

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO DE AR EM UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO TUBULAR USANDO CFD

Giuliano Gardolinski Venson

Universidade Federal de Minas Gerais. Depto. de Engenharia Mecânica. Avenida Antônio Carlos 6627, Campus Universitário
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. CEP 31270-901
venson@ufmg.br

Gilberto Augusto Amado Moreira

Universidade Federal de Minas Gerais. Depto. de Engenharia Mecânica. Avenida Antônio Carlos 6627, Campus Universitário
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. CEP 31270-901
gilbertomoreira@yahoo.com.br

José Eduardo Mautone Barros

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Depto. de Ensino Superior. Avenida Amazonas 7675, Nova Gameleira
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. CEP 30510-000
mautone@des.cefetmg.br

Ramón Molina Valle

Universidade Federal de Minas Gerais. Depto. de Engenharia Mecânica. Avenida Antônio Carlos 6627, Campus Universitário
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. CEP 31270-901
ramon@demec.ufmg.br

Resumo. Neste trabalho é apresentada a modelagem e simulação do escoamento de ar em uma câmara de combustão tubular utilizando um programa computacional comercial baseado no método de volumes finitos. O escoamento turbulento é modelado utilizando os modelos de turbulência $k-\epsilon$ RNG e SST. O objetivo da modelagem é a obtenção e comparação dos perfis de pressão ao longo da câmara. Através da Equação de Bernoulli modificada determinam-se os coeficientes de descarga em cada seção característica, obtendo-se assim a porcentagem de ar que atravessa cada seção. Os coeficientes calculados através dos valores de pressão obtidos nas simulações são comparados com resultados experimentais para validação das modelagens. Os resultados obtidos para a queda de pressão na câmara utilizando o modelo de turbulência SST apresentam desvio médio de -16% em relação aos valores experimentais. Para o modelo $k-\epsilon$ RNG, o desvio médio é -44%.

Palavras chave: perfil de pressão, câmara de combustão, método de volumes finitos, CFD.

1. INTRODUÇÃO

Para se avaliar a qualidade de um processo de combustão é necessário conhecer a quantidade de ar que diretamente participa da combustão. Essa quantidade de ar está diretamente relacionada com a razão de “by-pass” do queimador, que corresponde a parcela de ar que é desviada da sua zona primária em relação à parcela não desviada. Na zona primária é onde ocorre o processo de combustão propriamente dito.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para determinação da razão de “by-pass” de uma câmara de combustão tubular utilizando o conceito de coeficientes de descarga. Os coeficientes são calculados através dos valores de queda de pressão na câmara, considerando diferentes áreas totais de passagem para o escoamento. Os valores de queda de pressão são obtidos através dos perfis de pressão obtidos em simulações do escoamento de ar na câmara, utilizando um programa comercial baseado no método de volumes finitos. O escoamento de ar ao longo da câmara é modelado através dos modelos de turbulência $k-\epsilon$ RNG e SST, ambos baseados nas equações de Navier-Stokes.

1.1. Câmara de Combustão

Uma câmara de combustão consiste de um equipamento térmico no qual a mistura ar-combustível é queimada. A energia química proveniente do combustível é transformada em energia térmica no escoamento de ar através do processo de combustão. As dimensões da câmara de combustão em estudo podem ser vistas na Fig. 1 e as principais partes constituintes na Fig. 2. Na câmara em estudo, o desvio do ar primário é realizado através de um difusor posicionado a montante do orifício primário, o qual pode ser visto na Fig. 2. O orifício primário é a seção característica de passagem da parcela principal do ar de combustão. A parcela de ar que é desviada da zona primária é novamente introduzida no tubo de chama através dos orifícios secundários e terciários, também mostrados na Fig. 2.

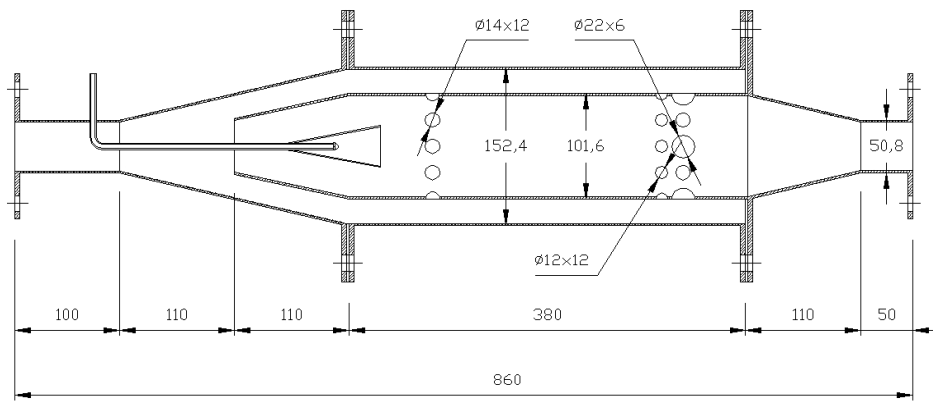


Figura 1. Dimensões da Câmara de Combustão (dimensões em mm)

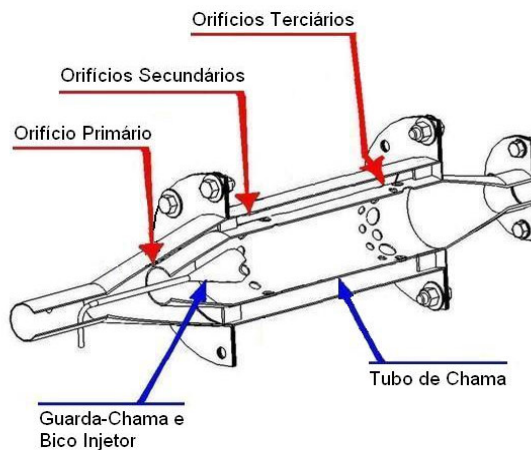


Figura 2. Corte Transversal da Câmara de Combustão

1.2. Modelagem de Escoamentos Turbulentos

Escoamentos turbulentos são definidos como escoamentos viscosos nos quais as partículas fluidas movem-se aleatoriamente, de forma tridimensional, transiente, rotacional e irregular.

Modelos matemáticos específicos são utilizados para prever os diferentes efeitos gerados pelo escoamento, onde a turbulência é um fator sempre presente. Alguns modelos de turbulência têm aplicações limitadas, enquanto outros podem ser utilizados em uma grande classe de escoamentos com certo grau de aproximação. Os modelos são baseados nas equações de Navier-Stokes, sendo classificados como de tensões de Reynolds (*Reynolds stress models*) ou de viscosidade turbulenta (*eddy-viscosity models*) (Maliska, 1995).

Os modelos de tensões de Reynolds surgiram por volta de 1895 quando Osborne Reynolds introduziu as equações médias de Navier-Stokes. Estes modelos eram muito limitados e podiam ser aplicados somente em problemas particulares ou com configurações geométricas semelhantes às anteriormente já estudadas, sendo inapropriados para escoamentos sobre geometrias complexas (Chatot, 2002). Com o avanço da computação no período pós Segunda Guerra Mundial, década de 50 do século XX, surgiram os modelos de turbulência de turbulência de 2ª ordem ou modelos de viscosidade turbulenta. Nestes modelos, as quantidades de transporte turbulento são modeladas por equações diferenciais. Os modelos de 2ª ordem mais empregados são os modelos k-ε, k-ω e o SST.

1.3. Modelo de Turbulência k-ε

O modelo k-ε RNG, aperfeiçoado em relação ao modelo k-ε standart, é o modelo de turbulência mais utilizado em análises de escoamento devido a sua estabilidade e robustez. O modelo k-ε utiliza funções de parede escalonáveis em conjunto com funções de parede convencionais, acarretando boa robustez e precisão quando a malha próxima a parede é muito fina. Conforme Maliska (1995), as duas variáveis principais no sistema de equações de conservação são a da continuidade, Eq. (1), e de momento, Eq. (2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) - \nabla(\mu_{EFF} \nabla U) = \nabla p' + \nabla(\mu_{EFF} \nabla U)^T + B \quad (2)$$

Onde p é a massa específica do fluido em kg/m^3 , U é o vetor velocidade em m/s , μ_{EFF} é a viscosidade efetiva considerando efeitos turbulentos em kg/m.s , dada pela Eq. (3), p' é a pressão modificada em Pa, dada pela Eq. (4), e B é soma de todas as forças atuando sobre o corpo em N.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (3)$$

$$\mu_{EFF} = \mu + \mu_T \quad (4)$$

Onde p é a pressão estática em Pa, k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa em J/kg , μ é viscosidade dinâmica em kg/m.s e μ_T é a viscosidade dinâmica turbulenta em kg/m.s

O modelo k- ϵ assume que a viscosidade dinâmica turbulenta está associada à energia cinética turbulenta:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

Onde C_μ é uma constante adimensional do modelo de turbulência com valor de 0,09 e ϵ é taxa de dissipação turbulenta em m^2/s^3 .

Os valores de k e ϵ são calculados diretamente segundo as equações diferenciais de transporte de energia cinética turbulenta e taxa de dissipação turbulenta, respectivamente:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho U \epsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (7)$$

Onde σ_k e σ_ϵ são constantes adimensionais das equações com valores iguais a 1 e 1,3 respectivamente, P_k é a produção de turbulência devido a forças viscosas em kg/m.s^3 , modelada através da Eq. (8), e $C_{\epsilon 1}$ e $C_{\epsilon 2}$ são constantes adimensionais com valores de 1,44 e 1,92 respectivamente.

$$P_k = \mu_T \nabla U (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} (\nabla U) (3 \mu_T \nabla U + \rho k) + P_{kb} \quad (8)$$

1.3. Modelo de Turbulência SST

Os modelos de turbulência baseados nas equações ϵ falham na previsão de separação do escoamento sobre geometrias complexas, pois prevêm esta separação com muito atraso (Sklavounos e Rigas, 2004). O modelo SST, ou Shear Stress Transport, foi desenvolvido para superar as deficiências do modelo k- ϵ tradicional. Este modelo é mais completo se comparado aos modelos k- ϵ e k- ω pois introduz uma nova equação, a do transporte de tensões de cisalhamento turbulentas. Sendo assim, este modelo é mais recomendado em simulações onde se requer uma grande precisão das condições nas diferentes camadas do escoamento. O modelo k- ω assume que a viscosidade turbulenta está associada à energia cinética turbulenta e a frequência turbulenta segundo:

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\omega} \quad (9)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido em kg/m^3 , k é a energia cinética turbulenta por unidade de massa em m^2/s^2 e ω é frequência turbulenta em Hz.

O modelo emprega duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta e outra para a frequência turbulenta, respectivamente:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla(\rho U\omega) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \frac{\alpha\omega P_k}{k} - \beta\rho\omega^2 \quad (11)$$

Onde U é o vetor velocidade em m/s, μ é viscosidade dinâmica em kg/m.s, σ_k e σ_ω são constantes adimensionais das equações com valores iguais a 2, P_k é a produção de turbulência devido a forças viscosas em kg/m.s³, modelada através da Eq. (8) e α , β , β' são constantes adimensionais com valores igual a 0,56, 0,075 e 0,09 respectivamente.

Os modelos de turbulência k- ϵ e k- ω não levam em consideração o transporte das tensões de cisalhamento turbulentas, resultando em uma subestimação nos parâmetros de viscosidade turbulenta. O comportamento correto do transporte turbulento pode ser obtido através do limite da formulação de viscosidade turbulenta, conforme:

$$\nu_T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega S F)} \quad (12)$$

Onde ν_T é a viscosidade cinemática turbulenta em m²/s, α_1 é uma constante adimensional do modelo, F é uma função que associa a distância da parede mais próxima com as variáveis do escoamento k e ω .

1.4. Equação de Bernoulli Modificada

A equação de Bernoulli é utilizada para modulação da vazão em elementos geradores de depressão, podendo ser aplicada em escoamentos incompressíveis, onde por definição o número de Mach não supera o valor de 0,3. No dimensionamento destes elementos o coeficiente de descarga é tabelado em função da razão de áreas de passagem do escoamento. A mesma equação pode ser aplicada para determinação do coeficiente de descarga de uma seção característica se conhecida a vazão mássica nessa seção. O coeficiente de descarga é utilizado matematicamente para corrigir as equações de vazão em função dos efeitos reais do escoamento. A equação de Bernoulli modificada, utilizada em sistemas deprimogênicos, é apresentada em Delmée (1983):

$$\dot{m} = C_d EA_2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (13)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica em kg/s, C_d o coeficiente de descarga adimensional, E o coeficiente adimensional de velocidades, definido através da razão de áreas do escoamento, A_2 é área da seção transversal da garganta do elemento em m², Δp é a perda de carga gerada no elemento em Pa.

Considerando que as áreas de entrada e saída da câmara de combustão em estudo são iguais, que a vazão mássica é conhecida e utilizando a área total de passagem do escoamento de ar como referência, o coeficiente de descarga é expresso na forma:

$$C_d = \frac{\dot{m}}{A_{REF} \sqrt{2\Delta p \rho}} \quad (14)$$

2. Método para Determinação dos Coeficientes de Descarga

A determinação dos coeficientes de descarga dos orifícios primário, secundários e terciários são obtidos de forma diferencial. Utiliza-se o mesmo método empregado em sistemas elétricos para determinação da resistência elétrica equivalente, quando as resistências são ligadas em paralelo, de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (16)$$

Em função dos coeficientes de descarga de cada seção característica da câmara de combustão, a Eq. (16) reescreve-se na seguinte forma:

$$\frac{1}{C_{deq}} = \frac{1}{C_{d1}} + \frac{1}{C_{d2}} + \frac{1}{C_{d3}} \quad (17)$$

Onde C_{d1} , C_{d2} e C_{d3} são os coeficientes de descarga dos orifícios primários, secundários e terciários, respectivamente.

O método prático para obtenção destes coeficientes consiste na obstrução alternada dos orifícios de passagem de ar. Ao fechar-se um ou mais conjuntos de orifícios, os respectivos coeficientes de descarga tornam-se zero, gerando diferentes coeficientes de descarga equivalentes para cada combinação testada. Monta-se assim um sistema de equações para determinação do coeficiente de descarga de cada conjunto de orifícios. A partir da relação entre estes valores é possível calcular a porcentagem mássica de ar que atravessa cada seção e consequentemente, o “by-pass” da câmara.

3. MODELAGEM DO PERFIL DE PRESSÃO NA CÂMARA DE COMBUSTÃO

3.1. Condições de Simulação do Escoamento de Ar

As simulações do escoamento ao longo da câmara de combustão são realizadas utilizando o programa comercial CFX 9.0. Como condições de entrada da modelagem são definidas a vazão mássica de ar, temperatura e pressão absoluta. A condição de saída é a conservação da vazão mássica de ar. Os valores de entrada são: vazão mássica de 0,085 kg/s, temperatura de 25 °C e pressão absoluta de 101,3 kPa (1 atm). Foram realizadas simulações utilizando os modelos de turbulência k-ε RNG e SST. Em ambos as modelagens não foram alteradas as constantes de turbulência padrões dos modelos. O volume da câmara de combustão utilizado para a análise foi a sua geometria real.

Para se avaliar o comportamento do coeficiente de descarga da câmara, em função das diferentes áreas de passagem do escoamento de ar, foram realizadas quatro simulações para cada modelo de turbulência utilizado, as quais são descritas na Tab. 1. Nos diferentes casos apresentados, os fechamentos dos orifícios citados foram obtidos alterando-se o desenho base da câmara de combustão.

Tabela 1. Descrição das Condições de Simulação

número da simulação	descrição	equação do coeficiente de descarga equivalente
1	todos os orifícios abertos	$\frac{1}{C_{d1}} + \frac{1}{C_{d2}} + \frac{1}{C_{d3}}$
2	somente o orifício primário aberto (orifícios secundários e terciários fechados)	$\frac{1}{C_{d1}}$
3	orifícios primário e secundários abertos (orifícios terciários fechados)	$\frac{1}{C_{d1}} + \frac{1}{C_{d2}}$
4	orifícios primário e terciários abertos (orifícios secundários fechados)	$\frac{1}{C_{d1}} + \frac{1}{C_{d3}}$

3.2. Características das Malhas Geradas no CFX

Nas diferentes simulações foram utilizadas as mesmas configurações de malha. A Figura 3 mostra o aspecto externo da malha e a Tab. 2 apresenta os detalhes das malhas, geradas automaticamente pelo software.



Figura 3. Malha Gerada no CFX.

Tabela 2. Detalhes das Malhas Geradas no CFX

parâmetro	número da simulação			
	1	2	3	4
número total de nós	78.575	44.250	55.606	66.569
número total de elementos	408.630	225.484	285.535	345.426
número total de tetraedros	408.630	225.484	285.535	345.426
número total de faces	35.580	22.342	26.764	30.262

3.3. Perfil de Pressão na Câmara nas Condições Simuladas

A partir das simulações do escoamento de ar ao longo da câmara são obtidas as respectivas curvas de pressão relativa ao longo do eixo axial, as quais são mostradas nas Figs. 4 e 5. Os perfis de pressão e velocidade dentro da câmara obtidos através da simulação com o modelo SST, considerando todos os orifícios abertos, são mostrados nas Figs. 6 e 7 respectivamente.

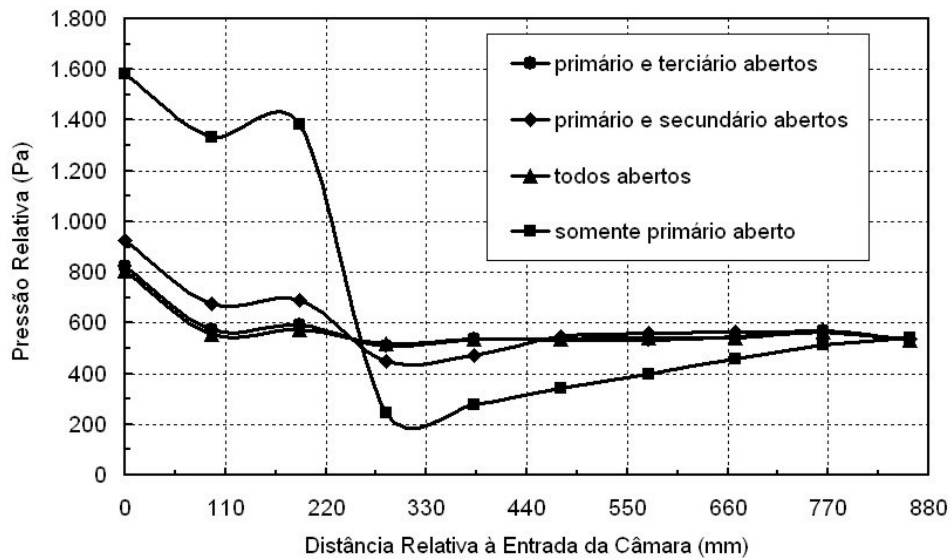


Figura 4. Perfil de Pressão ao Longo da Câmara de obtido com o Modelo k-ε RNG

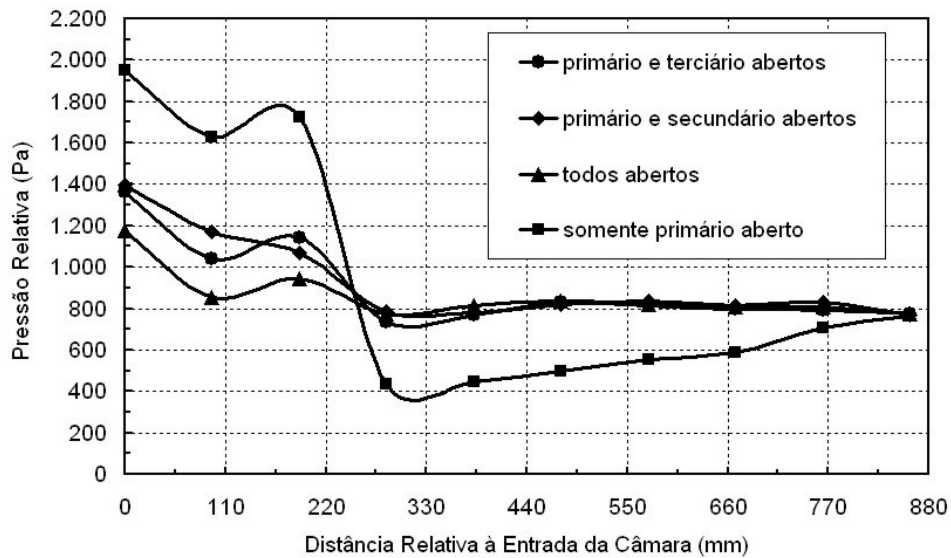


Figura 5. Perfil de Pressão ao Longo da Câmara de obtido com o Modelo SST

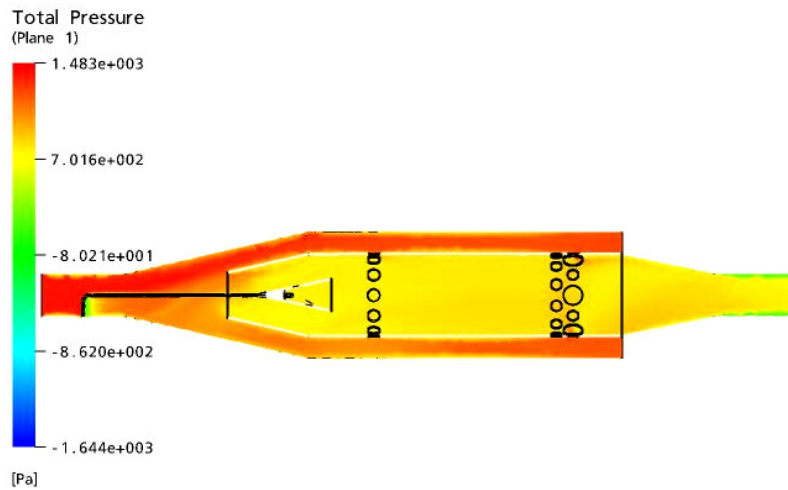


Figura 6. Perfil de Pressão ao Longo da Câmara Utilizando o Modelo SST, para todos os Orifícios Abertos

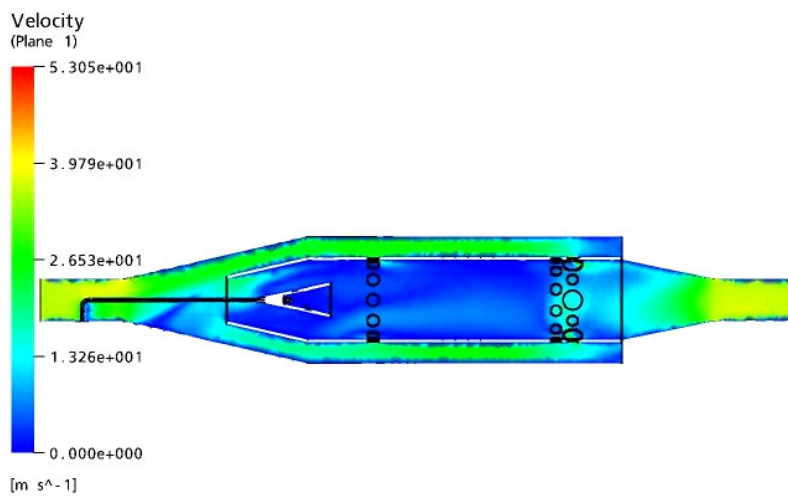


Figura 7. Perfil de Velocidades ao Longo da Câmara Utilizando o Modelo SST, para todos os Orifícios Abertos

A partir dos valores de velocidades obtidos na Fig. 7 verifica-se que a velocidade máxima do escoamento ao longo da câmara é da ordem dos 40 m/s, o que corresponde a um número de Mach de 0,12. Sendo assim, considera-se o escoamento incompressível, podendo ser aplicada a Eq. (14) para cálculo dos coeficientes de descarga.

3.4. Obtenção dos Coeficientes de Descarga

A partir dos valores de queda de pressão mostrados nas Figs. 4 e 5 e das áreas de referência de passagem do ar, calculadas através das dimensões mostradas na Fig. 1, são obtidos os coeficientes de descarga equivalentes em cada condição de simulação, para os dois modelos de turbulência empregados.

Tabela 3. Coeficientes de Descarga Equivalentes obtidos nas Simulações

número da simulação	vazão mássica de ar (kg/s)	área de referência (m ²)	modelo de turbulência			
			k-ε RNG		SST	
			queda de pressão (Pa)	coeficiente de descarga equivalente	queda de pressão (Pa)	coeficiente de descarga equivalente
1	0,085	0,00844	272	0,41429	402	0,34078
2	0,085	0,00203	1.040	0,88181	1.190	0,89850
3	0,085	0,00387	389	0,75433	627	0,67437
4	0,085	0,00659	288	0,51550	585	0,38993

Os coeficientes de descarga de cada seção característica são obtidos através dos valores equivalentes, mostrados na Tab. 3, e das respectivas equações, mostradas na Tab. 1. Os valores dos coeficientes são mostrados nas Tabs. 4 e 5. A Tabela 6 apresenta os valores aproximados para a razão de “by-pass” da câmara de combustão, obtidas para cada modelo de turbulência utilizado. O valor do “by-pass” é calculado através da razão da soma dos coeficientes secundários e terciários com o coeficiente de descarga do orifício primário.

Tabela 4. Coeficientes de Descarga das Seções Características com base nas Simulações

número da simulação	k-ε RNG				SST			
	1/C _{deq}	1/C _{d1}	1/C _{d2}	1/C _{d3}	1/C _{deq}	1/C _{d1}	1/C _{d2}	1/C _{d3}
1	2,41380	1,22812	0,28574	-	2,93447	1,11297	0,36990	1,45160
2	1,22812	1,22812	-	-	1,11297	1,11297	-	-
3	1,51386	1,22812	0,28574	-	1,48287	1,11297	0,36990	-
4	2,12806	1,22812	-	0,89993	2,56457	1,11297	-	1,45160

Tabela 5. Razão de By-Pass com base nos Coeficientes de Descarga

região da câmara de combustão	k-ε RNG		SST	
	1/C _d	valor percentual	1/C _d	valor percentual
todos os orifícios	2,41380	100,00%	2,93447	100,00%
orifício primário	1,22812	50,88%	1,11297	37,93%
orifícios secundários	0,28574	11,84%	0,36990	12,61%
orifícios terciários	0,89993	37,26%	1,45160	49,47%
razão de by-pass	1:1		5:3	

O número de Reynolds do escoamento, calculado através da vazão mássica de ar e da área transversal na entrada da câmara de combustão, é de 124.000, comprovando que o escoamento está no regime turbulento.

4. Validação da Modelagem

Os resultados obtidos nas simulações foram comparados com resultados experimentais obtidos através da câmara de combustão instrumentada, mostrada na Fig. 8. Na montagem experimental foi empregado um sensor de pressão diferencial, com as respectivas tomadas de pressão fixadas na entrada e saída da câmara, conforme mostrado na Fig 8. O sensor utilizado foi o MPX-5010 DP, com faixa de medição de 0 a 10 kPa e incerteza de 100 Pa. A vazão mássica do escoamento foi obtida a partir da queda de pressão em uma placa de orifício colocada a montante da câmara de combustão. Os resultados experimentais, para as quatro condições estudadas são mostrados nas Tabs. 6 a 8.



Figura 7. Câmara de Combustão Instrumentada

Tabela 6. Coeficientes de Descarga Equivalentes obtidos Experimentalmente

número do ensaio	vazão mássica de ar (kg/s)	área de referência (m ²)	queda de pressão na câmara de combustão (Pa)	coeficiente de descarga equivalente
1	0,085	0,00844	499	0,31508
2	0,083	0,00203	1.392	0,76370
3	0,084	0,00387	767	0,58572
4	0,084	0,00659	673	0,36024

Tabela 7. Coeficientes de Descarga de Cada Seção Característica com base nos Valores Experimentais

número do ensaio	1/C _{deq}	1/C _{d1}	1/C _{d2}	1/C _{d3}
1	3,17382	1,30942	0,39787	1,46654
2	1,30942	1,30942	-	-
3	1,70729	1,30942	0,39787	-
4	2,77596	1,30942	-	1,46654

Tabela 8. Razão de By-Pass com base nos Coeficientes de Descarga

região da câmara de combustão	experimental	
	1/C _d	valor percentual
todos os orifícios	3,17382	100,00%
orifício primário	1,30942	41,26%
orifícios secundários	0,39787	12,54%
orifícios terciários	1,46654	46,21%
razão de by-pass	3:2	

Os critérios utilizados para validação das modelagens são as comparações entre os valores de queda de pressão e os percentuais de fluxo mássico, de cada seção característica, obtidos nas simulações em relação aos resultados experimentais. Os resultados finais são apresentados nas Tabs. 9 a 11.

Tabela 9. Desvios entre os Resultados Simulados e Experimentais para a Queda de Pressão

número da simulação/ensaio	queda de pressão na câmara			desvio dos valores simulados em relação aos experimentais	
	experimental	k-ε RNG	SST	k-ε RNG	SST
1	499	272	402	- 45,45%	+ 19,38%
2	1.392	1.040	1.190	- 25,29%	- 14,51%
3	767	389	627	- 49,28%	- 18,25%
4	673	288	585	- 57,23%	- 13,12%

Tabela 10. Desvios entre os Resultados Simulados e Experimentais para os Coeficientes de Descarga

região da câmara de combustão	1 / Cd			desvio dos valores simulados em relação aos experimentais	
	experimental	k-ε RNG	SST	k-ε RNG	SST
todos os orifícios	3,17382	2,41380	2,93447	- 23,95%	- 7,54%
orifício primário	1,30942	1,22812	1,11297	- 6,21%	- 15,00%
orifícios secundários	0,39787	0,28574	0,36990	- 28,18%	- 7,03%
orifícios terciários	1,46654	0,89993	1,45160	- 38,64%	- 1,02%

Tabela 11. Desvios entre os Resultados Simulados e Experimentais para os Percentuais de Fluxo Mássico

região da câmara de combustão	percentuais de fluxo mássico			desvio dos valores simulados em relação aos experimentais	
	experimental	k-ε RNG	SST	k-ε RNG	SST
todos os orifícios	100,00%	100,00%	100,00%	-	-
orifício primário	41,26%	50,88%	37,93%	+ 23,32%	- 8,07%
orifícios secundários	12,54%	11,84%	12,61%	- 5,57%	+ 0,55%
orifícios terciários	46,21%	37,28%	49,47%	- 19,31%	+ 7,05%
razão de by-pass	3:2	1:1	5:3	- 33,33%	+ 11,11%

5. CONCLUSÕES

As simulações do escoamento de ar ao longo da câmara de combustão, utilizando os modelos de turbulência k-ε RNG e SST, retratam o comportamento físico das quedas de pressão nesta, nas diferentes situações analisadas. Utilizando os dois modelos de turbulência, assim como nos ensaios experimentais, a queda de pressão na câmara é menor quanto todos os orifícios estão abertos e maior quanto os orifícios secundários e terciários estão fechados. Este fato está associado diretamente com a área de passagem livre para o escoamento, visto que áreas de passagem maiores acarretam em uma menor perda de pressão.

Utilizando o modelo de turbulência k-ε RNG, os valores de queda de pressão na câmara apresentam desvio médio de -44% em relação aos valores experimentais, com valor máximo de -57% para a condição de orifícios secundários e terciários fechados. Em relação aos coeficientes de descarga, o desvio médio é -24%, com valor máximo de -38%. A razão de by-pass calculada a partir dos coeficientes de descarga apresenta desvio de -33% em relação à calculada experimentalmente. Para o modelo de turbulência SST, os valores de queda de pressão apresentam desvio médio de -16%, com desvio máximo de -19% para a condição de todos os orifícios abertos. Em relação aos coeficientes de descarga, o desvio médio é de -8%, com valor máximo de -15%. A razão de by-pass calculada apresenta desvio de +11% em relação à calculada experimentalmente.

A partir dos resultados mostrados nas Tabs. 9 a 11 verifica-se que o modelo SST se mostra mais adequado para as análises ao longo da câmara de combustão. A comparação e validação dos resultados obtidos permitem estender a metodologia para analisar também os fenômenos de estagnação e recirculação de ar dentro da câmara de combustão.

6. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, através do apoio financeiro através do projeto FAPEMIG/FINEP EDT 1647/04.

7. REFERÊNCIAS

- ANSYS Company, 2003. "CFX Solver Theory Manual". Oxfordshire: CFX.
- Chatot, J. J., 2002. "Computational Aerodynamics and Fluid Dynamics: An Introduction". New York: Springer. 186 p.
- Delmé, G. J., 1983. "Manual de Medição de Vazão". São Paulo: Editora Edgard Blucher. 474p.
- Maliska, C. R., 1995. "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional". Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S/A.
- Souza, R. A. "Análise de Desempenho de uma Câmara de Combustão para Aplicação em uma Microturbina à Gás". Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 60p. (Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica).
- Sklavounos S., Rigas F., 2004. "Validation of Turbulence Models in Heavy Gas Dispersion Over Obstacles". Journal of Hazardous Materials, A108 9-20. Elsevier. pp. 12-13.

ANALYSIS OF THE AIR FLOW BEHAVIOR IN A TUBULAR COMBUSTION CHAMBER USING CFD

Giuliano Gardolinski Venson

Federal University of Minas Gerais. Mechanical Engineering Department. Antônio Carlos Avenue 6627
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Zip-Code: 31270-901
venson@ufmg.br

Gilberto Augusto Amado Moreira

Federal University of Minas Gerais. Mechanical Engineering Department. Antônio Carlos Avenue 6627
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Zip-Code: 31270-901
gilbertomoreira@yahoo.com.br

José Eduardo Mautone Barros

Federal Center of Technological Education of Minas Gerais. Amazonas Avenue 7675, Nova Gameleira
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Zip-Code: 30510-000
mautone@des.cefetmg.br

Ramón Molina Valle

Federal University of Minas Gerais. Mechanical Engineering Department. Antônio Carlos Avenue 6627
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Zip-Code: 31270-901
ramon@demec.ufmg.br

Abstract

This work presents the modeling and simulation of the air flow in a tubular combustion chamber using a commercial computational program based at the finite volume method. The turbulent flow is shaped using the Navier-Stokes equation, through the k- ϵ RNG and SST turbulence models. The objective of the simulation is the achievement and comparison of the pressure profiles along the combustion chamber. Through the modified Bernoulli equation the discharge flow coefficients in each characteristic section are calculated, obtaining the percentage of air that crosses each section. The coefficients calculated through the simulated pressure values are compared with experimental data to validate the modeling process. The pressures drop values obtained using the SST turbulence model presents average deviation of -16% than experimental data. For the k- ϵ RNG turbulence model, the average deviation is -44%.

Keywords: pressure profile, combustion chamber, finite volume method, CFD.