelo seu combustor.

Da seção 4.1, a figura 4.1.2 indica que o bico injetor de combustível com fluxo radial apresentava uma distribuição mais homogênea de combustível por todo o combustor, de modo a levar a um melhor processo de mistura, quando comparado com os resultados para o bico de fluxo axial.

Na seção 4.2, verifica-se que para as propriedades do escoamento médio serem bem representadas, um modelo de turbulência complexo, como os baseados nas tensões de Reynolds, se fez necessário, uma vez que o um modelo básico, como o “k- ϵ ”, não foi suficiente para representar todas as influências devido a rotacionalidade do escoamento, apesar deste modelo mas simples, ter conseguido representar, na média, as propriedades gerais do escoamento, servindo como um ponto de partida para as demais análises.

Nesta seção, ainda, se determinou que a utilização de um modelo de combustão seria necessário, uma vez que a influência deste sobre o escoamento principal foi muito importante, como apresentado pelas figuras 4.2.7 e 4.2.8.

Para o estudo sobre os dois misturadores, verificou-se na seção 4.3 que o misturador do tipo “swirler” impunha um escoamento médio extremamente turbulento e rotacional, o que melhorava o processo de mistura, quando comparado com o misturador do tipo “bluff-body”. Pela figura 4.3.4, identifica-se que a melhora no processo de mistura se deve a estrutura turbulenta que se forma logo após a entrada do combustor, a qual apresenta uma zona de recirculação intensa próxima as paredes e um núcleo com velocidade negativa, de modo a levar os produtos de

combustão aquecidos de volta para a região da entrada de combustível, o que se verifica pelo perfil de velocidades da figura 4.3.7. Observa-se ainda uma componente tangencial da velocidade tão importante quanto a componente axial, de acordo com a figura 4.3.8, implicando na alta rotacionalidade do fluido devido a utilização do “swirler”.

Portanto, constata-se que o misturador do tipo “swirler” induz um escoamento que apresenta um intenso processo de mistura, permitindo uma melhor eficiência de combustão.

Assim, para melhor entender a influencia que o tamanho do combustor tem sobre o escoamento médio devido à utilização de um misturador do tipo “swirler”, verifica-se, pela seção 4.4, que quanto maior o diâmetro do combustor com relação ao diâmetro do misturador, melhor é o processo de mistura, pois a influencia do confinamento que a parede do combustor impõe sobre o escoamento diminui com o aumento do diâmetro, permitindo que as estruturas turbulentas, apresentadas pela figura 4.4.2, se desenvolvam sem nenhuma restrição.

Portanto, conclui-se, neste trabalho, que a melhor configuração conteria um bico injetor de fluxo radial, com um misturador do tipo “swirler” e um combustor com o máximo diâmetro permitido dentro das instalações projetadas.

6 BIBLIOGRAFIA

- Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., 2003, “*Fundamentos da mecânica dos fluidos*”, traduzido por E. J. Zerbini, Ed. Edgard Blücher, S.Paulo, Brazil.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1998, “*An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*”, Addison Wesley Longman Ltd., Reino Unido.
- Maliska, C.R., 1995, “*Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*”, Ed. LTC, São Paulo, Brasil.
- Hoffmann, K.A., 2000, “*Computational Fluid Dynamics*”, 3º volume, Ed. EES, Kansas, Estados Unidos da América.
- Wilcox, D.C., 2004, “*Turbulence modeling for CFD*”, DCW Industries, California, Estados Unidos da América.
- Turns, S.R., 2000, “*An introduction to combustion: concepts and applications*”, Ed. McGraw-Hill, 2º edição, São Paulo, Brasil.
- Lefebvre, A.H., 1983, “*Gas turbine combustion*”, Ed. McGraw-Hill, São Paulo, Brasil.
- Donadio, D.L.S., 2004, “*Projeto de uma câmara de combustão para micro-turbina a gás a partir de conjunto turbo-compressor pré-existente*”, Trabalho de formatura, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.
- Griffiths, J.F., Barnard, J.A., 1995, “*Flame and combustion*”, Ed. Blackie Academic and Professional, Grã-Bretanha.