

Grupo de pesquisa:

**CFD, propulsão e
aerodinâmica de foguetes**

(CFD/UFPR) – junho/2002

14 Jun 2013 - Pimentel

Laboratórios (136 m²):

Lena 1: alunos

Lena 2: professores

LAE: minifoguetes

Localização:

salas 7-16, 7-30 e 7-31 do DEMEC

Equipamentos principais:

computadores (192 GB, Xeon, 12 núcleos)

impressoras laser

sensores, filmadora etc

PESQUISADORES atuais (11)

Da UFPR:

Prof. Carlos Henrique Marchi (líder)

Prof. Luciano Kiyoshi Araki

Prof. Márcio Augusto Villela Pinto

De outras instituições:

UEPG = 3

UTFPR = 2

UFRN = 1

IFPR = 1

UP = 1

ORIENTANDOS em mar/13 na UFPR (21)

IC = 9

TG = 0

M = 6

D = 6

PD = 0

outros = 0

ORIENTAÇÕES concluídas até mar/13 na UFPR (40)

IC = 5

TG = 14

M = 10

D = 11

PD = 0

outros = 0

Linhas de pesquisa

- Aplicação de métodos numéricos
- Otimização de métodos numéricos
- Verificação e validação de soluções numéricas

Modelos matemáticos

Equações (1D/2D/3D/t):

Laplace

Poisson

Fourier

Advecção-difusão

Burgers

Euler

Navier-Stokes

Turbulência

Metodologia

Métodos numéricos:

Diferenças finitas

Volumes Finitos

Ordem das aproximações numéricas: 1, 2, 3 e 4

Tipos de malhas:

Uniformes e não-uniformes

Quadradas e triangulares

Estruturadas e não-estruturadas

Não-ortogonais

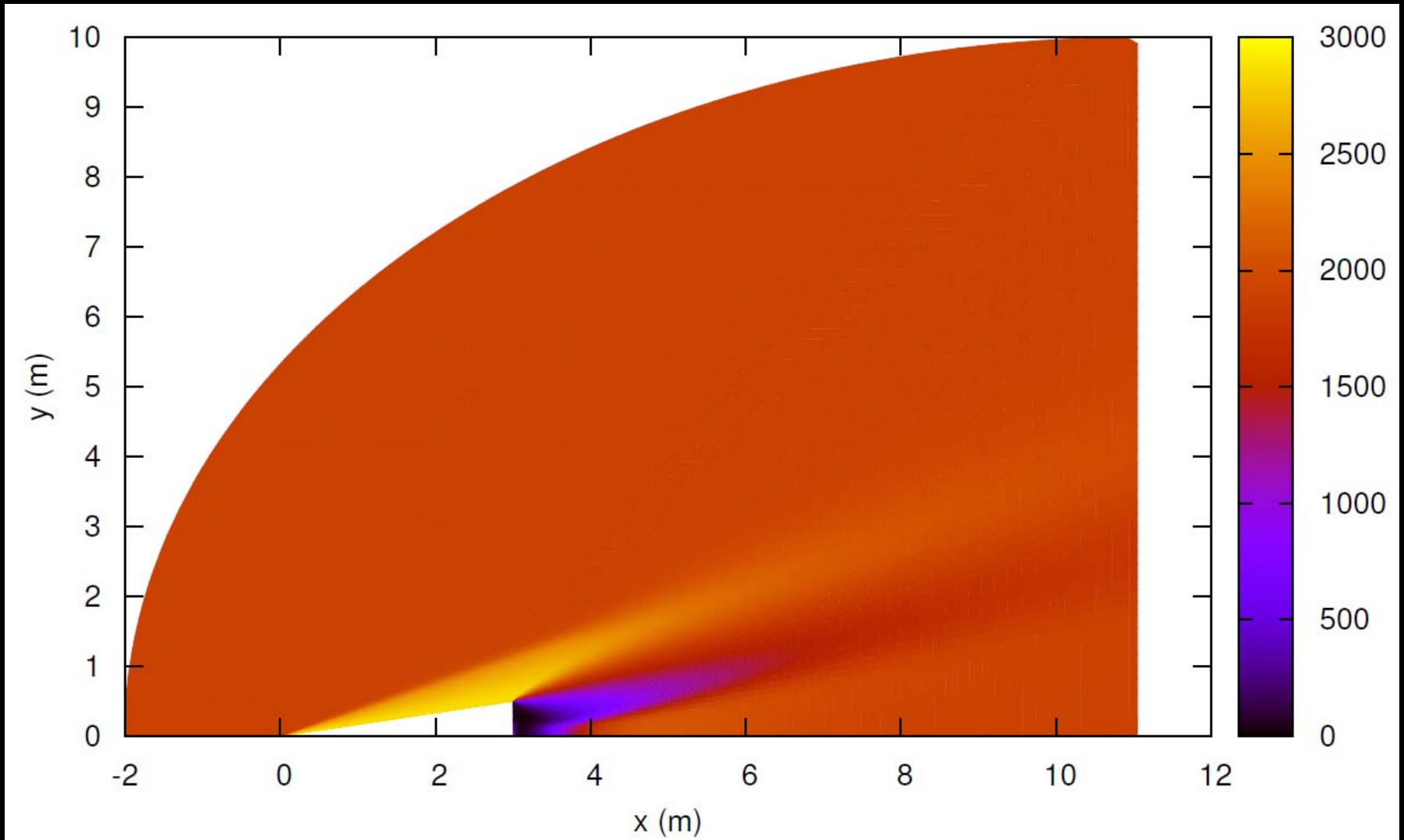
Solvers: GS, TDMA, ADI e MSI com *multigrid*

Linguagem de programação: Fortran 90

Aplicação de métodos numéricos

- Propulsão de foguetes
- Aerodinâmica de foguetes

Ar sobre cone (L/D = 3): campo p



Ar sobre cone ($L/D = 3$): C_{Df}

M	Re	Exp	Mach2D
3	$4,00 \times 10^6$	$0,084 \pm 0,003$	$0,08406 \pm 0,00007$
4	$2,16 \times 10^6$	$0,078 \pm 0,005$	$0,07779 \pm 0,00009$
5	$1,05 \times 10^6$	$0,076 \pm 0,005$	$0,07556 \pm 0,00009$



O foguete brasileiro VLS

Ar sobre o foguete VLS

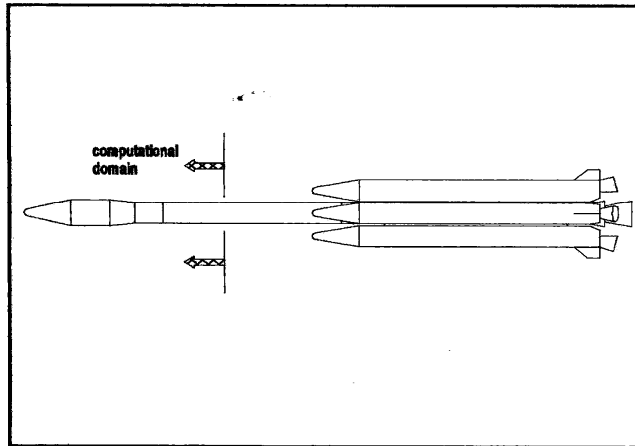


Fig. 1 Configuração completa do foguete VLS.

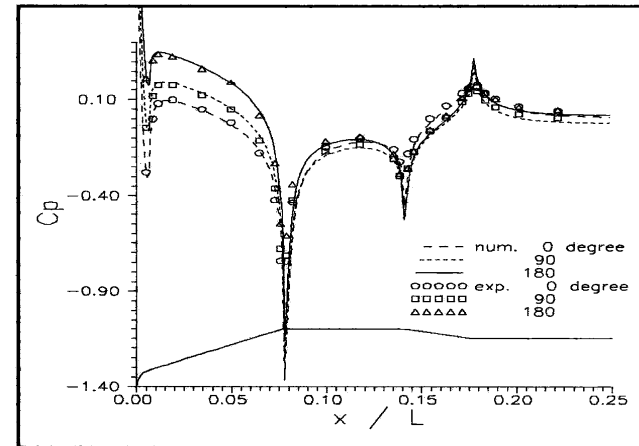


Fig. 2 C_p para $M_\infty = 0,50$ e $\alpha = 6,0^\circ$.

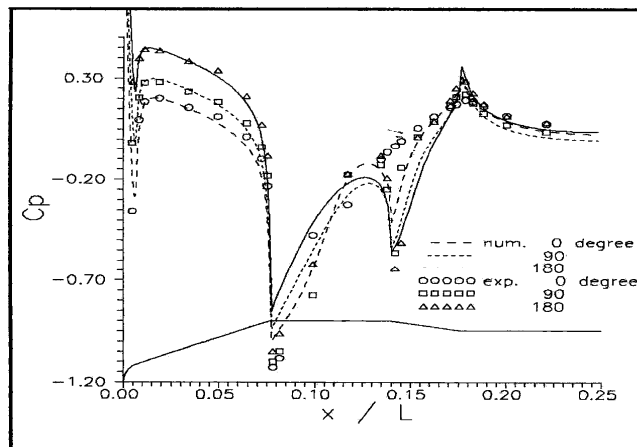


Fig. 3 C_p para $M_\infty = 0,90$ e $\alpha = 6,0^\circ$.

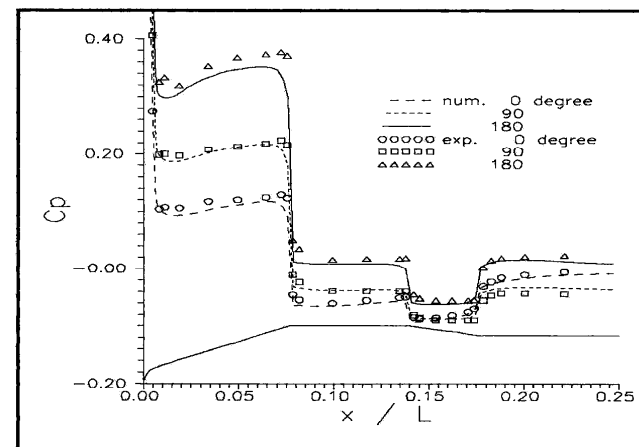
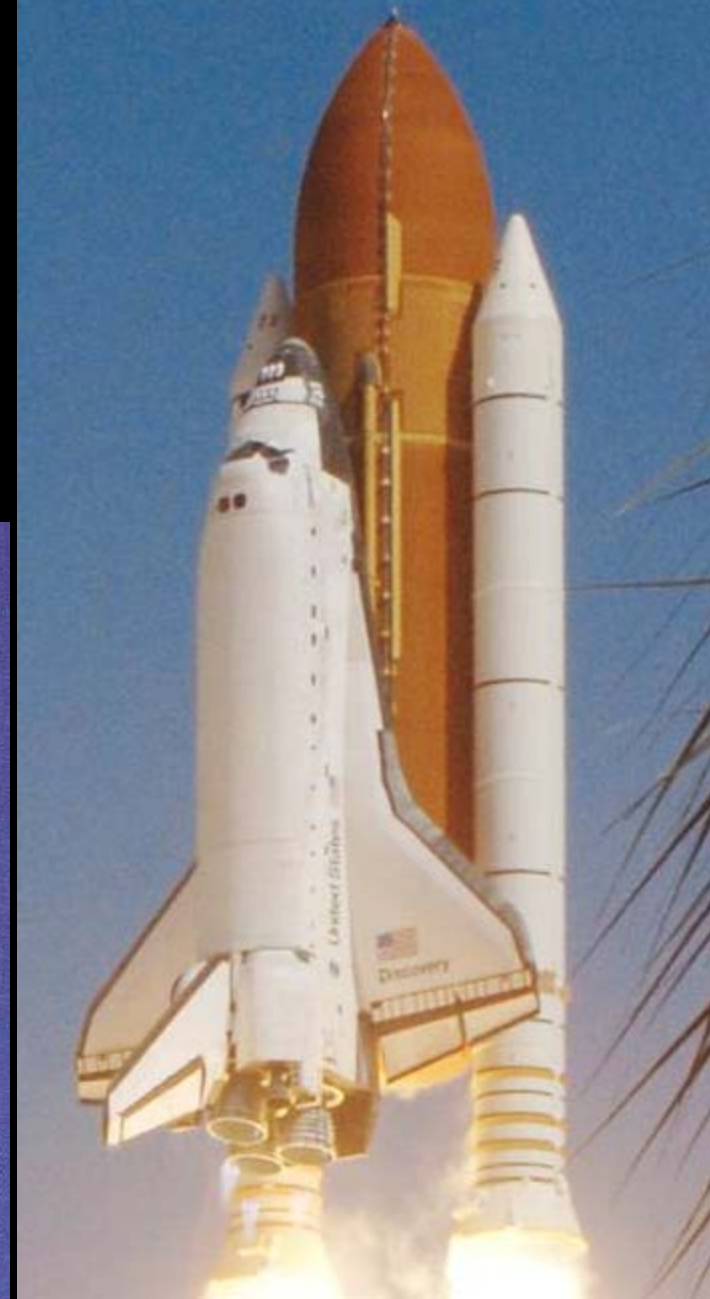
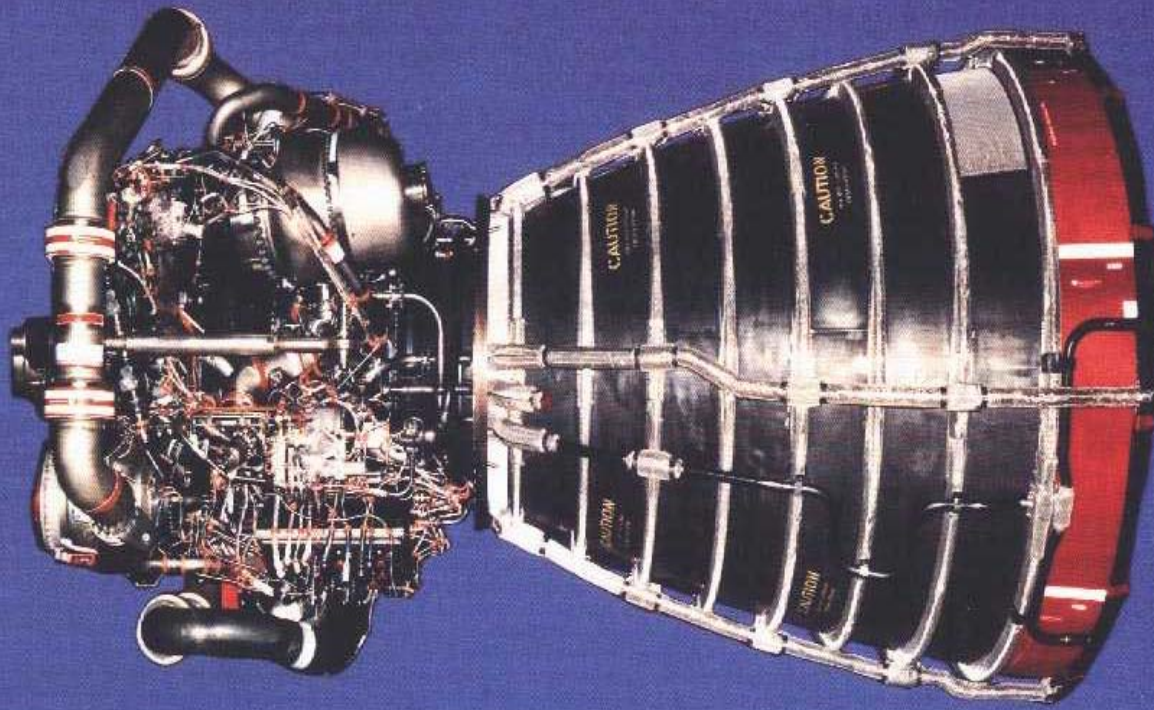
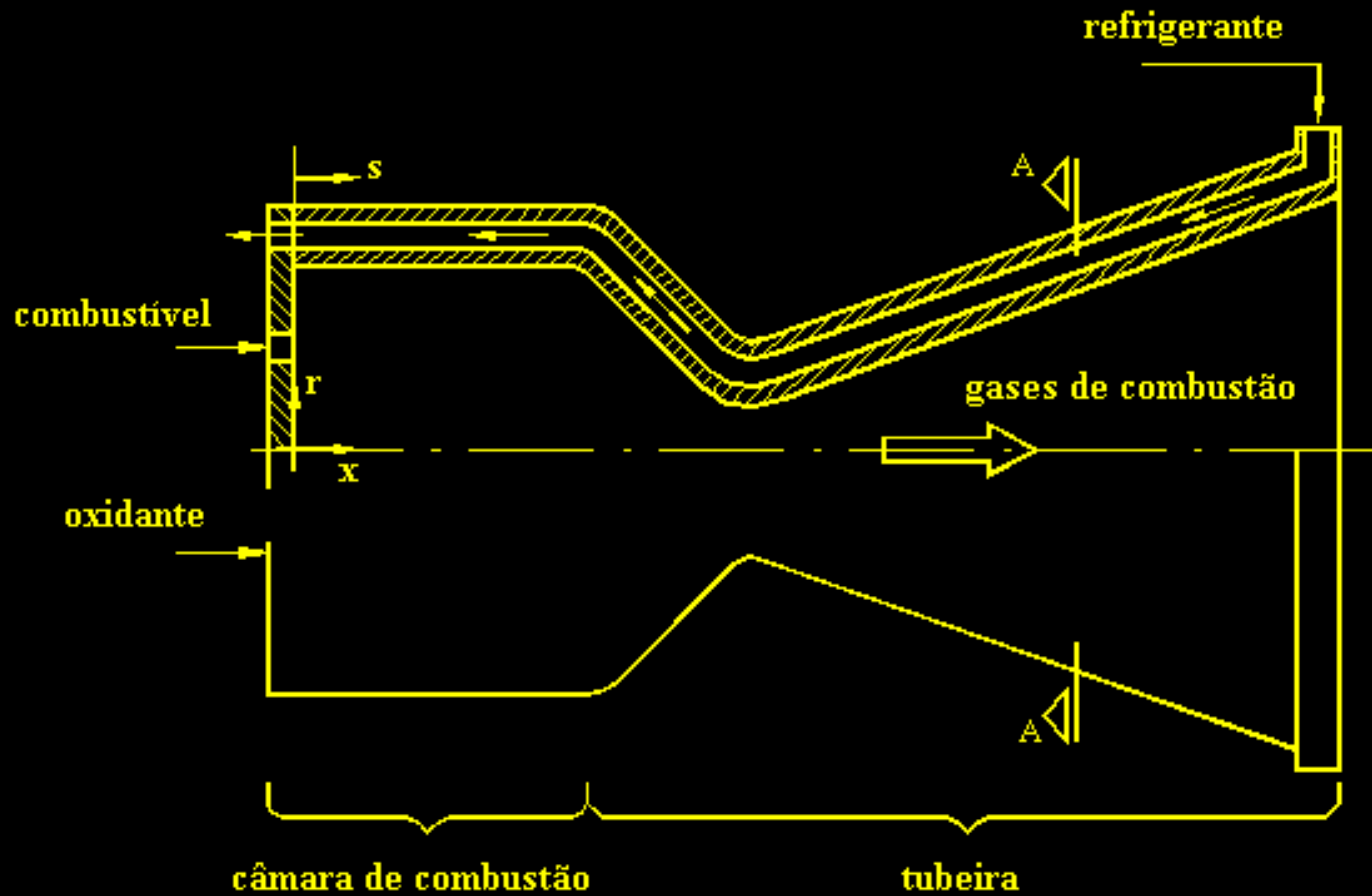


Fig. 4 C_p para $M_\infty = 3,0$ e $\alpha = 6,1^\circ$.

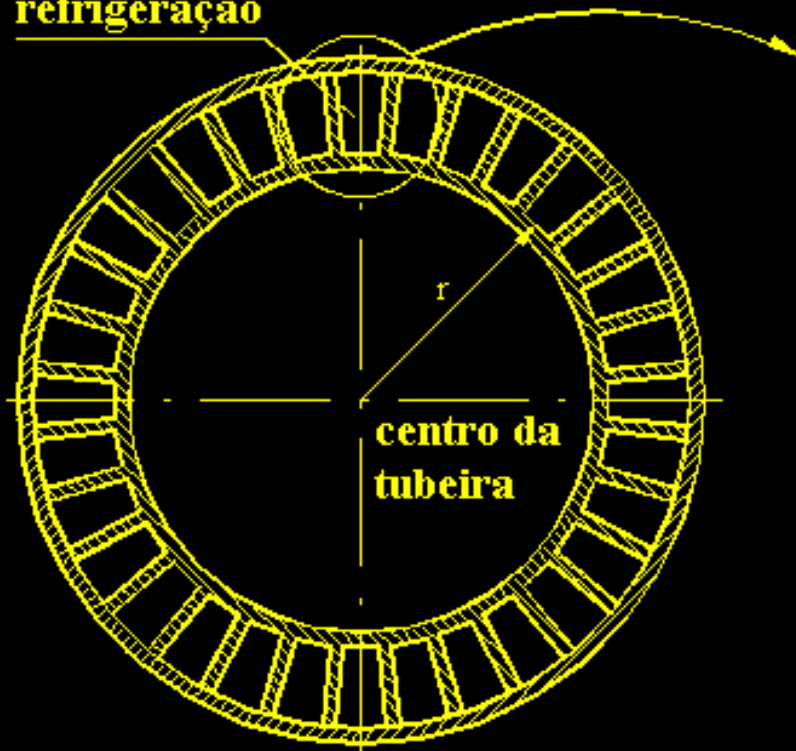
Motor-foguete SSME e Space Shuttle





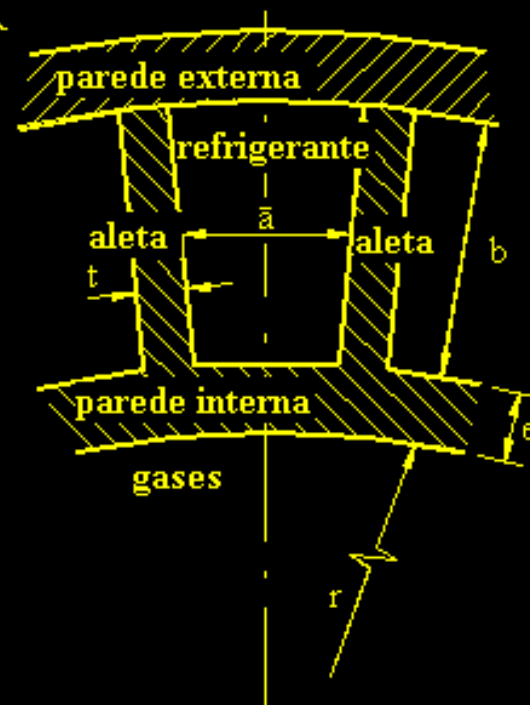
Esquema de motor-foguete bipropelente com refrigeração regenerativa

canais de
refrigeração



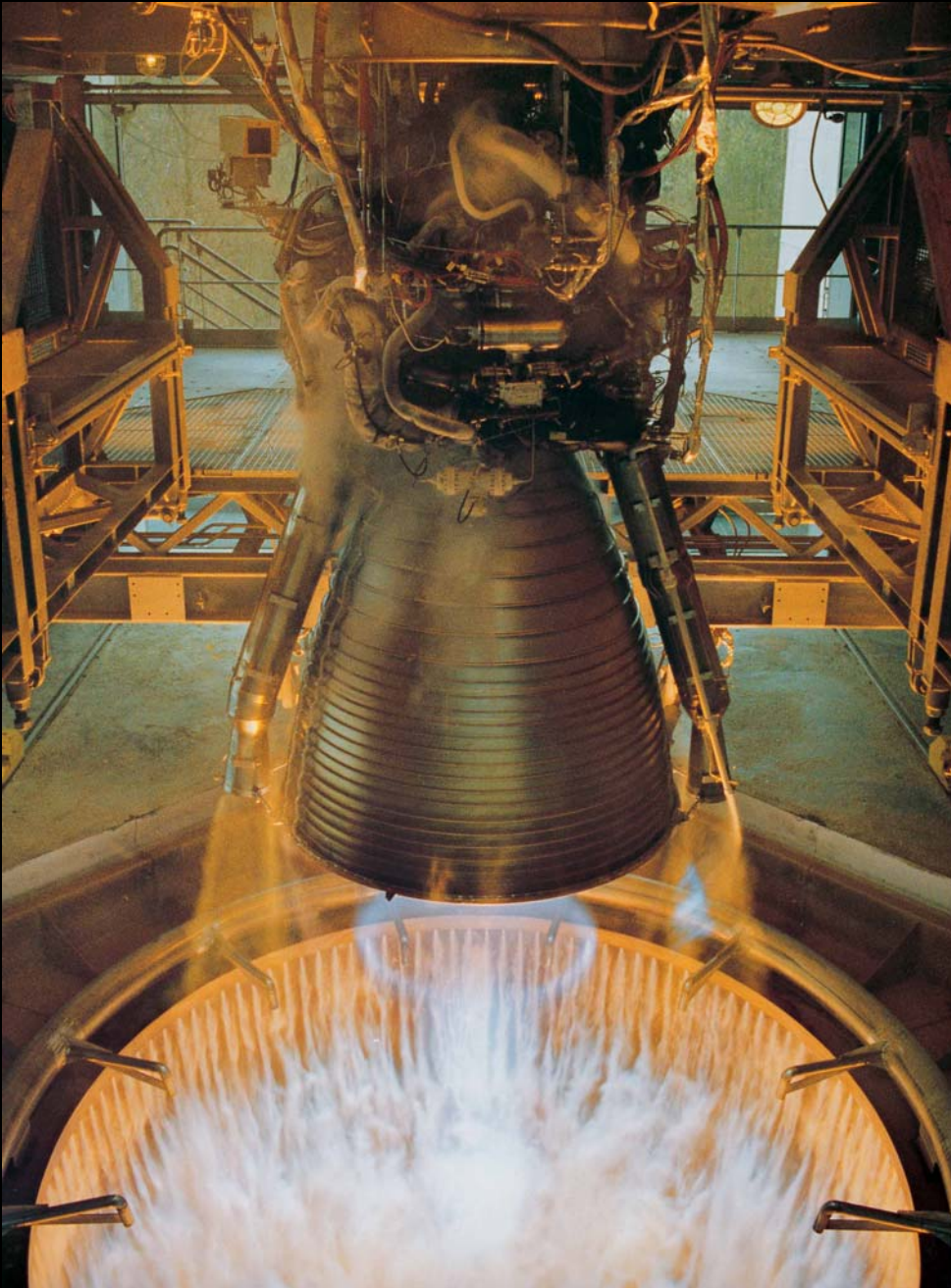
seção A-A

ambiente externo



detalhes dos canais

Detalhes dos canais de refrigeração



Motor-foguete

Vulcain do

Ariane V

Motor Vulcain (Ariane V)

- F (nível do mar) = 103 tf
- $T_w\text{-max} = 750 \text{ K}$
- $T_o = 3.500 \text{ K}$
- $P_o = 100 \text{ atm}$
- $q''_{\text{max}} = 60 \text{ MW/m}^2$
- Canais = 360
- Altura = 9,5 a 12 mm
- Largura = 1,3 a 2,6 mm

Modelos físicos para escoamento na tubeira

1: Gás com propriedades constantes

a) invíscido

2: Gás com propriedades variáveis

b) laminar

3: Gases congelados

c) turbulento

4: Gases em equilíbrio químico local

5: Gases com taxa finita de reação

Escoamento relativo 2D laminar

$$C^\phi \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} (r \rho v \phi) \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + P^\phi + S^\phi$$

Equação	ϕ	C^ϕ	Γ^ϕ	P^ϕ	S^ϕ
Massa	1	1	0	0	0
QML-x	u	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x}$	$\frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial y} (r v) \right]$
QML-y	v	1	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y}$	$\frac{1}{3r} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{4}{3} f \frac{u}{r^2} v - \frac{2}{3r} f v \frac{\partial \mu}{\partial y}$
Energia	T	c_p	k	$\frac{\partial p}{\partial t} - uP^u - vP^v$	$2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + f \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + f \frac{v}{r} \right)^2 + S_{eq/1f}$
Espécies	Y_i	1	0	0	\dot{w}_i

Escoamento reativo 2D laminar

Equilíbrio químico local

$$S_{eq/tf} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_{i=1}^{N_e} \rho h_i Y_i u \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{i=1}^{N_e} r \rho h_i Y_i v \right)$$

Taxa finita:

$$S_{eq/tf} = -\sum_{i=1}^{N_e} h_i \dot{w}_i$$

$$p = \sum_{i=1}^{N_e} p_i$$

$$c_p = \sum_{i=1}^{N_e} Y_i (c_p)_i$$

$$R = \sum_{i=1}^{N_e} Y_i R_i$$

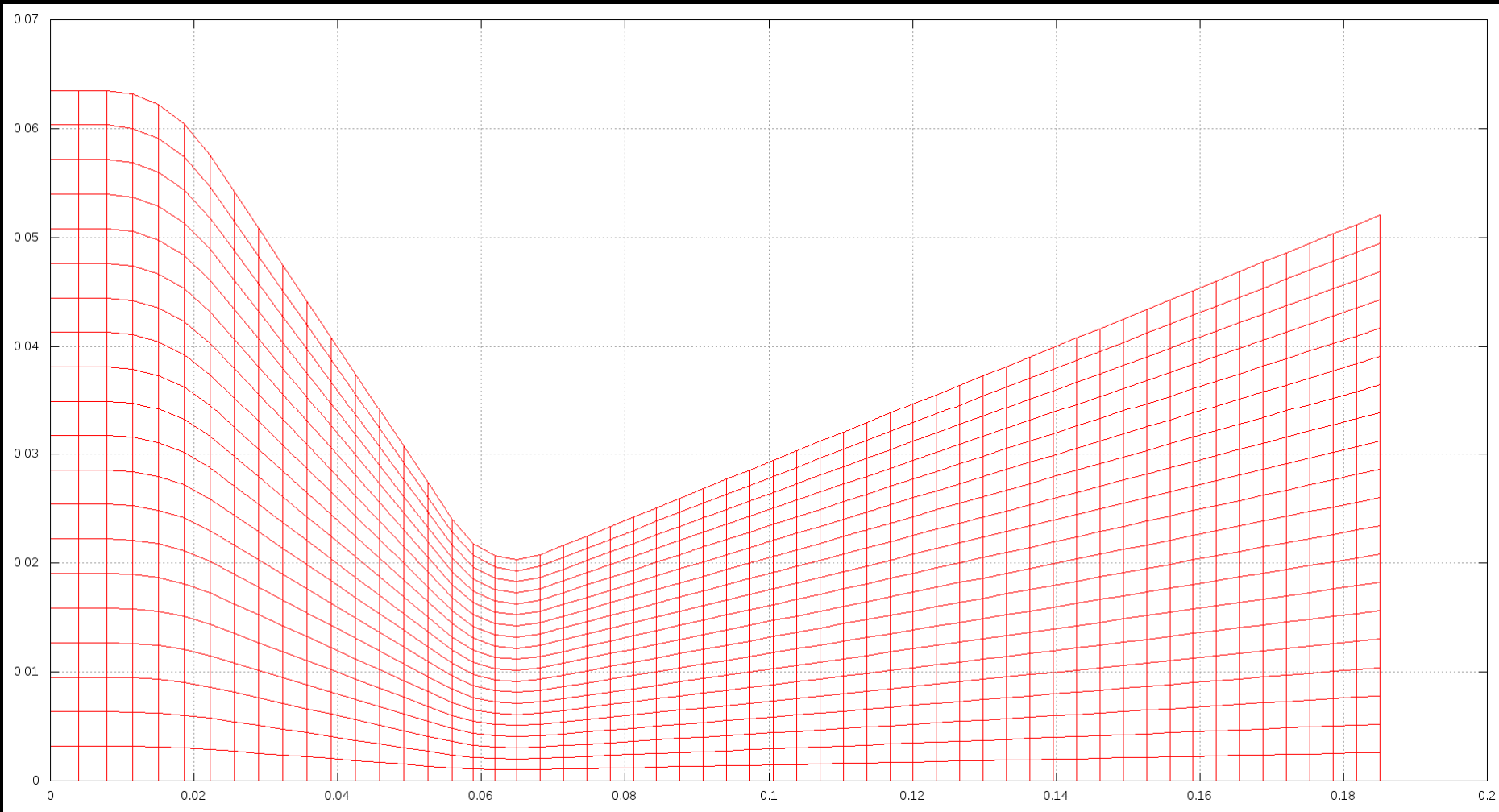
$$p = \rho R T$$

Modelos químicos para H_2/O_2

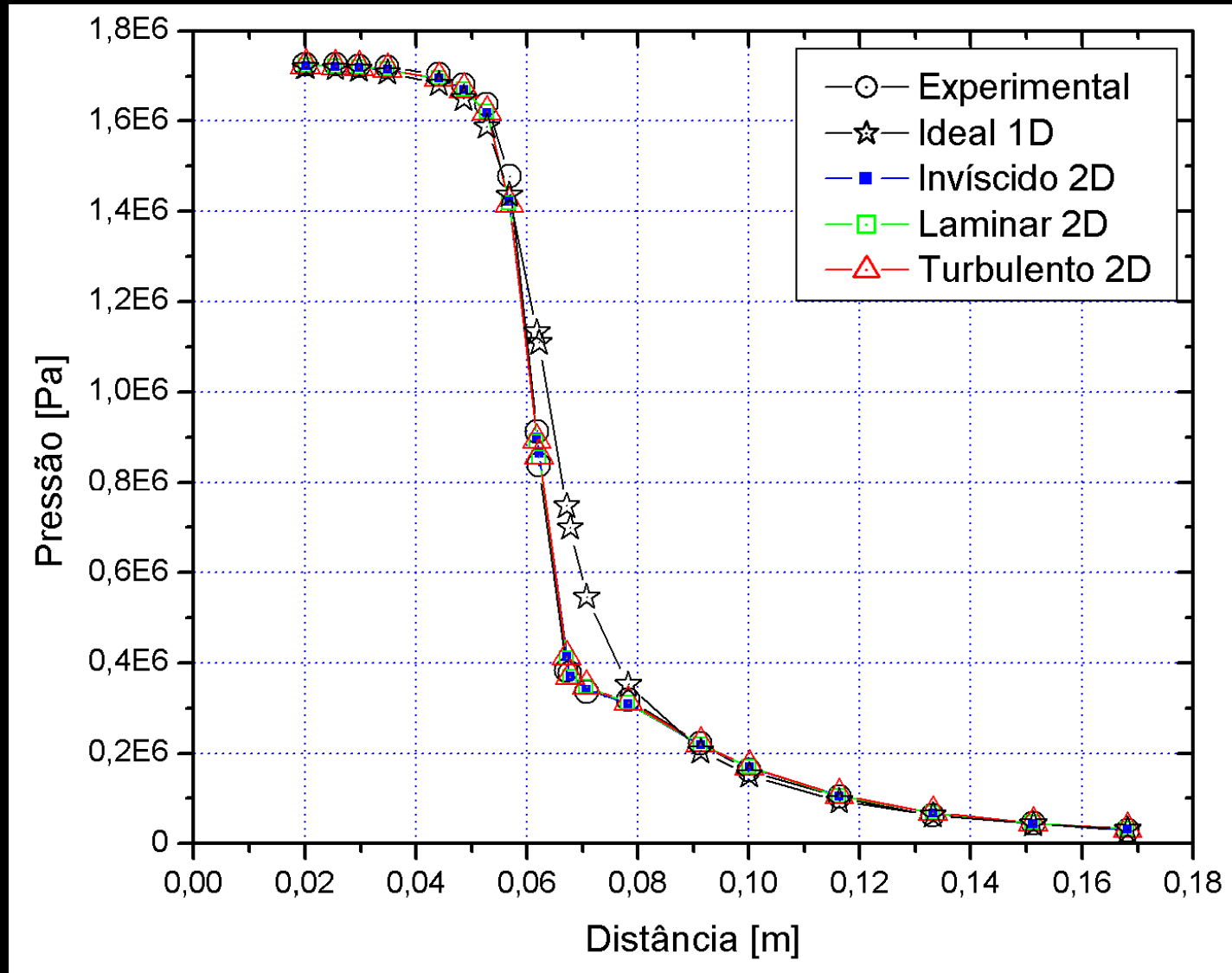
9 equilíbrio e 6 taxa finita

Modelo	Número de reações	Número de espécies	Espécies envolvidas
0	0	3	H_2O , O_2 , H_2
1	1	3	H_2O , O_2 , H_2
2	2	4	H_2O , O_2 , H_2 , OH
3	4	6	H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H
4	4	6	H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H
5	8	6	H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H
7	8	6	H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H
10	6	8	H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H , HO_2 , H_2O_2
9	18	8	H_2O , O_2 , H_2 , OH , O , H , HO_2 , H_2O_2

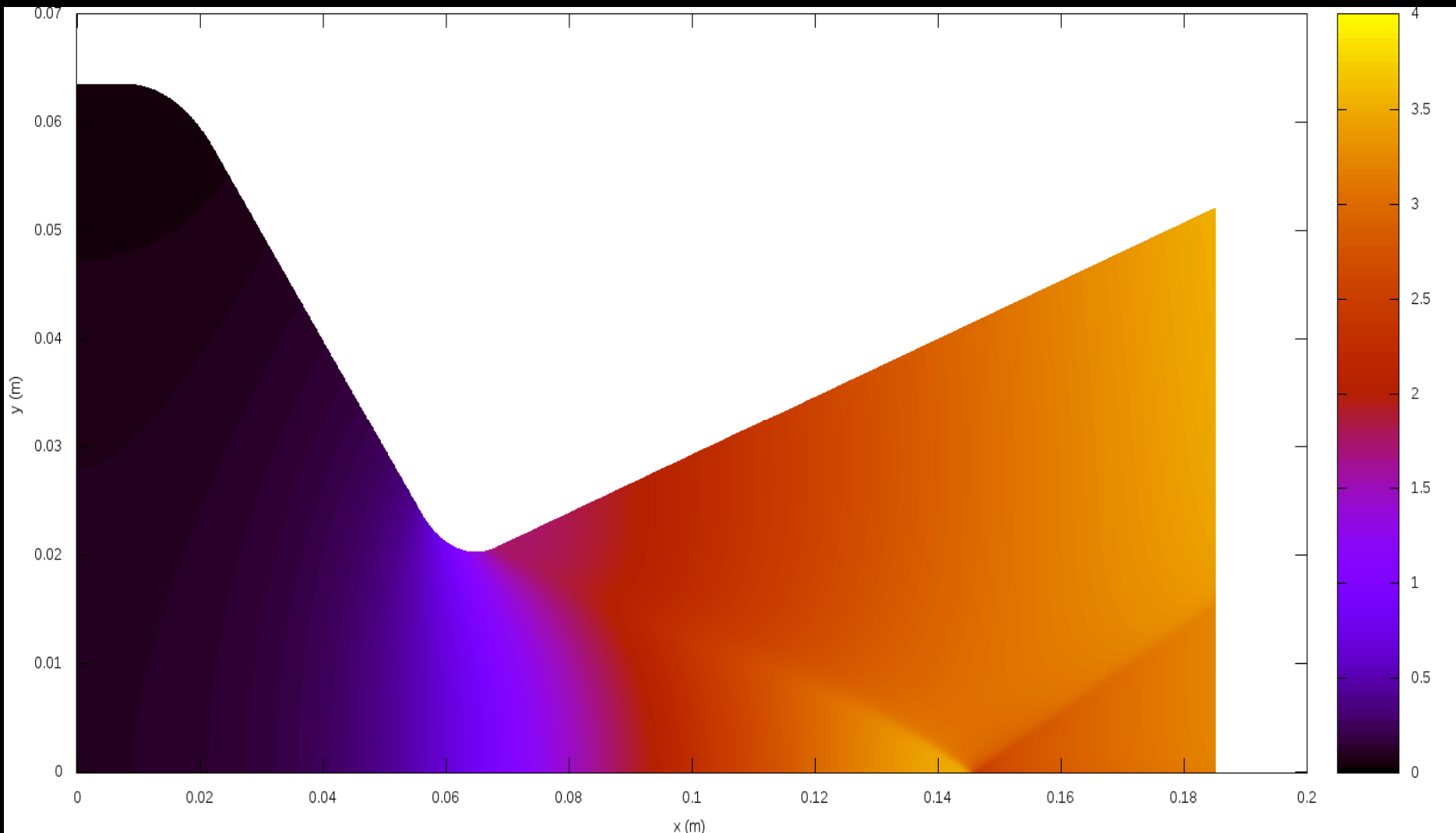
Malha 56x20, Mach2D, invíscido



Mach2D, 224x80/200, p parede



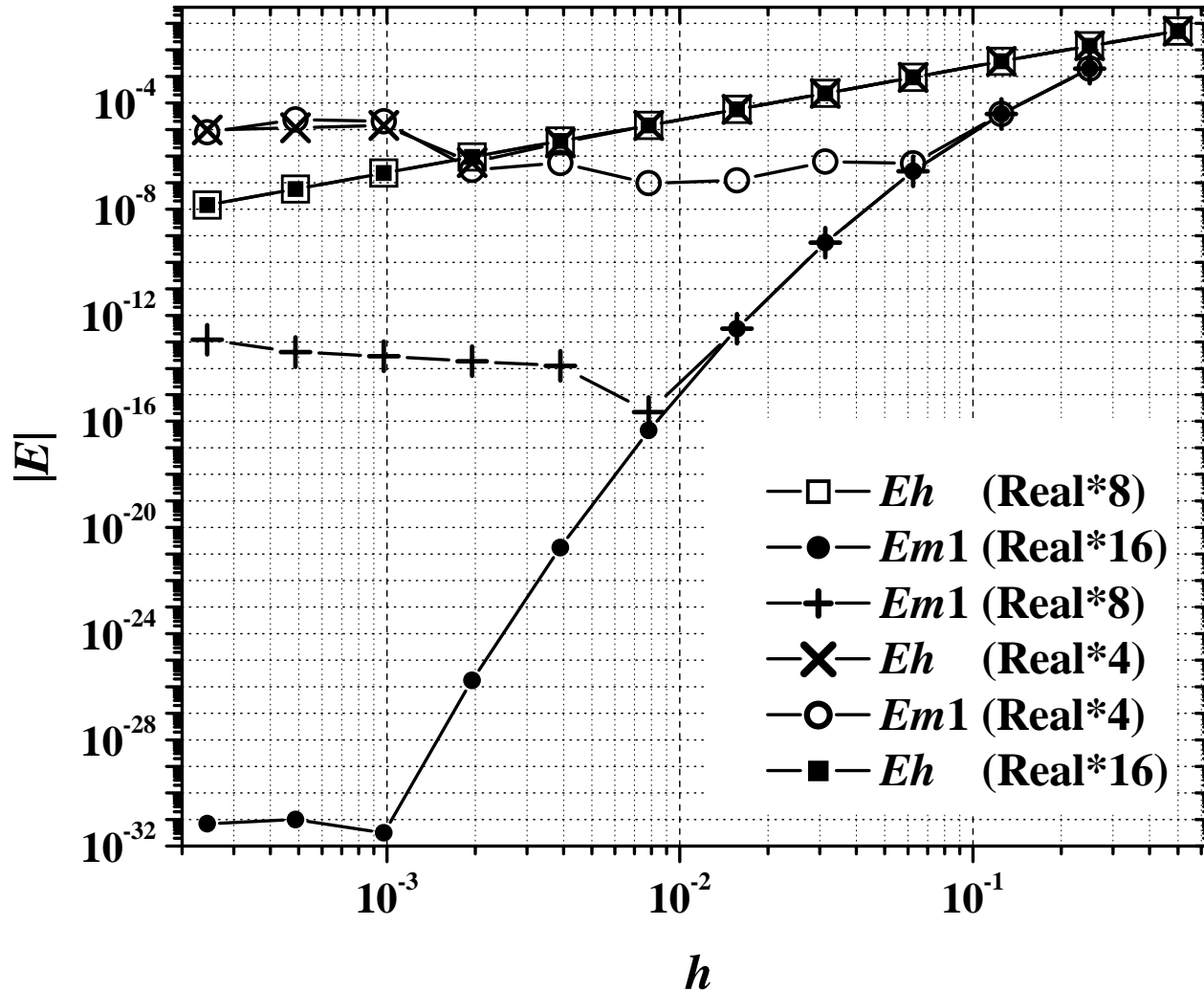
Mach, invíscido, 1792x640, Mach2D



Otimização de métodos numéricos

- Métodos *multigrid* geométricos e algébricos
- Aproximações numéricas
- Multiextrapolação de Richardson
- Programação //, *solvers* etc

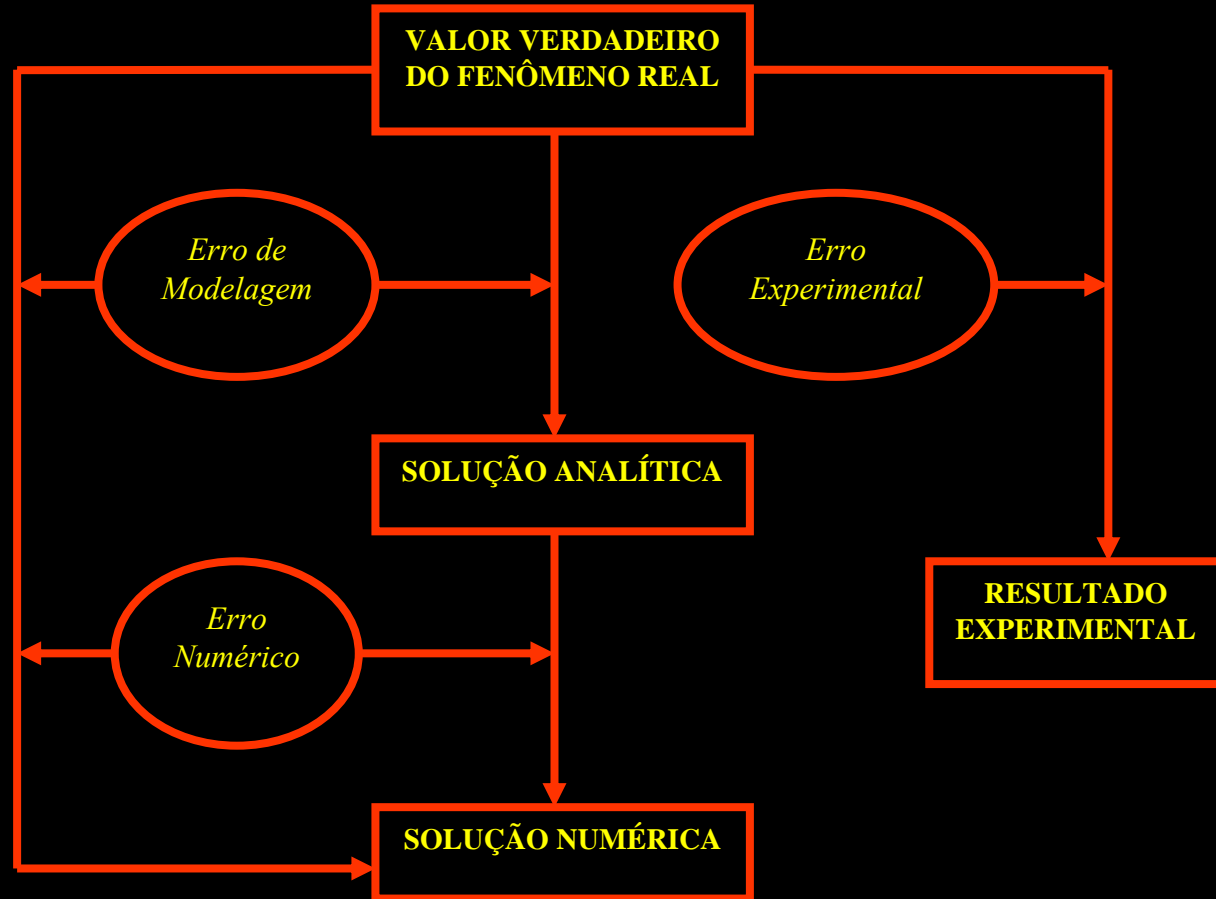
MER em Tc, Laplace 2D, DF



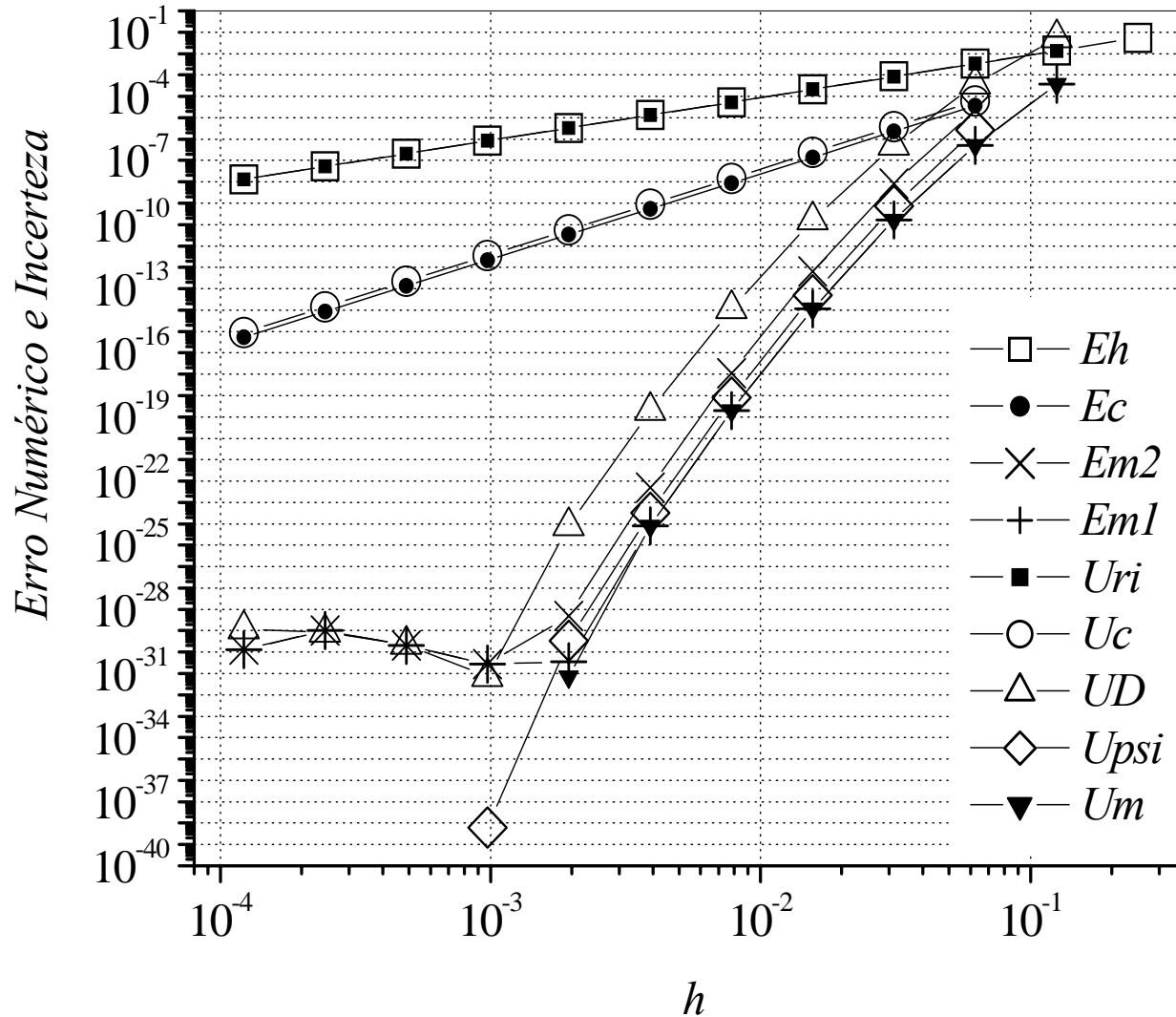
Verificação e validação de soluções numéricas

- Verificar códigos e soluções numéricas
- Validar soluções numéricas
- Avaliar e desenvolver estimadores de erros numéricos
- Gerar resultados numéricos de referência
- Incerteza dos dados da simulação

Tipos de erros



V&V: estimador de erro para MER

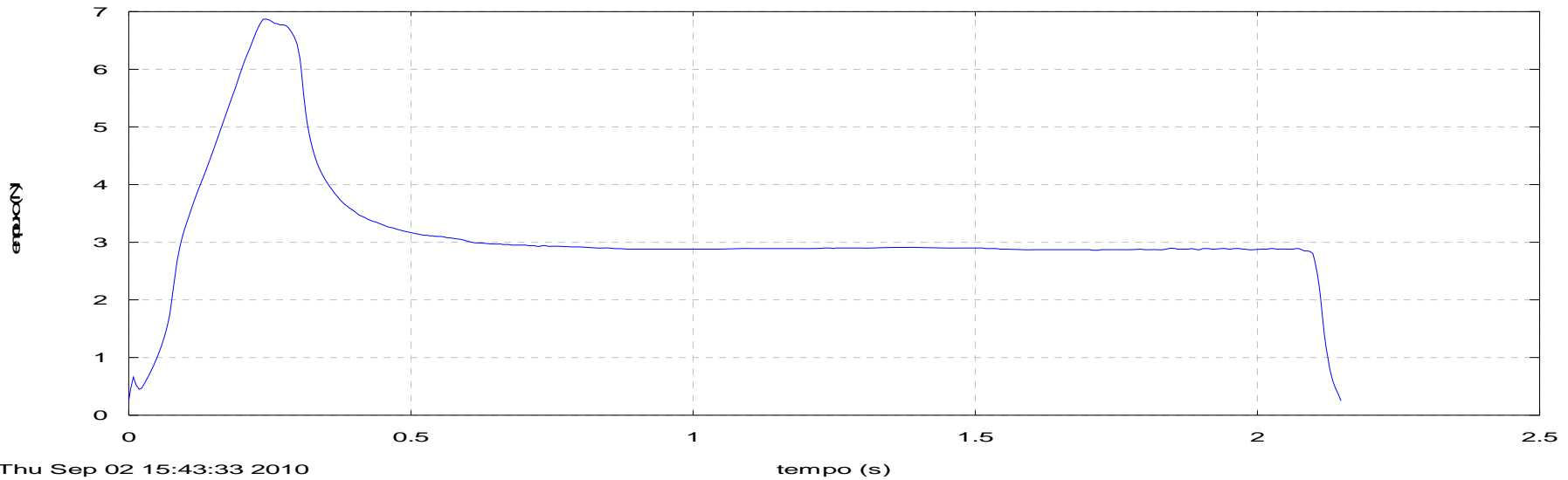


Poisson 1D, DF, T(3/4) nodal, CDS-2

Teste estático de motor de EM



Motor BT-100, TE 27 Jul 2010, Curva_empuxo 1.2



Thu Sep 02 15:43:33 2010

Lançamento EM α -17/C6-5 (23/06/2011)



Agradecimentos (financiadores):

AEB

PG-MEC

CNPq

PPGMNE

CAPES

DEMEC

FA

UFPR

Projeto CFD-19/CAPES

Validação em propulsão e aerodinâmica de foguetes

Parte experimental

UnB

ITA

INPE

IAE

Outros

Parte teórica

UFPR

Outros

Empresas

Acrux

Bandeirante

Edge of Space

Código computacional VonBraun atual

- Mach2D 7.0: escoamento 2D plano/axis., monoespécie, turbulento 0 eq., sem reação, //, G-NO, $\forall V$, VF, p=1-2
- Mach2D 6.2: 7.0 laminar e reativo
- Gibbs 1.3: reação H₂/O₂
- RHG 1.0: condução na parede e refrigeração regenerativa e radiativa
- Richardson 4.0: Uh, Umc, Tc, Uc, Tm e Um
- Interp1D: interpolação 1D, p=1-10, G-U, para MER
- Interp2D: interpolação 2D, p=1-6, G-U, para MER
- Flame 1.0: combustão e chama 1D
- Trajetoria 1.1/Trajeto: trajetória 1D e 2D (2 graus lib.)
- Roache: CRE e FRE (MER em campos) para DF e G-U
- Mach3D/Navier: escoamento 3D, monoespécie, invíscido e laminar, sem reação, p=1, G-NO, $\forall V$, VF

Código computacional VonBraun

2016 e além

- Mach2D 8.0: 6.2 + 7.0, otimizado, turbulento 2 eq., radiação térmica
- Gibbs 2.0: 1.3 + ar + outros propelentes + Flame
- Nusselt: convecção 2D e 3D em canais
- Fourier: condução 2D e 3D em tubeiras
- Richardson 5.0: 4.0 + Interp1D e Interp2D para G-NU
- Thompson: gerador de malhas 2D e 3D
- Roache: CRE e FRE (MER em campos), DF/VF, G-NU
- Mach3D: versão 3D do Mach2D
- Galileu: trajetória 3D (6 graus lib.)