

Eulerian-Lagrangian Simulation of a Turbulent Evaporating Spray

Rodrigo B. Piccinini

e-mail: rbpiccinini@gmail.com

Apresentação de Tese de Mestrado



Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Programa de Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia

Novembro, 2011.

Conteúdo

Introdução

Equações

- A Fase Contínua

- A Fase Dispersa

Cálculo Numérico

Resultados

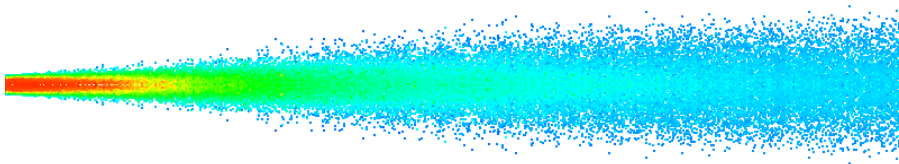
- O Jato Turbulento

- Velocidade das Fases

- Vazão Mássica das Gotas e do Vapor

Conclusões

Definição:



Motivação:

- ▶ Aplicações em geração de energia e propulsão;
- ▶ escoamento multifásico e turbulento com transferências de momento, calor e massa entre as fases.

Tratamento das fases:

- ▶ Método Euleriano-Lagrangiano.

Objetivos

- ▶ Implementar um modelo de escoamento de baixo Mach.
- ▶ Aplicar modelos de troca de massa, momento e energia entre as fases e um modelo de viscosidade turbulenta para descrever o jato do spray.
- ▶ Comparar quantidades calculadas como velocidade e diâmetro das gotas, velocidade do gás e propriedades da turbulência com experimentos relatados na literatura.

Introdução

Equações

A Fase Contínua

A Fase Dispersa

Cálculo Numérico

Resultados

O Jato Turbulento

Velocidade das Fases

Vazão Mássica das Gotas e do Vapor

Conclusões

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais
+ **termos fontes do spray**;

Two-way coupling ou acoplamento em duas vias

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais
+ **termos fontes do spray**;
2. Aproximação para baixo Mach;

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais + **termos fontes do spray**;
2. Aproximação para baixo Mach;

Séries de potências em $\xi = \sqrt{\gamma_\infty} M$:

$$p = p_0 + p_1 \xi + p_2 \xi^2 + O(\xi^3)$$

$$Y_k = Y_{k,0} + O(\xi)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 + O(\xi)$$

$$T = T_0 + O(\xi)$$

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais + **termos fontes do spray**;
2. Aproximação para baixo Mach;
3. Escoamento médio (Reynolds e Favre);

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais
+ **termos fontes do spray**;
2. Aproximação para baixo Mach;
3. Escoamento médio (Reynolds e Favre);

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais + **termos fontes do spray**;
2. Aproximação para baixo Mach;
3. Escoamento médio (Reynolds e Favre);
4. Modelo de turbulência;

Obtendo as equações da fase contínua:

1. Equações (na forma compressível) para uma mistura de gases ideais + **termos fontes do spray**;
2. Aproximação para baixo Mach;
3. Escoamento médio (Reynolds e Favre);
4. Modelo de turbulência;

Modelo de viscosidade turbulenta (k-epsilon):

2 EDPs para k e ϵ

1 Equação Algébrica para μ_t

Acoplamento com o spray em uma via (*one-way coupling*)

Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}}) = \bar{S}_m$$

Equação das Espécies Químicas: Acetona e Ar.

Equação das Espécies Químicas: Acetona e Ar.

- ▶ Acetona - espécie escassa:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{ac}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{Y}_{ac}) = \nabla \cdot [\bar{\rho} (\nu + \nu_T) \nabla \tilde{Y}_{ac}] + \bar{S}_{Y_{ac}}$$

Equação das Espécies Químicas: Acetona e Ar.

- ▶ Acetona - espécie escassa:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{ac}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{Y}_{ac}) = \nabla \cdot [\bar{\rho} (\nu + \nu_T) \nabla \tilde{Y}_{ac}] + \bar{S}_{Y_{ac}}$$

Lei de Fick para difusão, $\mathbf{V}_{ac} Y_{ac} = -\mathcal{D} \nabla Y_{ac}$.
Número de Schmidt unitário, $Sc = \nu / \mathcal{D} = 1$.

Equação das Espécies Químicas: Acetona e Ar.

- ▶ Acetona - espécie escassa:

$$\frac{\partial \tilde{\rho} \tilde{Y}_{ac}}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{Y}_{ac}) = \nabla \cdot [\tilde{\rho} (\nu + \nu_T) \nabla \tilde{Y}_{ac}] + \tilde{S}_{Y_{ac}}$$

- ▶ Ar - espécie diluente:

$$\tilde{Y}_{air} = 1 - \tilde{Y}_{ac}$$

Lei de Fick para difusão, $\mathbf{V}_{ac} Y_{ac} = -\mathcal{D} \nabla Y_{ac}$.
Número de Schmidt unitário, $Sc = \nu / \mathcal{D} = 1$.

Equação do Momento

Em quantidades não dimensionais.

Equação do Momento

Em quantidades não dimensionais.

Formulação Compressível:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\frac{1}{\Gamma M^2} \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \tau + \frac{\rho}{Fr^2} \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} + \mathbf{S}_{mom}$$

Equação do Momento

Em quantidades não dimensionais.

Formulação Compressível:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\frac{1}{\Gamma M^2} \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \tau + \frac{\rho}{Fr^2} \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} + \mathbf{S}_{mom}$$

Formulação de baixo Mach:

$$\frac{\partial \rho_0 \mathbf{U}_0}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{U}_0 \mathbf{U}_0) = -\nabla p_2 + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \tau_0 + \frac{\rho_0}{Fr^2} \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} + \mathbf{S}_{mom}$$

$$\nabla p_0 \equiv 0 \implies p_0 = p_0(t)$$

Equação do Momento

Em quantidades não dimensionais.

$$p = p_0 + p_1\xi + p_2\xi^2 + O(\xi^3)$$

Formulação Compressível:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\frac{1}{\Gamma M^2} \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \tau + \frac{\rho}{Fr^2} \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} + \mathbf{S}_{mom}$$

Formulação de baixo Mach:

$$\frac{\partial \rho_0 \mathbf{U}_0}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{U}_0 \mathbf{U}_0) = -\nabla p_2 + \frac{1}{Re} \nabla \cdot \tau_0 + \frac{\rho_0}{Fr^2} \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} + \mathbf{S}_{mom}$$

$$\nabla p_0 \equiv 0 \implies p_0 = p_0(t)$$

Decomposição da pressão:

Decomposição da pressão:

- ▶ $p_0(t)$ é utilizada na equação de estado:

$$p_0 W = \bar{\rho} R \tilde{T}$$

Decomposição da pressão:

- ▶ $p_0(t)$ é utilizada na equação de estado:

$$p_0 W = \bar{\rho} R \tilde{T}$$

- ▶ $p_2(\mathbf{x}, t)$ é utilizada na equação do momento:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{U}}) = -\nabla \bar{p}_2 + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \bar{\rho} \mathbf{g} + \bar{\mathbf{S}}_{mom}$$

Em quantidades dimensionais e para o escoamento médio.

Decomposição da pressão:

- ▶ $p_0(t)$ é utilizada na equação de estado:

$$p_0 W = \bar{\rho} R \tilde{T}$$

- ▶ $p_2(\mathbf{x}, t)$ é utilizada na equação do momento:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{U}}) = -\nabla \bar{p}_2 + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \bar{\rho} \mathbf{g} + \bar{\mathbf{S}}_{mom}$$

Em quantidades dimensionais e para o escoamento médio.

$\bar{\boldsymbol{\tau}}$ é o tensor de tensões de cisalhamento com $\mu_{eff} = \mu + \mu_T$.

Equação da Entalpia:

Em quantidades não dimensionais.

Equação da Entalpia:

Em quantidades não dimensionais.

Formulação Compressível:

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_s) = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{J}_s$$

$$+ M^2 (\Gamma - 1) \left(\frac{\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{U}}{Re} \right) + S_{h_s}$$

Equação da Entalpia:

Em quantidades não dimensionais.

Formulação Compressível:

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_s) = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{J}_s$$

$$+ M^2 (\Gamma - 1) \left(\frac{\boldsymbol{\tau} : \nabla \mathbf{U}}{Re} \right) + S_{hs}$$

Formulação de baixo Mach:

$$\frac{\partial \rho_0 h_{s0}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{U}_0 h_{s0}) = \frac{\Gamma - 1}{\Gamma} \frac{Dp_0}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{J}_{s0} + S_{hs}$$

Equação da Entalpia:

Em quantidades dimensionais e para o escoamento médio.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{h}_s) = \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_s + \bar{S}_{hs}$$

$$\bar{\mathbf{J}}_s = \bar{\rho} (\alpha + \nu_T) \nabla \tilde{h}_s$$

Equação da Entalpia:

Em quantidades dimensionais e para o escoamento médio.

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{U}} \tilde{h}_s) = \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_s + \bar{S}_{hs}$$

$$\bar{\mathbf{J}}_s = \bar{\rho} (\alpha + \nu_T) \nabla \tilde{h}_s$$

Simplificações:

- ▶ $Dp_0/Dt \approx 0$;
- ▶ $h_{s,ac} \approx h_{s,ar}$;
- ▶ $Pr_T = 1$.

A Fase Dispersa

A Fase Dispersa

- ▶ As gotas são partículas de diâmetro D ;

A Fase Dispersa

- ▶ As gotas são partículas de diâmetro D ;
- ▶ Equações em referencial Lagrangiano (3 EDOs para cada gota);

A Fase Dispersa

- ▶ As gotas são partículas de diâmetro D ;
- ▶ Equações em referencial Lagrangiano (3 EDOs para cada gota);
- ▶ Termodinâmica: m_d, p_0, T_d ;

A Fase Dispersa

- ▶ As gotas são partículas de diâmetro D ;
- ▶ Equações em referencial Lagrangiano (3 EDOs para cada gota);
- ▶ Termodinâmica: m_d, p_0, T_d ;
- ▶ Cinemática: posição (\mathbf{x}_d), velocidade translacional (\mathbf{U}_d).

A Fase Dispersa

Equação do Momento:

$$m_d \frac{d\mathbf{U}_d}{dt} = -\rho \frac{\pi D^2}{8} C_D |\mathbf{U}_{slip}| \mathbf{U}_{slip} + m_d \mathbf{g}$$

A Fase Dispersa

Equação do Momento:

$$m_d \frac{d\mathbf{U}_d}{dt} = -\rho \frac{\pi D^2}{8} C_D |\mathbf{U}_{slip}| \mathbf{U}_{slip} + m_d \mathbf{g}$$

Dispersão das Gotas:

$$\mathbf{U}_{slip} = \mathbf{U}_d - \underbrace{(\tilde{\mathbf{U}} + \mathbf{U}'')}_{\text{gás}}$$

A Fase Dispersa

Equação do Momento:

$$m_d \frac{d\mathbf{U}_d}{dt} = -\rho \frac{\pi D^2}{8} C_D |\mathbf{U}_{slip}| \mathbf{U}_{slip} + m_d \mathbf{g}$$

Dispersão das Gotas:

$$\mathbf{U}_{slip} = \mathbf{U}_d - \underbrace{(\tilde{\mathbf{U}} + \mathbf{U}'')}_{\text{gás}}$$

$|\mathbf{U}''|$ é uma variável aleatória dada por $\mathcal{N}(0, 2/3k^2)$.

Equação da Energia:

$$m_d \frac{dh_d}{dt} = \frac{dm_d}{dt} L_v (T_d) + Q_d$$

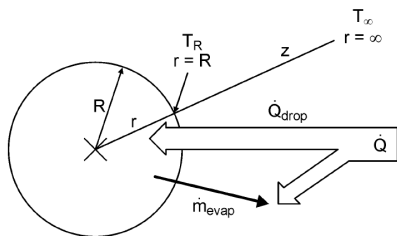
Equação da Energia:

$$m_d \frac{dh_d}{dt} = \frac{dm_d}{dt} L_v (T_d) + Q_d$$

Transferência de Calor:

Equação da energia para o vapor na vizinhança da gota:

$$Q_d = \pi D \kappa Nu \left(\tilde{T} - T_d \right) \frac{z}{e^z - 1}$$



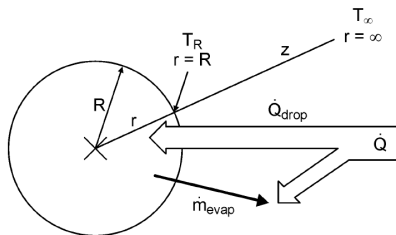
Equação da Energia:

$$m_d \frac{dh_d}{dt} = \frac{dm_d}{dt} L_v (T_d) + Q_d$$

Transferência de Calor:

Equação da energia para o vapor na vizinhança da gota:

$$Q_d = \pi D \kappa Nu \left(\tilde{T} - T_d \right) \frac{z}{e^z - 1}$$



Correlação de Ranz & Marshall: $Nu = 2.0 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3}$.

Transferência de Massa

Transferência de Massa

- ▶ Líquido e vapor em equilíbrio na superfície da gota.

$$Y_{ac,s} = \frac{p_v(T_d)}{p_0} \frac{W_{ac}}{W}$$

Transferência de Massa

- ▶ Líquido e vapor em equilíbrio na superfície da gota.

$$Y_{ac,s} = \frac{p_v(T_d)}{p_0} \frac{W_{ac}}{W}$$

- ▶ Equações da continuidade e das espécies para o vapor na vizinhança da gota:

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi D D_{ac} \rho_{ac} \ln \left(\frac{1 - Y_{ac,\infty}}{1 - Y_{ac,s}} \right) Sh$$

Transferência de Massa

- ▶ Líquido e vapor em equilíbrio na superfície da gota.

$$Y_{ac,s} = \frac{p_v(T_d)}{p_0} \frac{W_{ac}}{W}$$

- ▶ Equações da continuidade e das espécies para o vapor na vizinhança da gota:

$$\frac{dm_d}{dt} = -2\pi D D_{ac} \rho_{ac} \ln \left(\frac{1 - Y_{ac,\infty}}{1 - Y_{ac,s}} \right) Sh$$

Correlação de Ranz & Marshall: $Sh = 2.0 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3}$.

Introdução

Equações

A Fase Contínua

A Fase Dispersa

Cálculo Numérico

Resultados

O Jato Turbulento

Velocidade das Fases

Vazão Mássica das Gotas e do Vapor

Conclusões

Cálculo Numérico

Cálculo Numérico

Método de Volumes Finitos

- ▶ Discretização da geometria;
- ▶ Discretização das equações;
- ▶ Algoritmo de solução do sistema de equações;

Cálculo Numérico

Método de Volumes Finitos

- ▶ Discretização da geometria;
- ▶ Discretização das equações;
- ▶ Algoritmo de solução do sistema de equações;

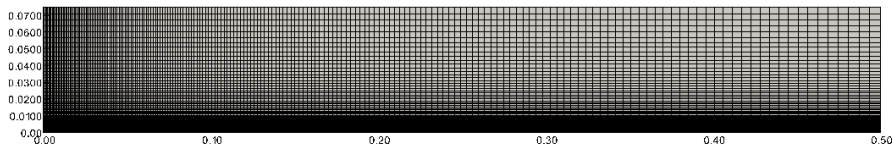
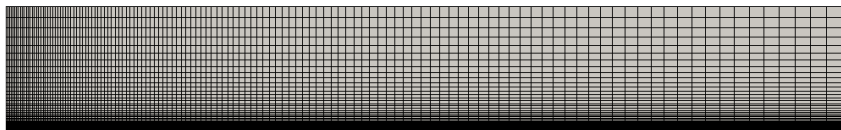
Open  FOAM

The Open Source CFD Toolbox ¹

¹<http://www.openfoam.org>

Discretização do Espaço

- ▶ Malha ortogonal 2D (axissimétrica);
- ▶ Malha fina: 14.800 células (74×200);
- ▶ Malha grossa: 5.460 células (42×130);



Discretização das Equações

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{derivada temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi)}_{\text{advecção}} - \underbrace{\nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi)}_{\text{difusão}} = \underbrace{S(\phi)}_{\text{fontes}}$$

Discretização das Equações

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{derivada temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi)}_{\text{advecção}} - \underbrace{\nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi)}_{\text{difusão}} = \underbrace{S(\phi)}_{\text{fontes}}$$

- ▶ Tempo: Euler implícito;

Discretização das Equações

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{derivada temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi)}_{\text{advecção}} - \underbrace{\nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi)}_{\text{difusão}} = \underbrace{S(\phi)}_{\text{fontes}}$$

- ▶ Tempo: Euler implícito;
- ▶ Advecção: teorema de Gauss + interpolação *upwind*;

Discretização das Equações

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{derivada temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi)}_{\text{advecção}} - \underbrace{\nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi)}_{\text{difusão}} = \underbrace{S(\phi)}_{\text{fontes}}$$

- ▶ Tempo: Euler implícito;
- ▶ Advecção: teorema de Gauss + interpolação *upwind*;
- ▶ Difusão: teorema de Gauss + interpolação linear + diferença centrada;

Discretização das Equações

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{derivada temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi)}_{\text{advecção}} - \underbrace{\nabla \cdot (\rho \Gamma_{\phi} \nabla \phi)}_{\text{difusão}} = \underbrace{S(\phi)}_{\text{fontes}}$$

- ▶ Tempo: Euler implícito;
- ▶ Advecção: teorema de Gauss + interpolação *upwind*;
- ▶ Difusão: teorema de Gauss + interpolação linear + diferença centrada;
- ▶ Fontes: tratamento explícito.

O Algoritmo de Solução

O Algoritmo de Solução

- ▶ Sistemas lineares segregados;

O Algoritmo de Solução

- ▶ Sistemas lineares segregados;
- ▶ Acoplamento das variáveis: algoritmo PISO;

Introdução

Equações

A Fase Contínua

A Fase Dispersa

Cálculo Numérico

Resultados

O Jato Turbulento

Velocidade das Fases

Vazão Mássica das Gotas e do Vapor

Conclusões

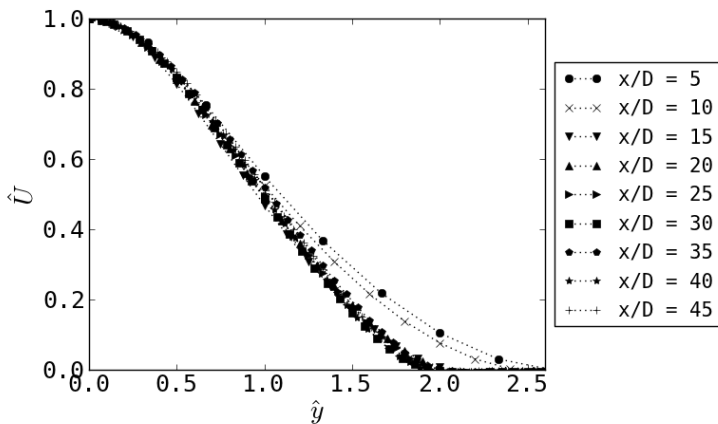


Figura: Perfis auto-similares de velocidade adimensional (\hat{U}).

O Jato Turbulento

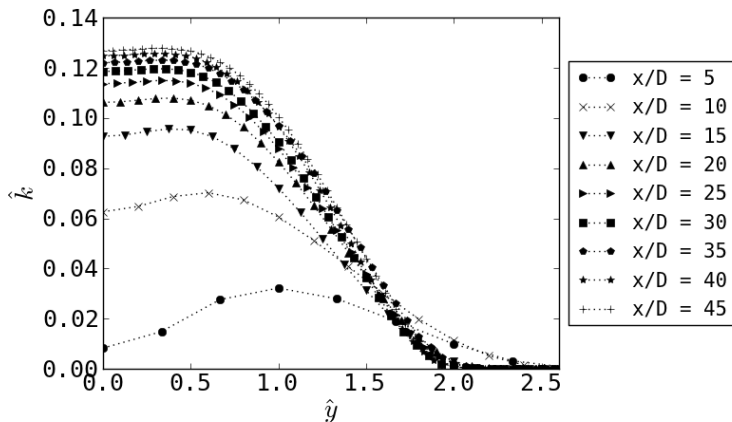


Figura: Perfis auto-similares de energia cinética turbulenta adimensional (\hat{k}).

O Jato Turbulento

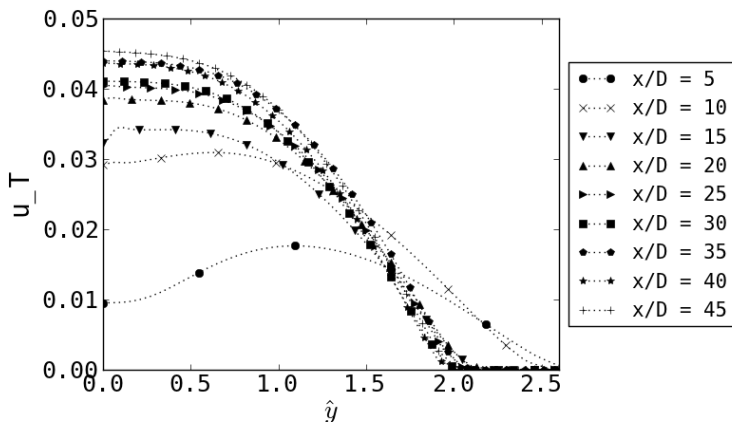


Figura: Perfis auto-similares da viscosidade turbulenta adimensional (\hat{u}_T).
 Superestimação: $\hat{u}_T = 0.047 > \underbrace{0.029}$.
 (POPE,2000)

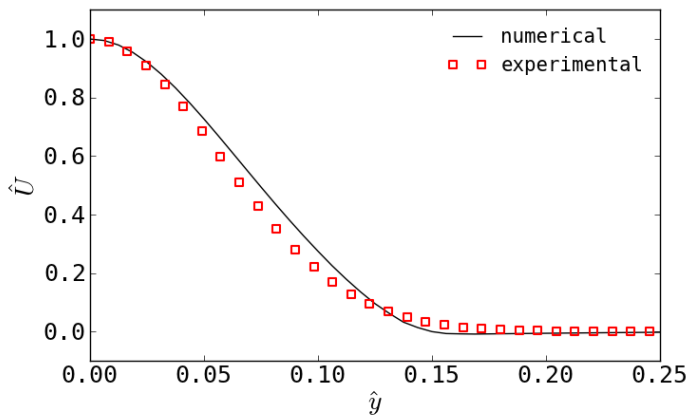


Figura: Comparação do perfis numérico e experimental (Chen et al., 2006) de \hat{U} .

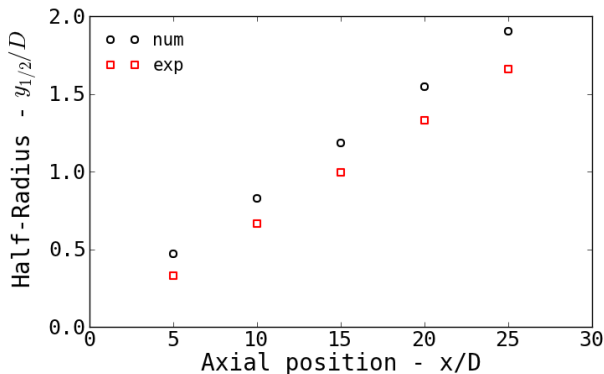


Figura: Raio médio numérico e experimental (Chen et al., 2006).

$$(dy_{1/2}/dx)_{\text{num}} \sim 20\% \text{ maior do que } (dy_{1/2}/dx)_{\text{exp}}.$$

Velocidade Axial Média da Fase Gasosa (\tilde{U}_x)

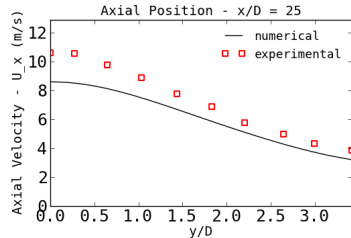
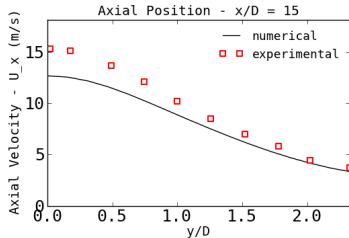
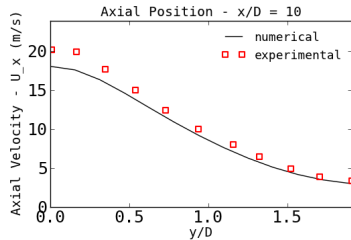
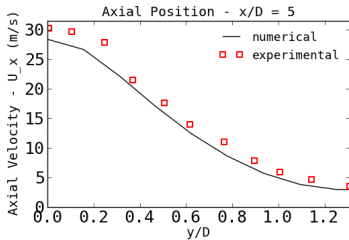


Figura: Velocidade da fase gasosa. Numérico e experimental (Chen et al., 2006).

Flutuação da Velocidade da Fase Gasosa ($\langle U'' \rangle$)

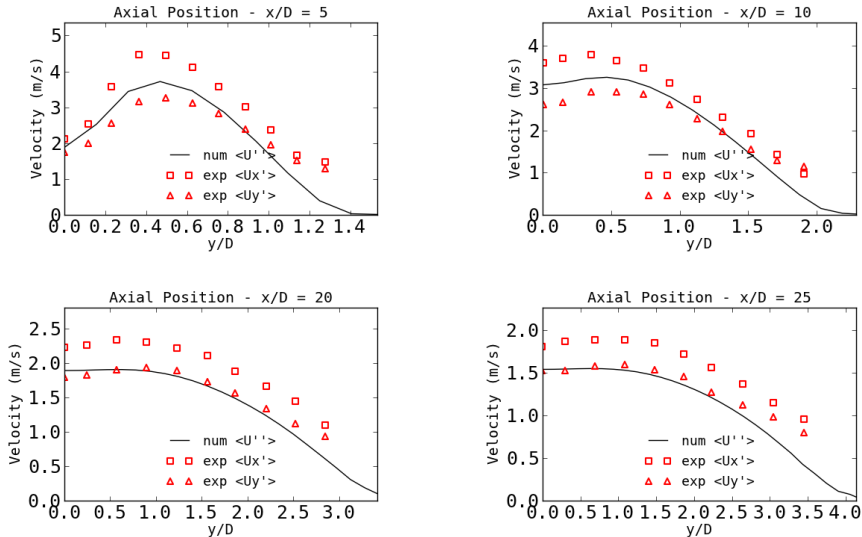


Figura: Numérico $\langle U'' \rangle$ e experimental $\langle U_x'' \rangle$ e $\langle U_y'' \rangle$ (Chen et al., 2006).

Velocidade das Gotas

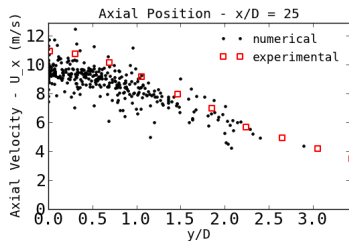
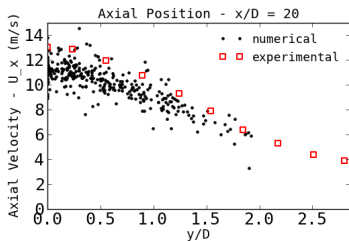
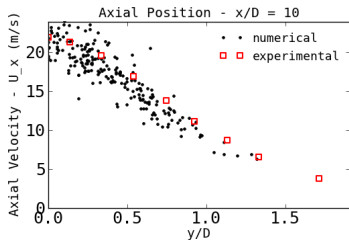
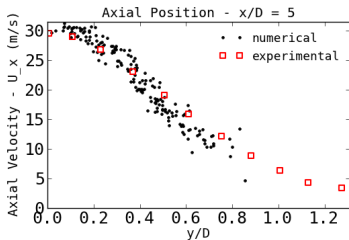


Figura: Velocidade das gotas da classe ($D \in [10, 20] \mu\text{m}$). Numérico e experimental (Chen et al., 2006).

Vazão Mássica de Líquido

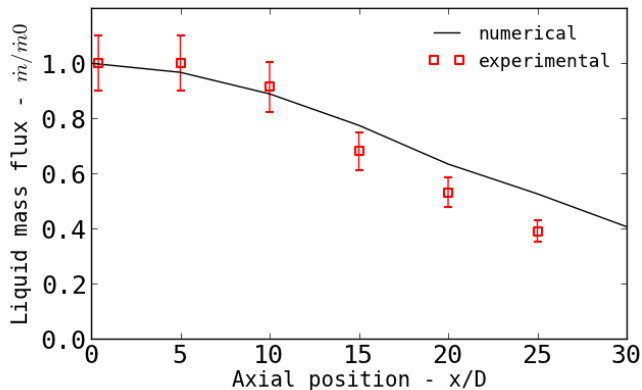


Figura: Vazão de massa na fase líquida. Numérico e experimental (Chen et al., 2006).

Fluxo Mássico de Vapor

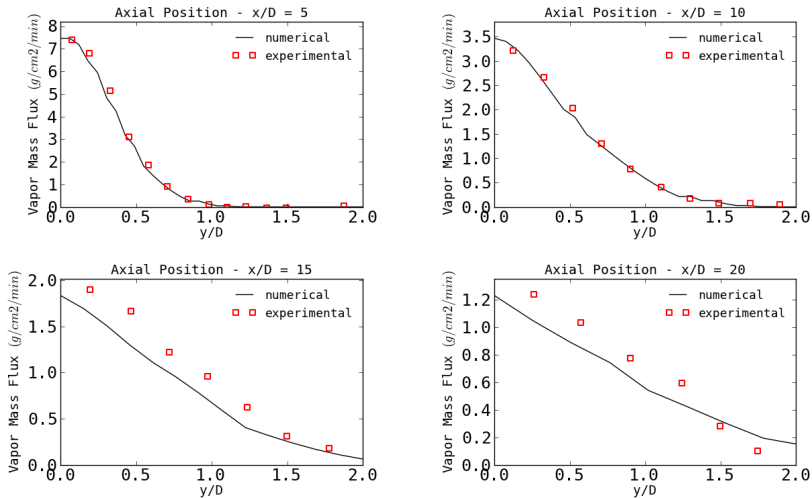


Figura: Fluxo mássico de vapor: $\dot{m}''_{ac} = \rho \bar{Y}_{ac} \tilde{U}_x$. Numérico e experimental (Chen et al., 2006).

Diâmetro de Sauter

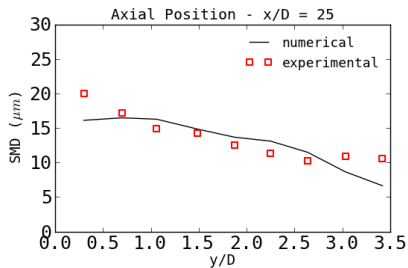
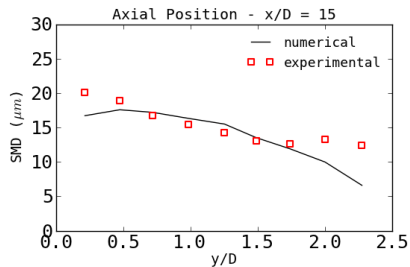
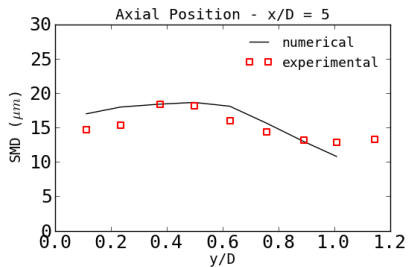
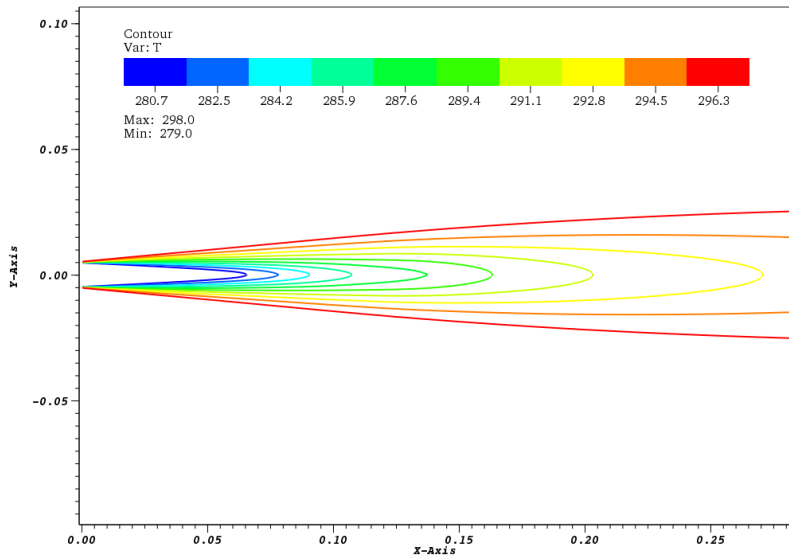
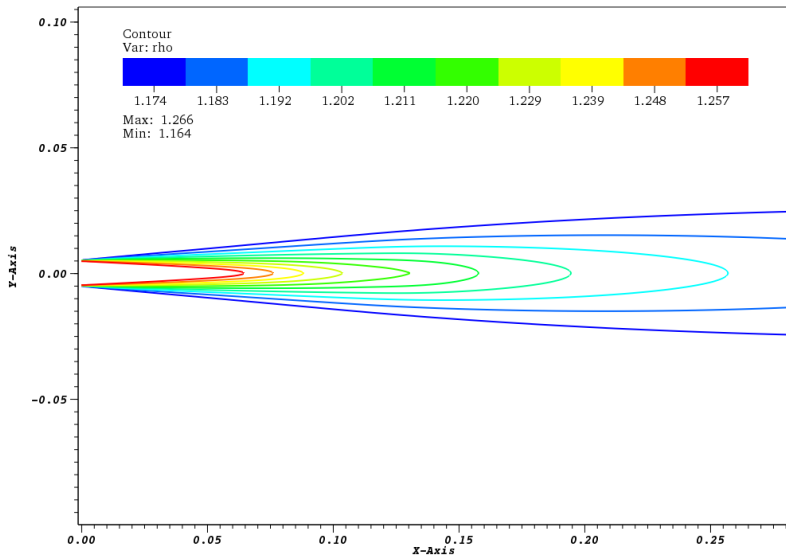


Figura: Diâmetro de Sauter (SMD). Numérico e experimental (Chen et al., 2006).

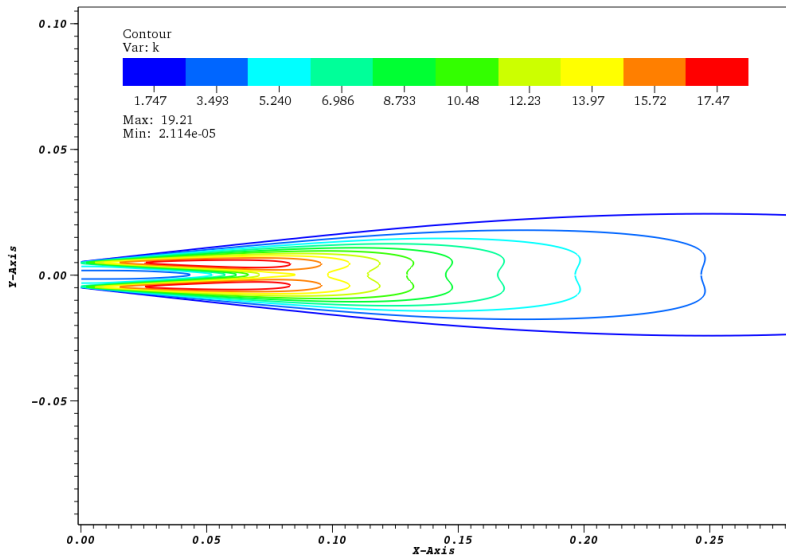
Temperatura da Fase Gasosa



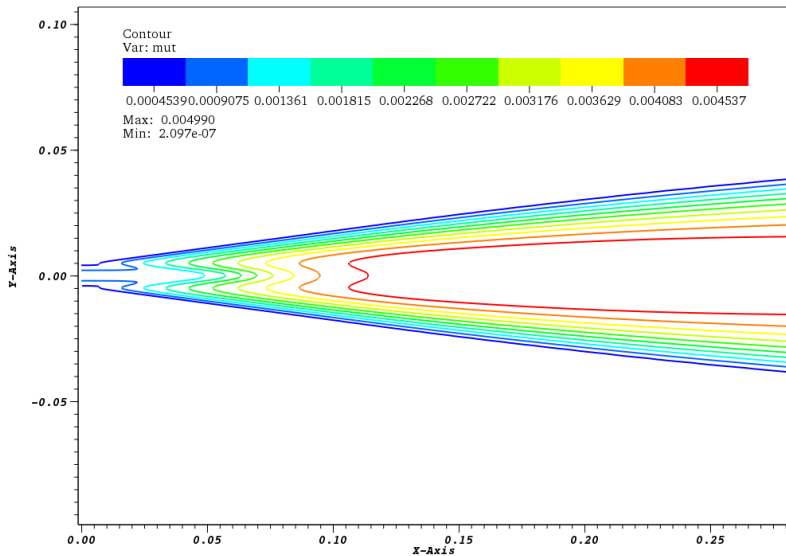
Densidade da Fase Gasosa



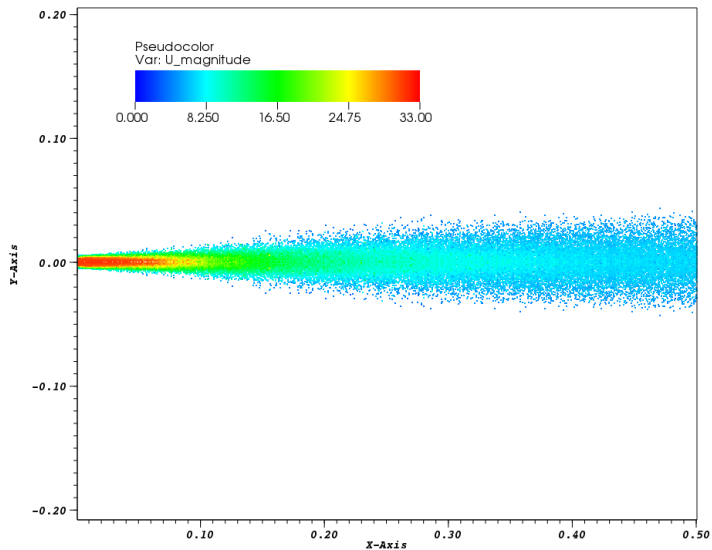
Energia Cinética Turbulenta



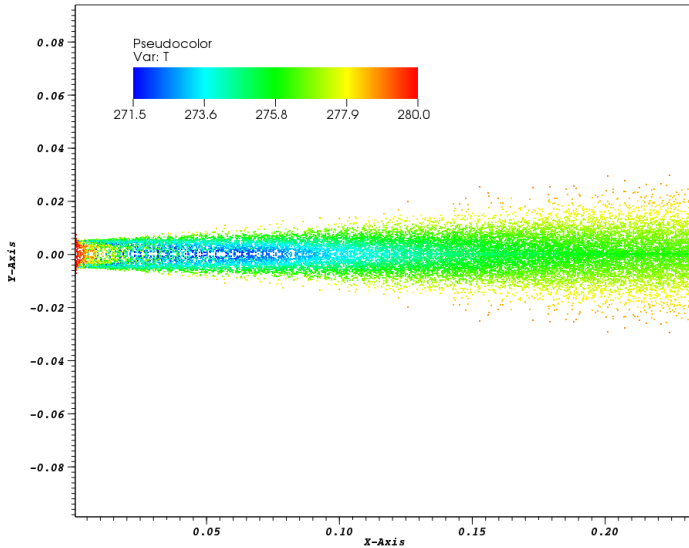
Viscosidade Turbulenta



Velocidade das Gotas



Temperatura das Gotas



Resumo

Introdução

Equações

A Fase Contínua

A Fase Dispersa

Cálculo Numérico

Resultados

O Jato Turbulento

Velocidade das Fases

Vazão Mássica das Gotas e do Vapor

Conclusões

Introdução

Equações

A Fase Contínua

A Fase Dispersa

Cálculo Numérico

Resultados

O Jato Turbulento

Velocidade das Fases

Vazão Mássica das Gotas e do Vapor

Conclusões

Formulação

- ▶ $M \rightarrow 0 \implies$ métodos numéricos para escoamento incompressível;
- ▶ O método Euleriano-Lagrangiano é uma *boa* descrição computacional para a fase dispersa.

Numérico × Experimental:

- ▶ $\tilde{\mathbf{U}}$, \mathbf{U}_d e \dot{m}_d **sub**estimados;
- ▶ k-epsilon $\implies \mu_T$ **super**estimado.

Trabalhos Futuros:

- ▶ $\dot{h}_d, \dot{m}_d \leftarrow$ turbulência;
- ▶ $Sc, Pr \neq 1$;
- ▶ Tratar termos fontes de forma *mais implícita*.

Obrigado pela atenção.