

# **Simulação Numérica de Escoamento Reativo em Motor-Foguete com Refrigeração Regenerativa**

**Carlos Henrique Marchi (UFPR, gerente do projeto)**

**Luciano Kiyoshi Araki (UFPR)**

**Márcio Augusto Villela Pinto (UEPG)**

**Cosmo Damião Santiago (UNIBRASIL)**

**Fábio Alencar Schneider (UNICENP)**

**Thiago Fabricius Konopka (UFPR)**

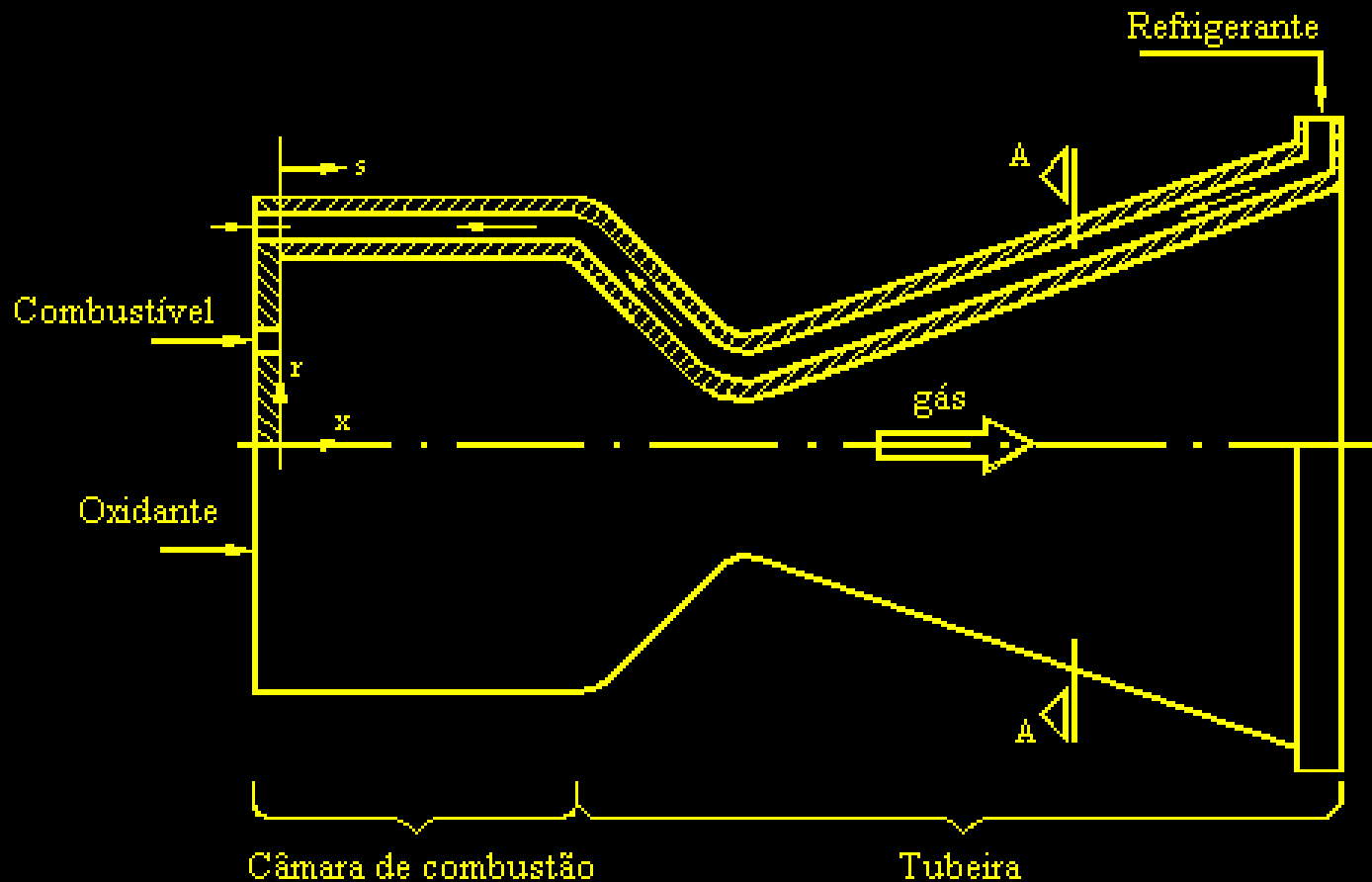
# Objetivos

- Implementação de códigos computacionais para solução de escoamento reativo em motores-foguete operando com o sistema  $H_2/O_2$ .
- Obtenção de soluções numéricas de referência (*benchmarks*), com as respectivas estimativas do erro numérico.

# Problema

Divisão do problema em três partes:

- Câmara-Tubeira: escoamento reativo, turbulento de gases na câmara e tubeira.
- Parede: condução de calor através da parede entre os gases de combustão e o fluido refrigerante.
- Canais: escoamento turbulento do fluido refrigerante nos canais em torno da tubeira.



**Figura 1: Motor-foguete bipropelente com refrigeração regenerativa.**

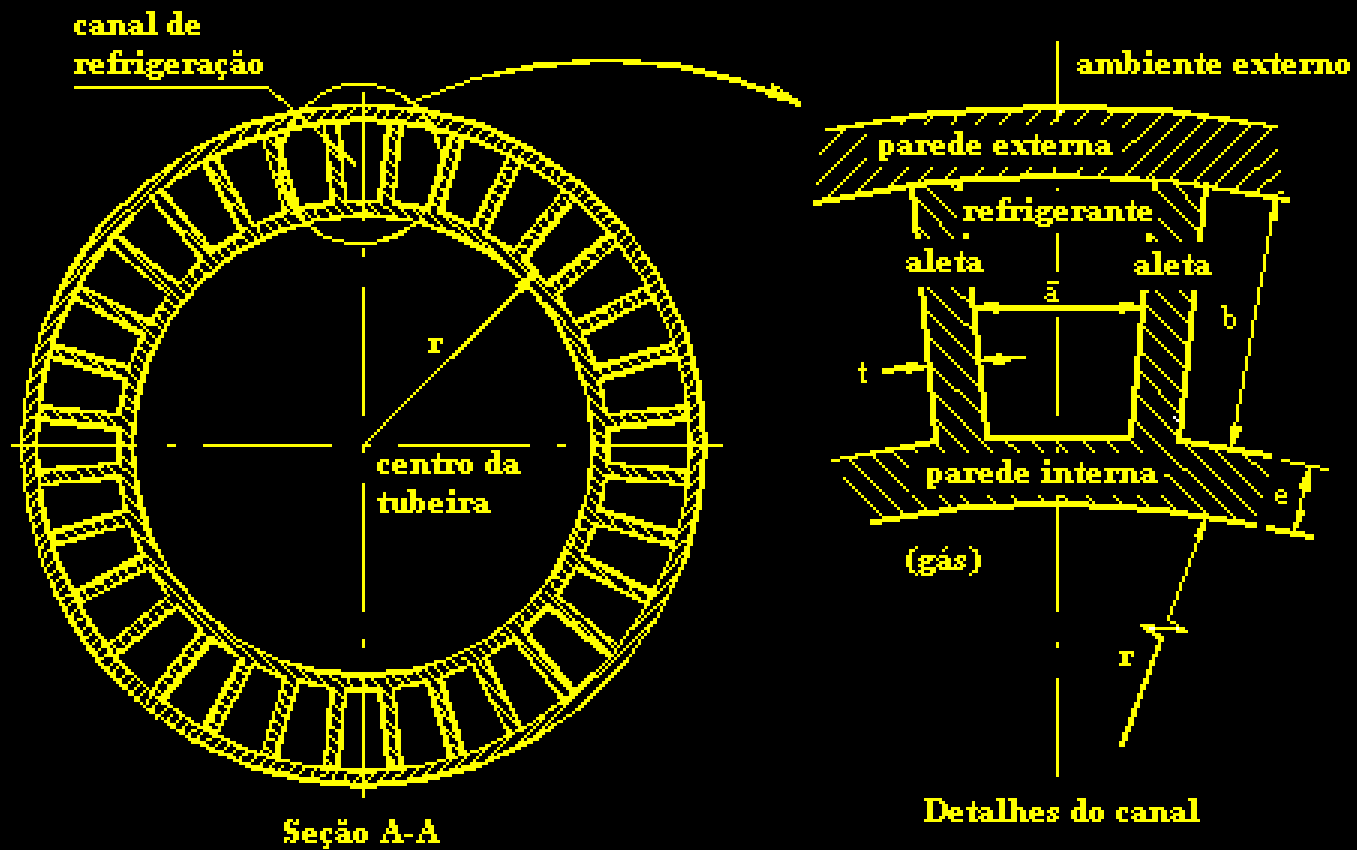


Figura 2: Detalhes dos canais de refrigeração.

# Etapas

- 1: Reações químicas (Gibbs).
- 2: Escoamento unidimensional reativo sem refrigeração (Mach1D).
- 3: Escoamento unidimensional reativo com refrigeração regenerativa (RHG).
- 4: Escoamento bidimensional reativo sem refrigeração (Mach2D).

# Metodologia

- Método dos Volumes Finitos.
- Funções de interpolação de segunda ordem.
- Arranjo co-localizado de variáveis.
- Formulação apropriada a qualquer regime de velocidades.
- Malhas estruturadas, não-ortogonais.
- Estimativa do erro numérico com o GCI.

# Modelos físicos

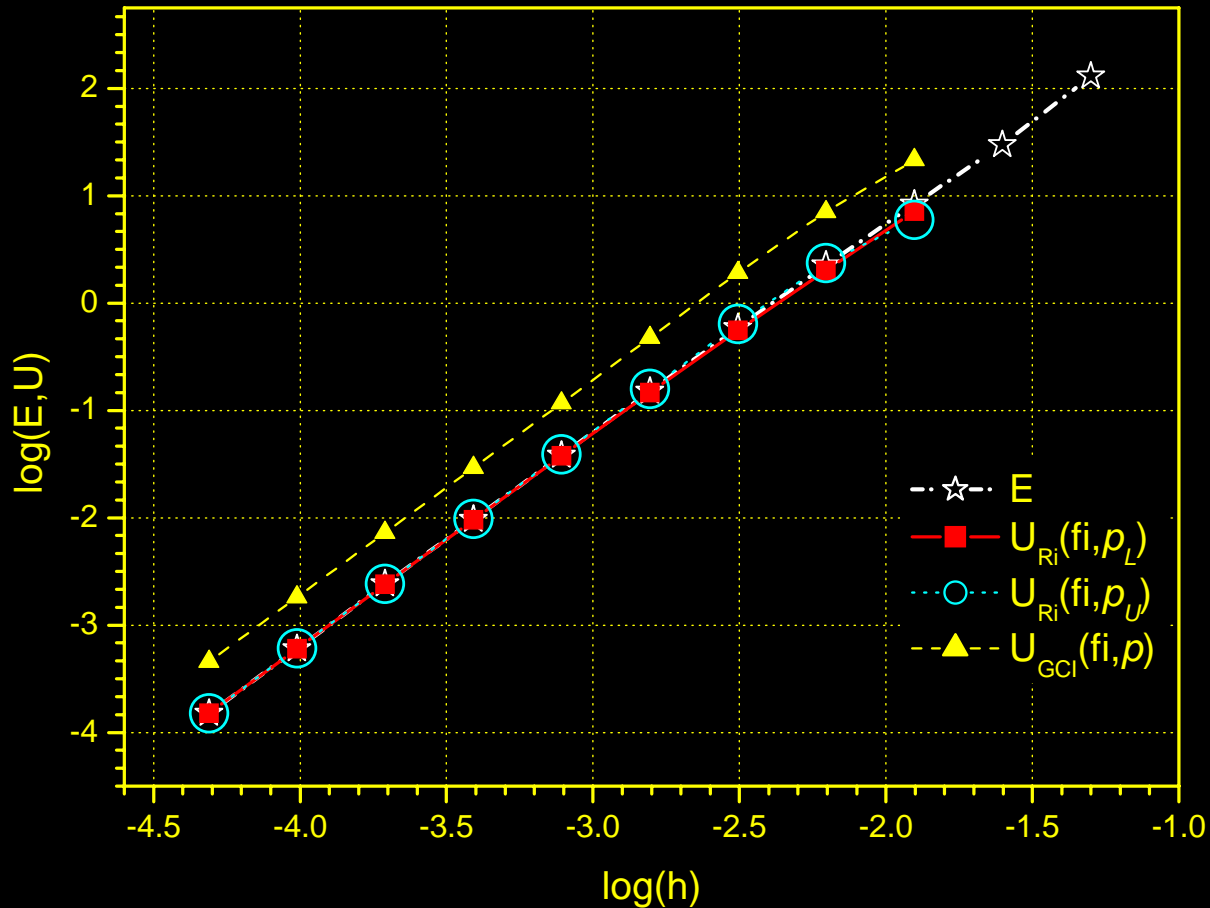
- Monogás com propriedades constantes
- Monogás com propriedades variáveis
- Escoamento congelado
- Escoamento em equilíbrio
- Escoamento com taxa finita de reação



# Modelos químicos

Modelo	Número de reações	Número de espécies	Espécies envolvidas
0	0	3	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
1	1	3	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>
2	2	4	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH
3	4	6	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH, O, H
4	4	6	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH, O, H
5	8	6	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH, O, H
7	8	6	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH, O, H
10	6	8	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH, O, H, HO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
9	18	8	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , OH, O, H, HO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>

# Resultados – Mach1D



Estimativas de erros para temperatura (mod. monogás com propriedades constantes)

# Resultados – Mach1D

<b>Modelo</b>	<b><math>C_d</math> [adim.]</b>	<b><math>F^*</math> [adim.]</b>	<b><math>P_{ex}</math> [Pa]</b>
<b>Analítico (R1)</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>29.173,42</b>
Monogás, prop. constantes (R1)	$0,999999 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$1,000000 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$29.173,3 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Monogás, prop. variáveis (R1)	$0,991754 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$1,003224 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$30.098,3 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Monogás, prop. variáveis(R2)	$1,059739 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$1,003224 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$30.098,3 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Esc. congelado – mod. 0	$1,059711 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$1,003224 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$30.098,6 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Esc. congelado – mod. 1	$1,031887 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$1,003341 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$28.915,0 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Esc. congelado – mod. 2	$1,017664 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$1,000191 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$28.201,0 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Esc. congelado – mod. 3, 4, 5 e 7	$1,001086 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$0,998998 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$27.460,1 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
Esc. congelado – mod. 9 e 10	$1,001094 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$0,998998 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$27.460,7 \pm 2 \cdot 10^{-1}$
<b>CEA (esc. congelado)</b>	<b>1,000580</b>	<b>0,998992</b>	<b>27.448</b>
Esc. em equilíbrio – mod. 0	$1,059711 \pm 3 \cdot 10^{-6}$	$1,003224 \pm 4 \cdot 10^{-6}$	$30.98,6 \pm 6 \cdot 10^{-1}$
Esc. em equilíbrio – mod. 1	$1,0190 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	$1,00884 \pm 1 \cdot 10^{-5}$	$33.610 \pm 1 \cdot 10^1$
Esc. em equilíbrio – mod. 2	$0,9986 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	$1,010751 \pm 8 \cdot 10^{-6}$	$35.290 \pm 1 \cdot 10^1$
Esc. em equilíbrio – mod. 3 e 4	$0,9782 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	$1,011582 \pm 8 \cdot 10^{-6}$	$36.160 \pm 2 \cdot 10^1$
Esc. em equilíbrio – mod. 10	$0,9782 \pm 1 \cdot 10^{-4}$	$1,011587 \pm 8 \cdot 10^{-6}$	$36.170 \pm 2 \cdot 10^1$
<b>CEA (esc. em equilíbrio)</b>	<b>0,977372</b>	<b>1,011553</b>	<b>36.178</b>
Taxa finita – mod. 31	$1,007717 \pm 2 \cdot 10^{-6}$	$1,011741 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$31.804,9 \pm 4 \cdot 10^{-1}$
Taxa finita – mod 32	$1,006824 \pm 5 \cdot 10^{-6}$	$1,012647 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$32.592,3 \pm 7 \cdot 10^{-1}$

(R1):  $R_g = 526,97 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ; (R2):  $R_g = 461,5254384083019 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Malha de 2560 volumes de controle

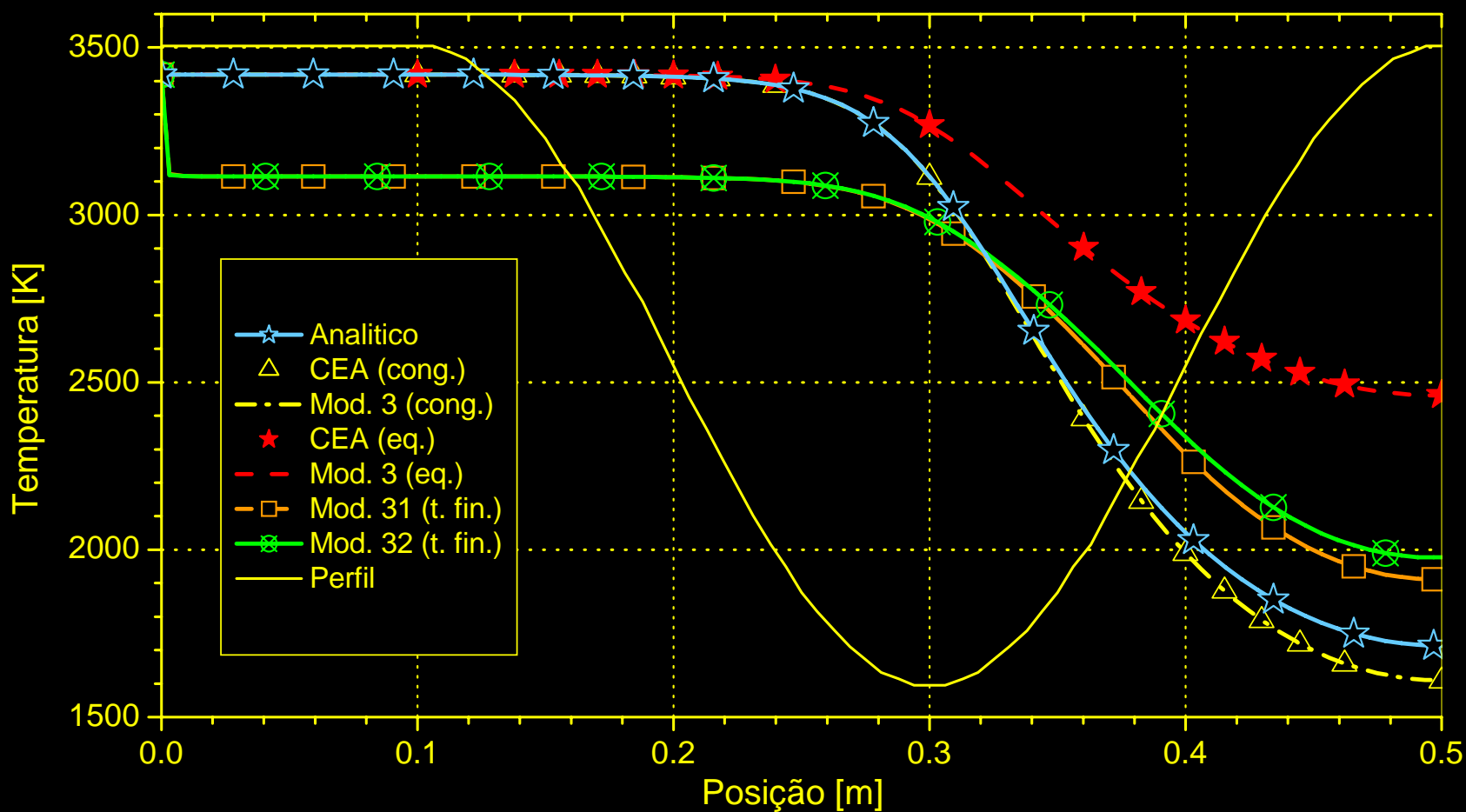
# Resultados – Mach1D

<b>Modelo</b>	<b><math>T_{ex}</math> [K]</b>	<b><math>u_{ex}</math> [m/s]</b>	<b><math>M_{ex}</math> [adim.]</b>
<b>Analítico (R1)</b>	<b>1712,7409</b>	<b>3316,7150</b>	<b>3,1928346</b>
Monogás, prop. constantes (R1)	$1712,739 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3316,717 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,19284 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Monogás, prop. variáveis (R1)	$1802,338 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3355,079 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,14424 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Monogás, prop. variáveis(R2)	$1802,338 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3139,835 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,14424 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Esc. congelado – mod. 0	$1802,450 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3139,920 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,14424 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Esc. congelado – mod. 1	$1715,090 \pm 8 \cdot 10^{-3}$	$3218,531 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,18174 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Esc. congelado – mod. 2	$1662,928 \pm 9 \cdot 10^{-3}$	$3259,770 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,20535 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Esc. congelado – mod. 3, 4, 5 e 7	$1609,141 \pm 9 \cdot 10^{-3}$	$3309,743 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,23078 \pm 1 \cdot 10^{-5}$
Esc. congelado – mod. 9 e 10	$1609,185 \pm 9 \cdot 10^{-3}$	$3309,720 \pm 7 \cdot 10^{-3}$	$3,23076 \pm 2 \cdot 10^{-5}$
<b>CEA (esc. congelado)</b>	<b>1607,91</b>	<b>3311,4519</b>	<b>3,231</b>
Esc. em equilíbrio – mod. 0	$1802,45 \pm 2 \cdot 10^{-2}$	$3139,92 \pm 2 \cdot 10^{-2}$	$3,14424 \pm 4 \cdot 10^{-5}$
Esc. em equilíbrio – mod. 1	$2169,9 \pm 3 \cdot 10^{-1}$	$3283,5 \pm 4 \cdot 10^{-1}$	$3,0009 \pm 6 \cdot 10^{-4}$
Esc. em equilíbrio – mod. 2	$2344,3 \pm 3 \cdot 10^{-1}$	$3356,9 \pm 5 \cdot 10^{-1}$	$2,9392 \pm 6 \cdot 10^{-4}$
Esc. em equilíbrio – mod. 3 e 4	$2459,8 \pm 2 \cdot 10^{-1}$	$3429,8 \pm 5 \cdot 10^{-1}$	$2,9147 \pm 6 \cdot 10^{-4}$
Esc. em equilíbrio – mod. 10	$2460,0 \pm 2 \cdot 10^{-1}$	$3429,8 \pm 5 \cdot 10^{-1}$	$2,9146 \pm 6 \cdot 10^{-4}$
<b>CEA (esc. em equilíbrio)</b>	<b>2462,41</b>	<b>3432,7056</b>	<b>2,986</b>
Taxa finita – mod. 31	$1915,20 \pm 4 \cdot 10^{-2}$	$3329,958 \pm 3 \cdot 10^{-3}$	$3,04829 \pm 2 \cdot 10^{-5}$
Taxa finita – mod 32	$1980,9 \pm 1 \cdot 10^{-1}$	$3335,89 \pm 1 \cdot 10^{-2}$	$3,01833 \pm 4 \cdot 10^{-5}$

(R1):  $R_g = 526,97 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ; (R2):  $R_g = 461,5254384083019 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

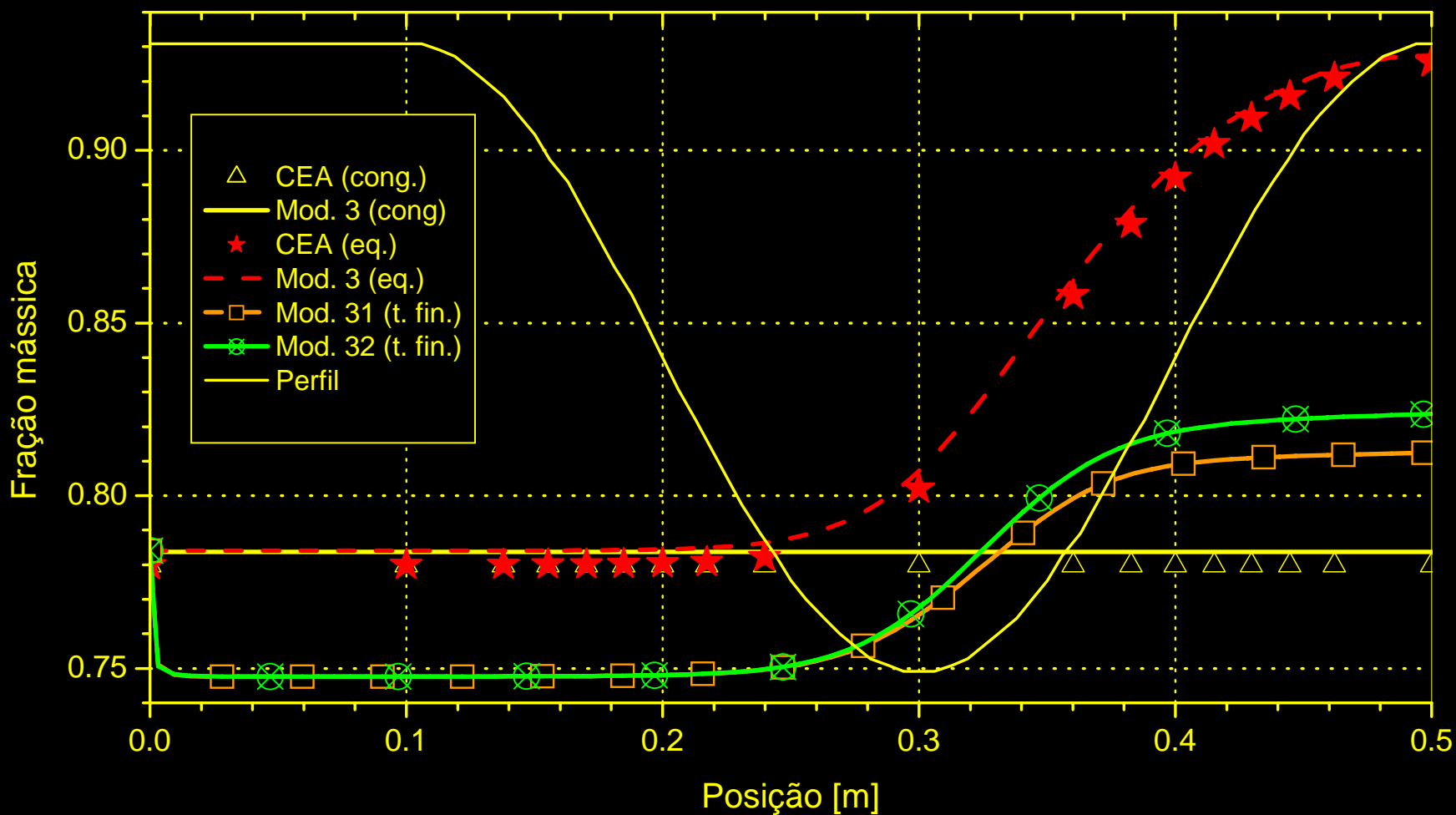
Malha de 2560 volumes de controle

# Resultados – Mach1D



Distribuição de temperaturas ao longo da tubeira

# Resultados – Mach1D



Distribuição de frações mássicas de H<sub>2</sub>O ao longo da tubeira

# Resultados – Mach1D

## Tempo de CPU

Malha	Monogás, isentrópico		Esc. congelado (mod. 3)	Esc. em equilíbrio (mod. 3)	Esc. com taxa finita	
	Propriedades constantes	Propriedades variáveis			mod. 31	Mod. 32
80 volumes	3,08 s	0,750 s	0,969 s	2,34 min	17,0 min	27,3 min
2560 volumes	2,07 min	3,02 min	2,66 min	1,98 dia	1,66 h	2,61 h
10240 volumes	56,9 min	1,65 h	1,49 h	---	---	---

# Resultados – RHG

## Sem efeitos de transferência de calor

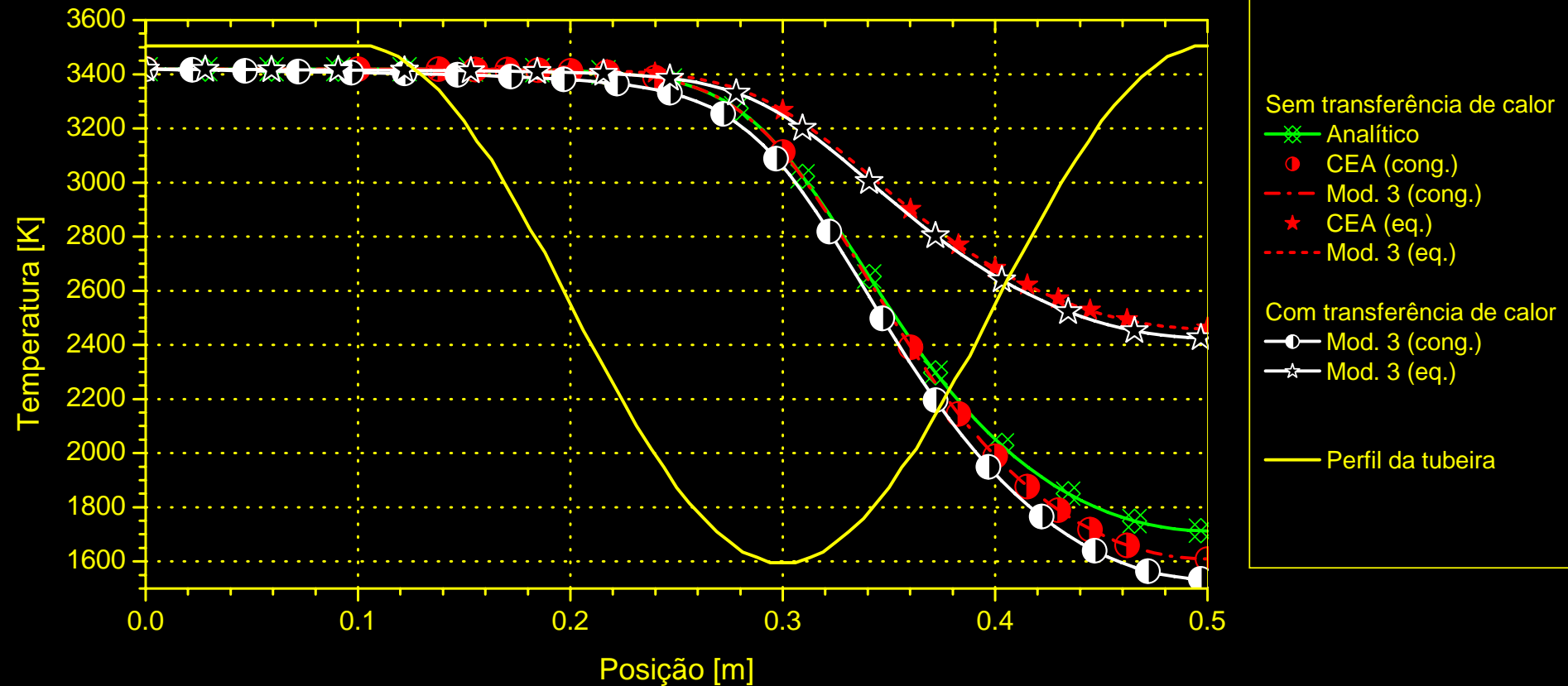
Modelo	$T_{ex}$ [K]	$u_{ex}$ [m/s]	$M_{ex}$ [adim.]
<b>Analítico (R1)</b>	<b>1712,7409</b>	<b>3316,7150</b>	<b>3,1928346</b>
Monogás – prop. Variáveis (R2)	1800 ± 7	3142 ± 6	3,15 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. congelado – mod. 3, 4, 5 e 7	1606 ± 9	3312 ± 7	3,24 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. congelado – mod. 9 e 10	1606 ± 9	3312 ± 7	3,24 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>
<b>CEA (esc. congelado)</b>	<b>1607,91</b>	<b>3311,4519</b>	<b>3,231</b>
Esc. em equilíbrio – mod. 3, 4, 5 e 7	2461,2 ± 3 · 10 <sup>-1</sup>	3427 ± 2	2,911 ± 2 · 10 <sup>-3</sup>
Esc. em equilíbrio – mod. 9 e 10	2461,4 ± 3 · 10 <sup>-1</sup>	3427 ± 2	2,911 ± 2 · 10 <sup>-3</sup>
<b>CEA (esc. em equilíbrio)</b>	<b>2462,41</b>	<b>3432,7056</b>	<b>2,986</b>
Esc. com taxa finita – mod. 31	1910 ± 1 · 10 <sup>1</sup>	3332 ± 6	3,05 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. com taxa finita – mod. 32	1980 ± 1 · 10 <sup>1</sup>	3338 ± 6	3,02 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>

## Com efeitos de transferência de calor

Model	$T_{ex}$ [K]	$u_{ex}$ [m/s]	$M_{ex}$ [adim.]
Monogás – prop. Variáveis (R2)	1730 ± 7	3112 ± 6	3,18 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. congelado – mod. 3	1534 ± 9	3278 ± 7	3,27 ± 2 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. congelado – mod. 10	1534 ± 9	3278 ± 7	3,27 ± 2 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. em equilíbrio – mod. 3	2425,4 ± 8 · 10 <sup>-1</sup>	3409 ± 2	2,922 ± 2 · 10 <sup>-3</sup>
Esc. em equilíbrio – mod. 10	2425,6 ± 8 · 10 <sup>-1</sup>	3409 ± 2	2,922 ± 2 · 10 <sup>-3</sup>
Esc. com taxa finita – mod. 31	1860 ± 1 · 10 <sup>1</sup>	3315 ± 6	3,08 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>
Esc. com taxa finita – mod. 32	1924 ± 9	3320 ± 2 · 10 <sup>1</sup>	3,05 ± 1 · 10 <sup>-2</sup>

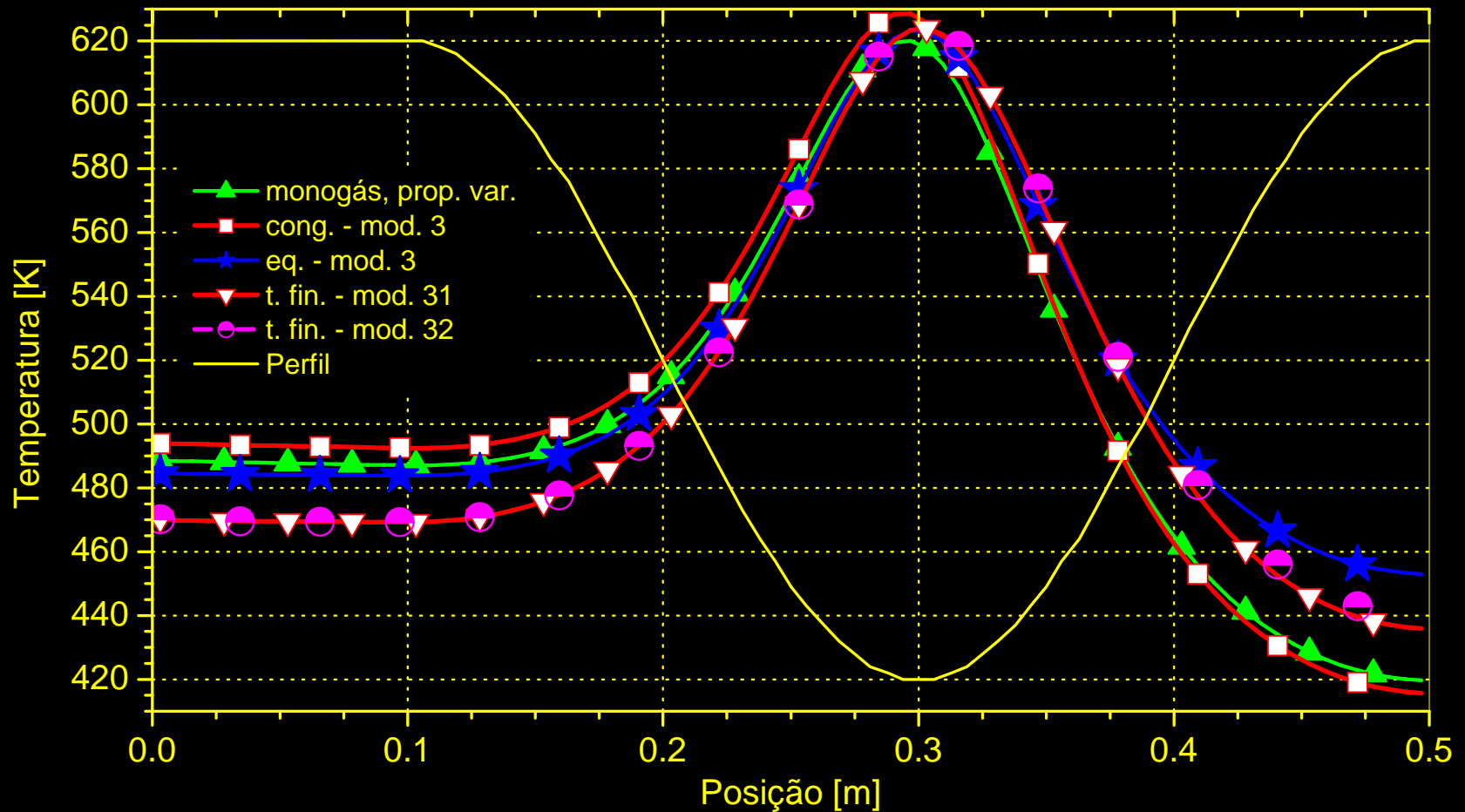


# Resultados – RHG



Distribuição de temperaturas ao longo da tubeira

# Resultados – RHG



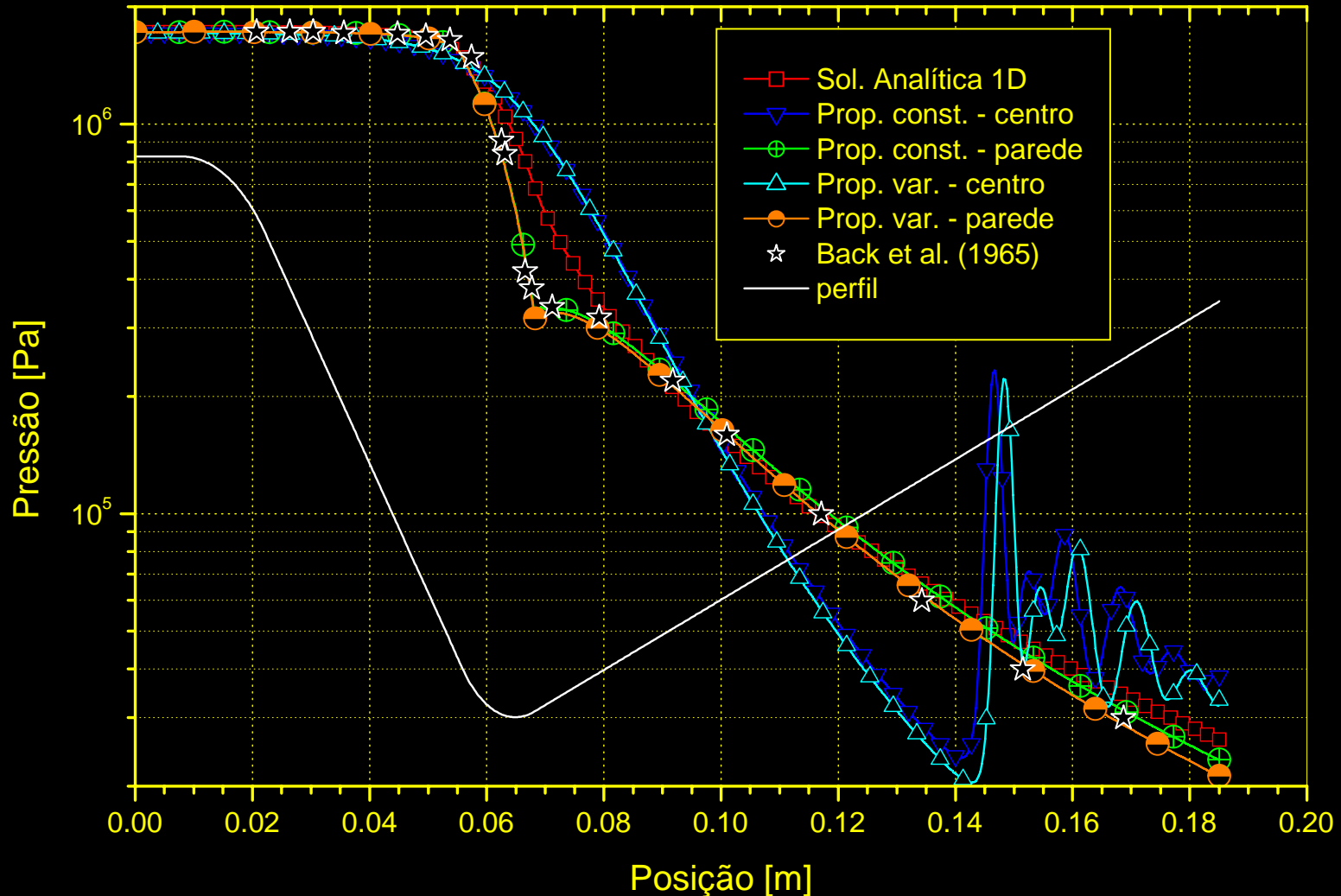
Distribuição de temperaturas ao longo da parede da tubeira

# Resultados – RHG

## Tempo de CPU

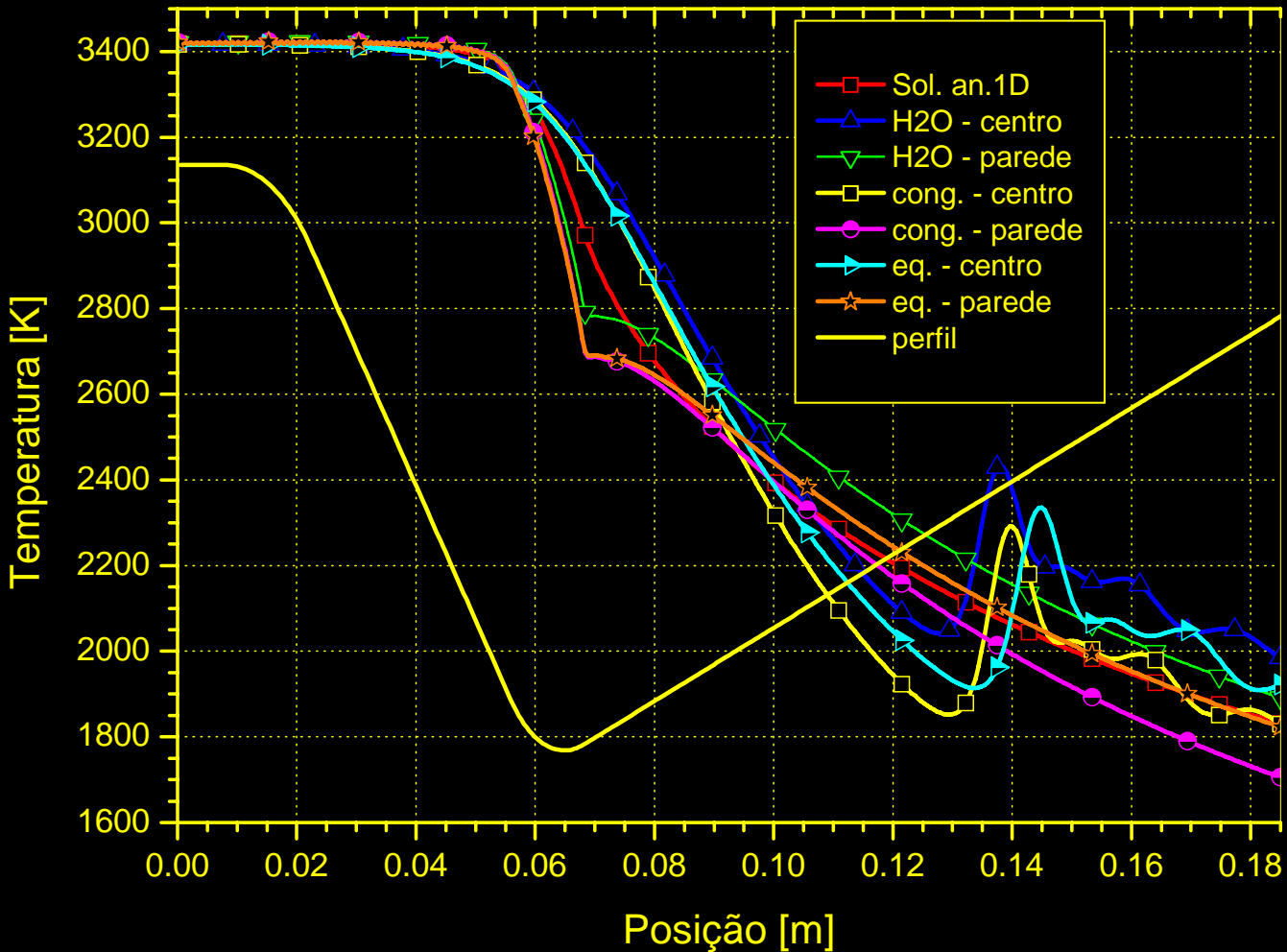
Modelo	Iterações para:			Iterações globais	Tempo de CPU	
	Físico	Químico	Escoamento reativo de gases			Refrigerante
Monogás, prop. variáveis	---		6.000	1.000	20	23,4 s
Esc. congelado	3		5.000	1.000	20	10,6 s
	10		5.000	1.000	20	12,2 s
Esc. em equilíbrio	3		15.000	1.000	20	1,79 h
	10		15.000	1.000	20	3,49 h
Esc. com taxa finita	31		5.000.000	1.000	5	1,06 dia
	32		4.000.000	1.000	5	20,0 h

# Resultados – Mach2D



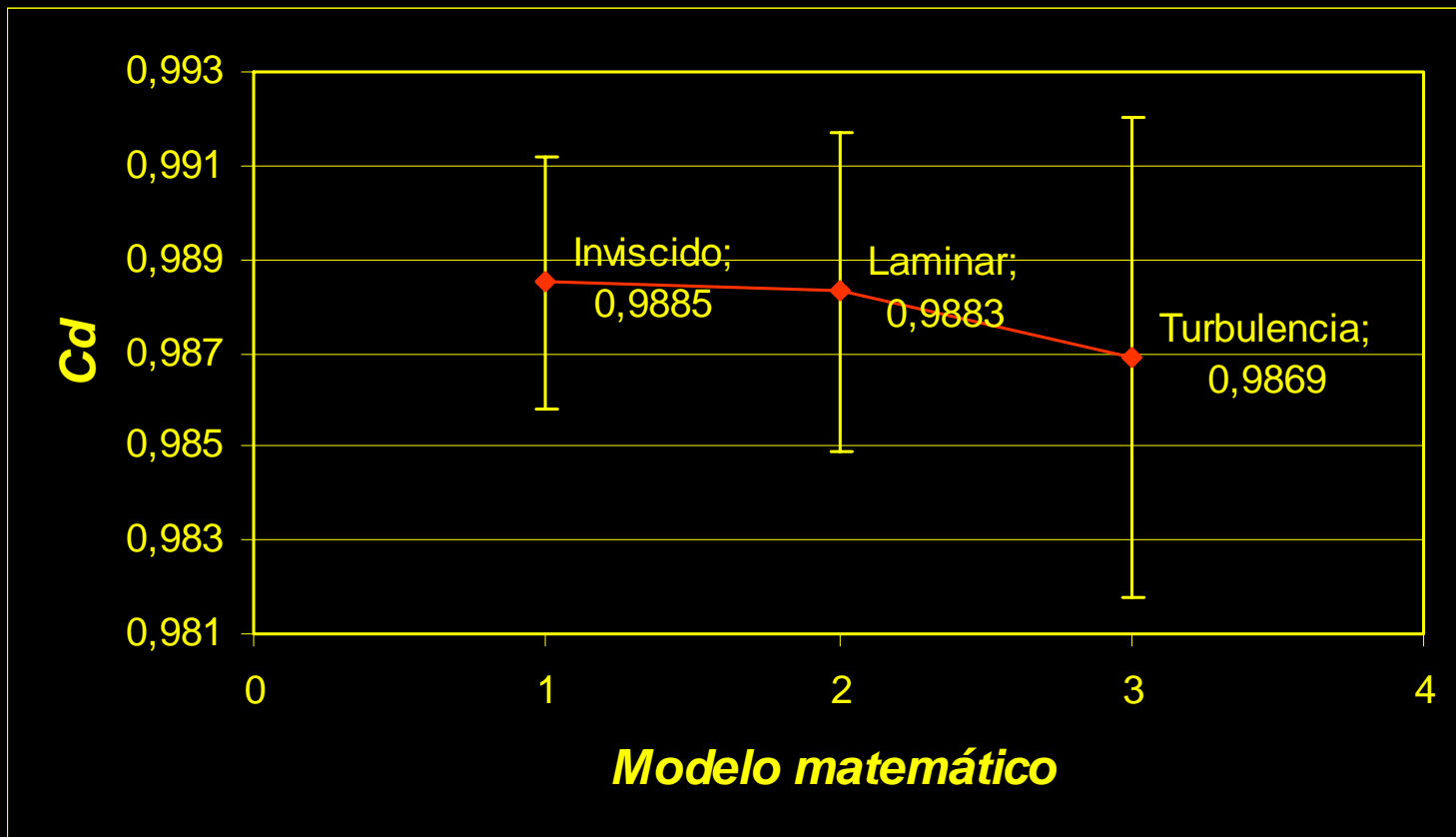
Distribuição de pressão ao longo da tuberia – escoamento de ar

# Resultados – Mach2D



Distribuição de temperatura ao longo da tubeira

# Modelo 2D - Fluent



Malhas estudadas: 200x60, 100x30, 50x15.

Fonte: Taillander, J., *Efeito do modelo matemático sobre o escoamento em tubeira de motor-foguete*, TCC – Eng. Mecânica, UFPR.

# Cd – comparação de modelos

Modelo	Cd
<b>Tubeira Cossenoidal</b>	
<b>Analítico 1D</b>	<b>1,0</b>
Prop. Constantes – 1D	$1,000000 \pm 1 \cdot 10^{-6}$
Prop. Variáveis – 1D	$0,991754 \pm 1 \cdot 10^{-6}$
Congelado – mod.3 – 1D	$1,001086 \pm 1 \cdot 10^{-6}$
<b>CEA congelado</b>	<b>1,000580</b>
Equilíbrio – mod. 3 – 1D	$0,9782 \pm 1 \cdot 10^{-4}$
<b>CEA equilíbrio</b>	<b>0,977372</b>
Fluent – invíscido – 2D	$0,989 \pm 3 \cdot 10^{-3}$
Fluent – laminar – 2D	$0,988 \pm 3 \cdot 10^{-3}$
Fluent – turbulento – 2D	$0,987 \pm \pm 5 \cdot 10^{-3}$
<b>Klingel e Levine – 2D</b>	<b>0,974995</b>
<b>Tubeira de Back et al. (1965)</b>	
Numérico constante – 2D	$0,9826 \pm 2 \cdot 10^{-4}$
Numérico variável – 2D	$0,9747 \pm 2 \cdot 10^{-4}$
Congelado – mod. 3 – 2D	$0,9837 \pm 2 \cdot 10^{-4}$
Equilíbrio – mod. 3 – 2D	$1,0161 \pm 1 \cdot 10^{-4}$
<b>Klingel e Levine – 2D</b>	<b>0,983131</b>