Simulação numérica da condução de calor 2D em tubeira com refrigeração regenerativa

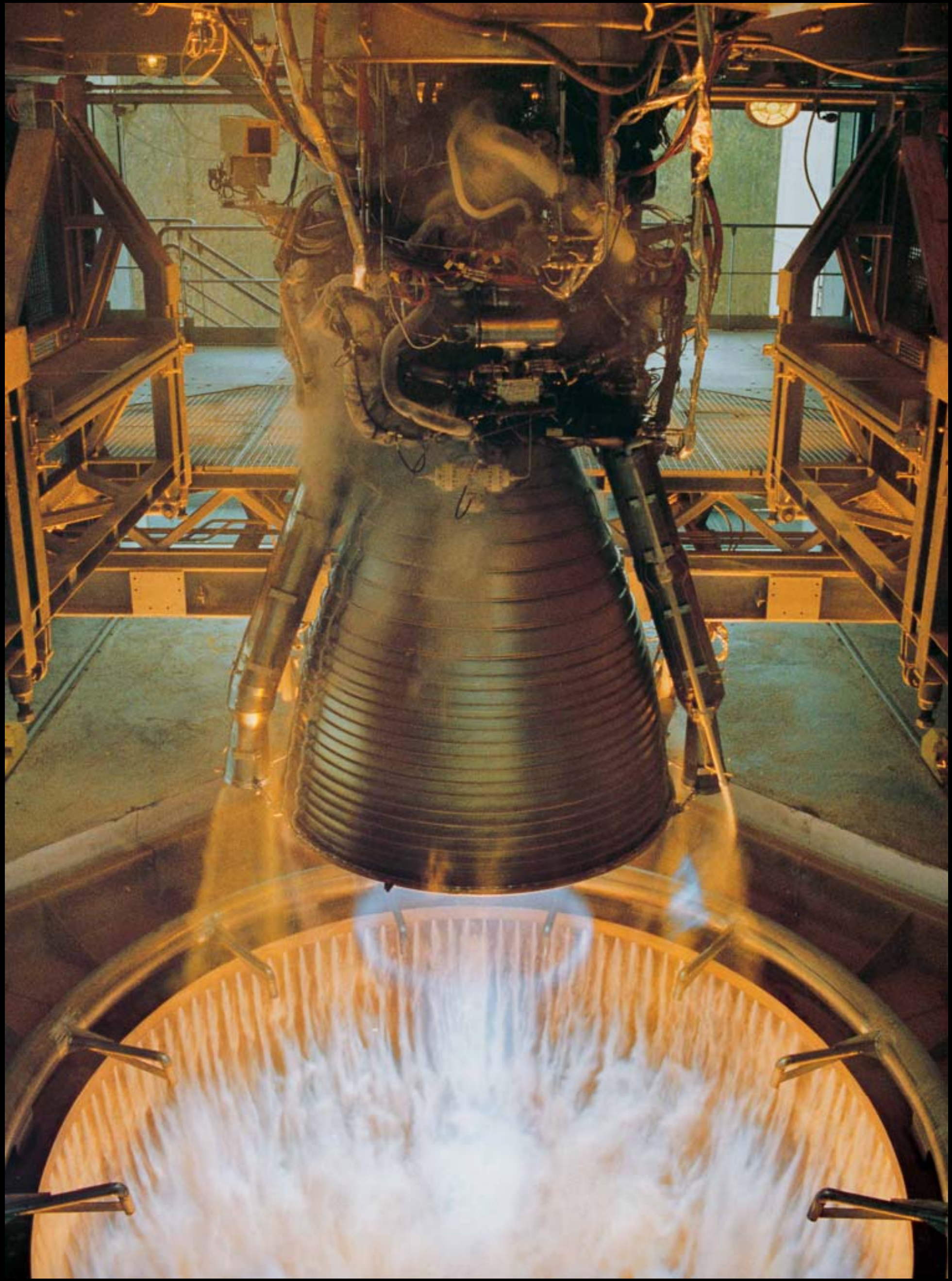
Objetivo principal: modelos 1D x 2D

Variáveis de interesse:

- Temperatura máxima da parede (Tmax)
- Taxa de transferência de calor para a parede (q)

Considerações:

- Motor-foguete a propelente líquido
- Refrigeração regenerativa

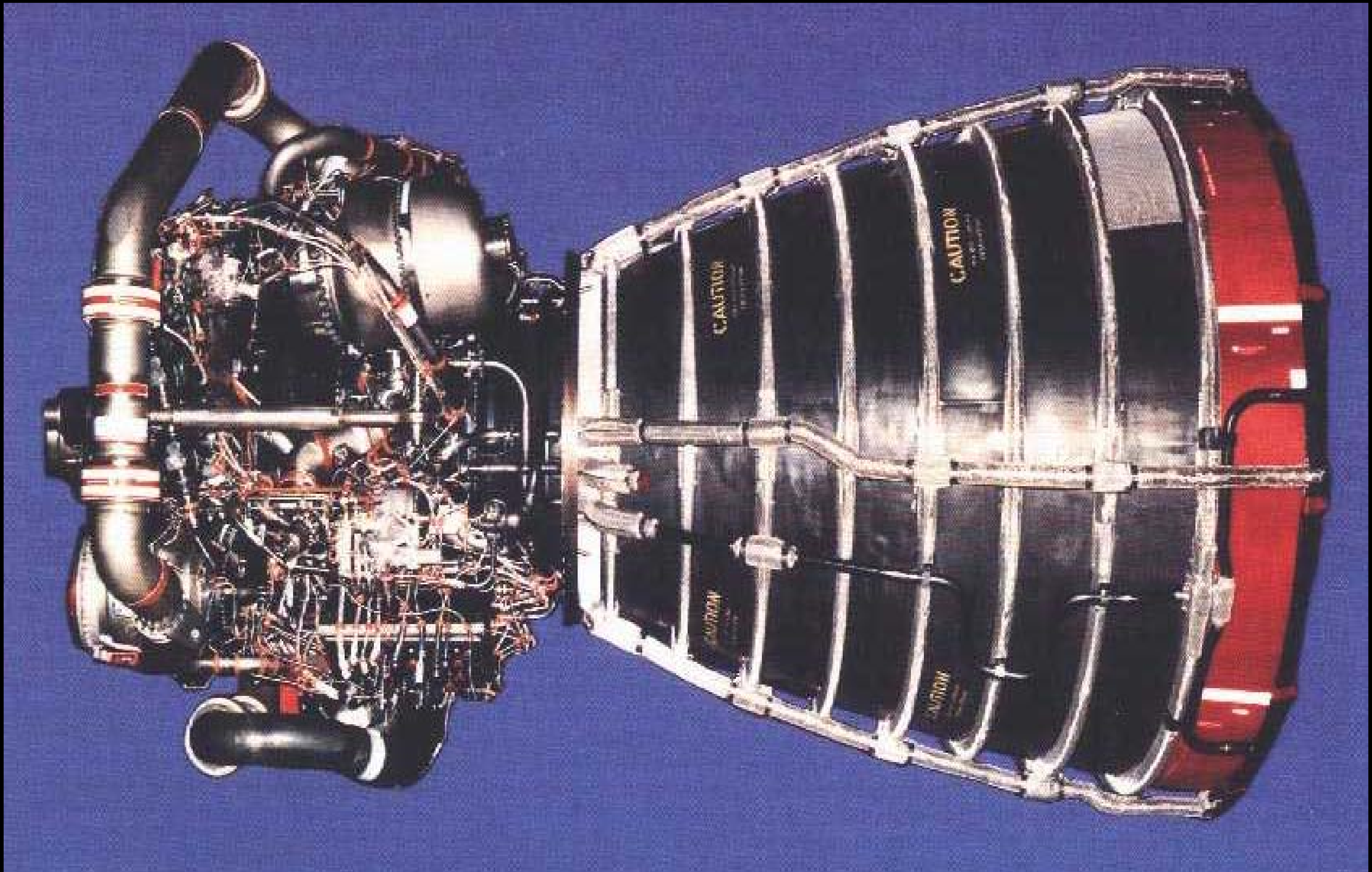


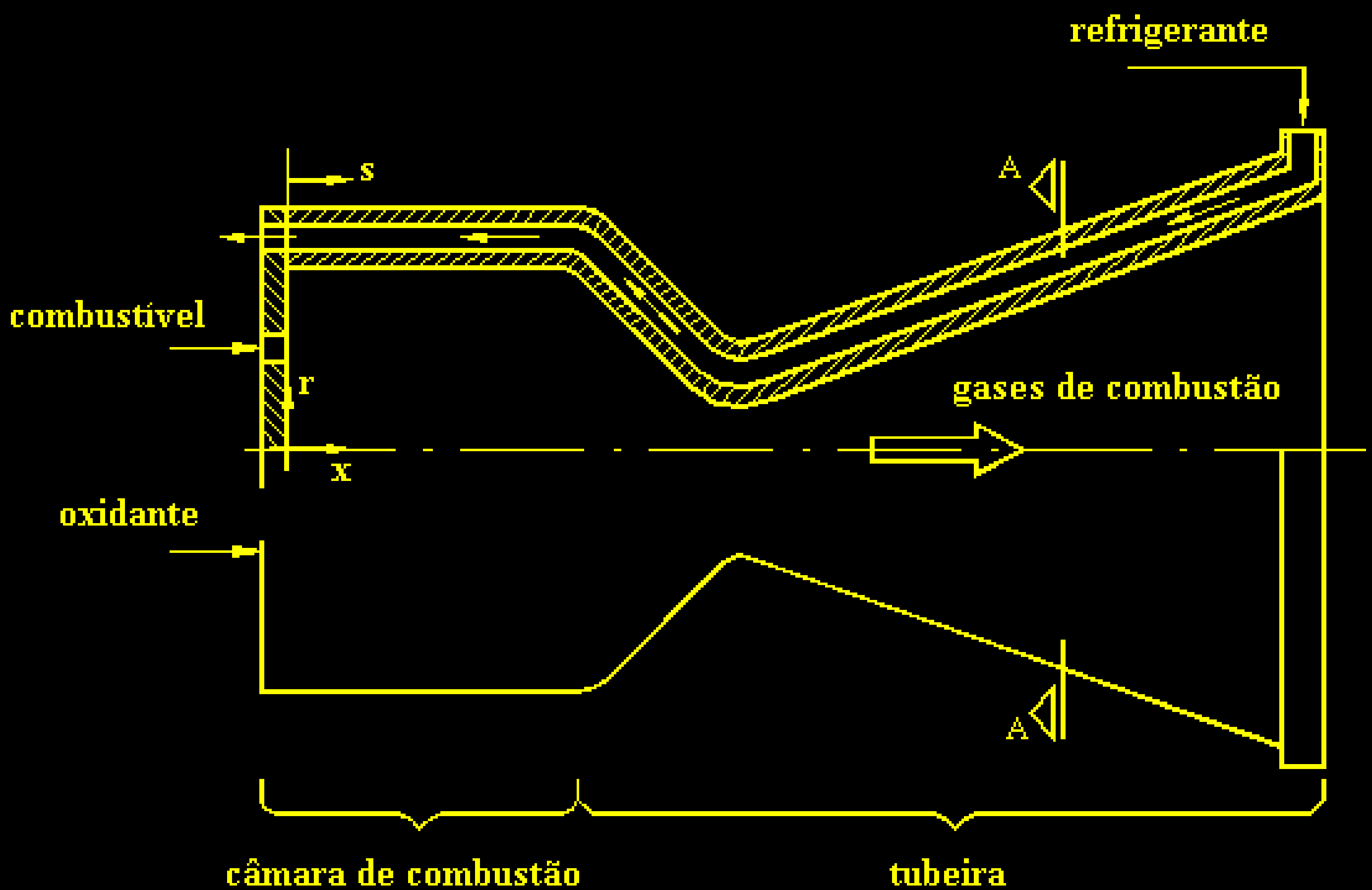
Motor-foguete

Vulcain do

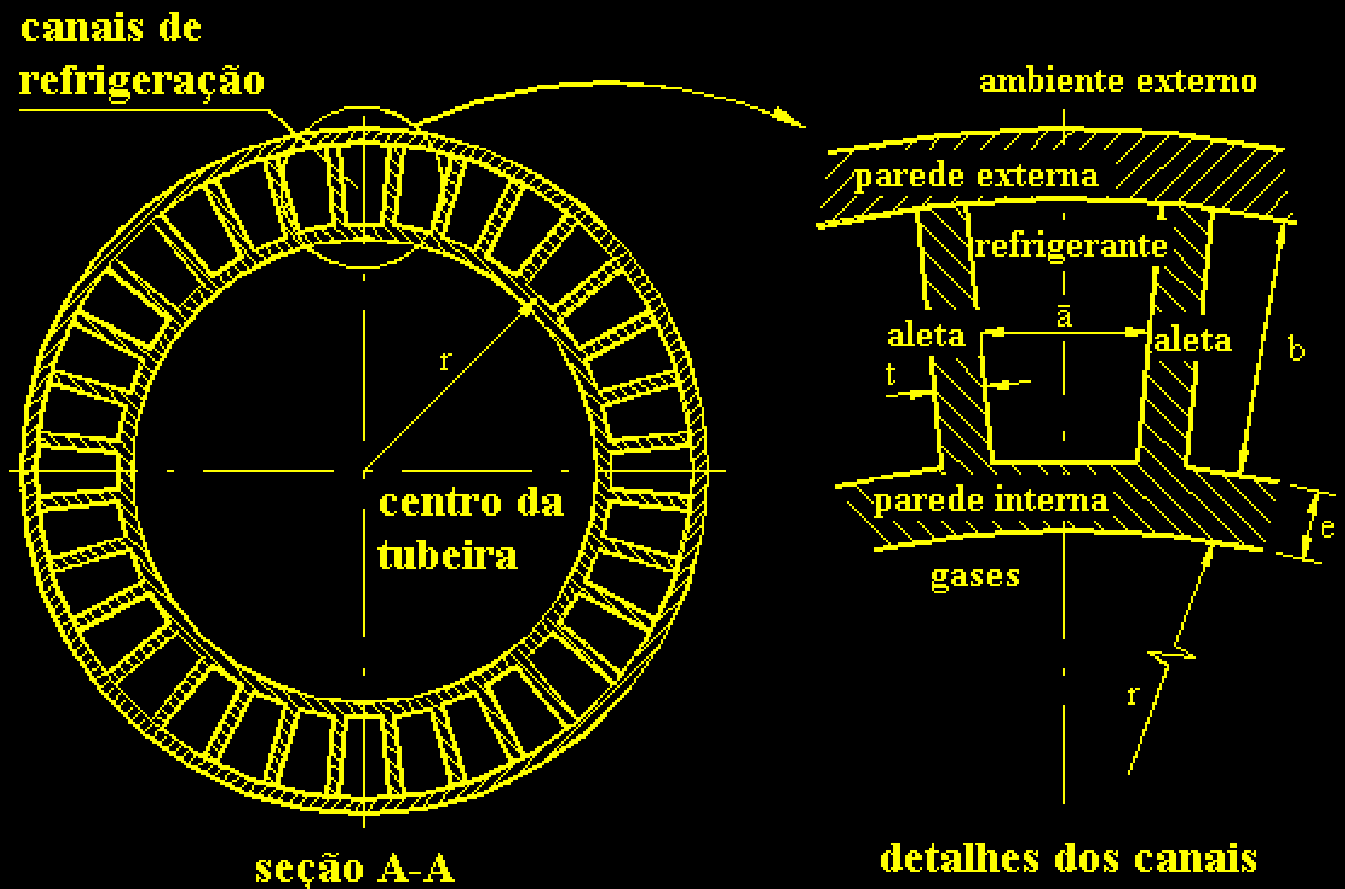
Ariane V

Motor-foguete SSME
do Space Shuttle





Esquema de motor-foguete bipropelente com refrigeração regenerativa

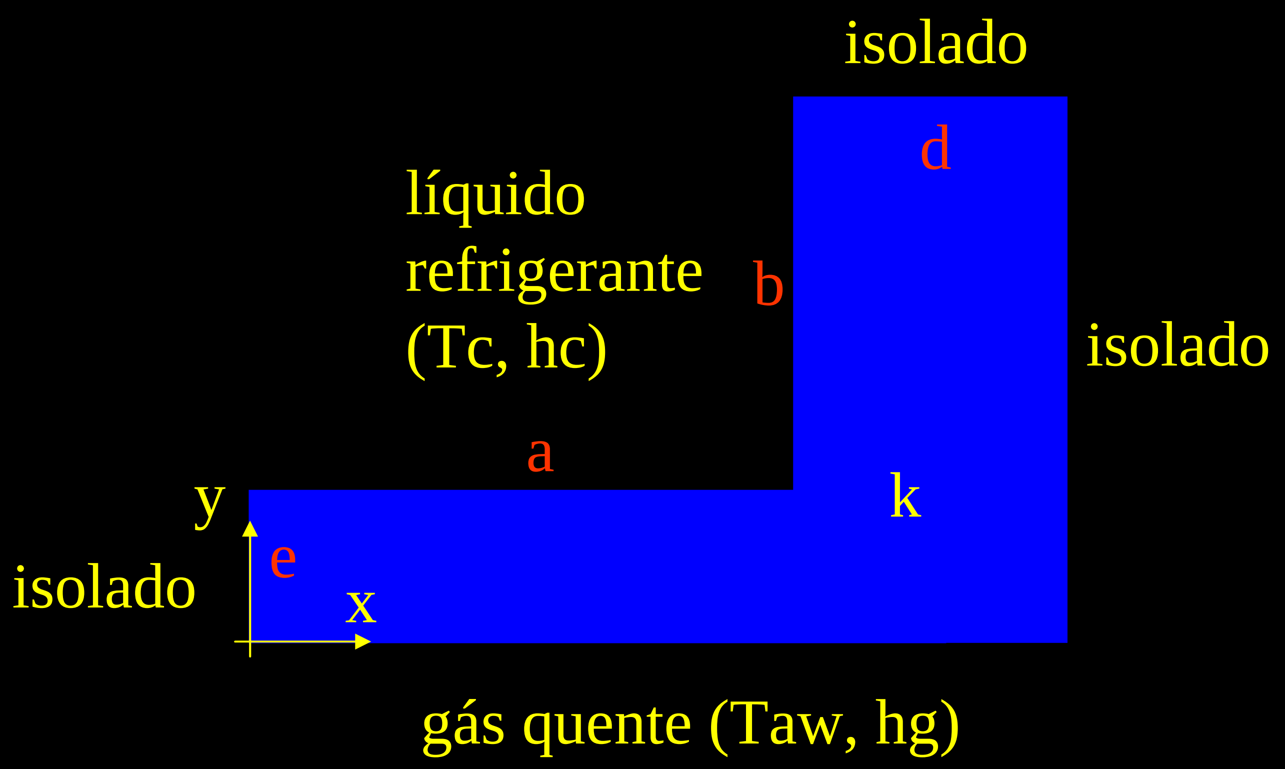


Detalhes dos canais de refrigeração

Problema térmico - transversal

Condução de calor 2D plana permanente

$T(x,y) = ?$



Modelo matemático - transversal

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) = 0$$

Modelo numérico transversal

- Método dos Volumes Finitos
- Aproximações numéricas de segunda ordem
- Malha não-uniforme por direção e estruturada
- Solver ADI (TDMA por direção)
- Propriedades constantes: k, Taw, Tc, a etc
- GCI(pL=2;Fs=3;r=2)
- Linguagem Fortran 90
- Programa computacional: Aleta2D 1.1

Dados

- 5 Malhas: 10x35, 20x70 ... 160x560
- a = d = 1 mm;   e = 2 mm;   b = 5 mm
- Tc = 300 K;   Taw = 3300 K
- hc = 160.000   e   hg = 11.000 W/m^2.K
- k = 370 W/m.K
- Bi = 0,432
- Iterações até o erro de máquina

Resultados

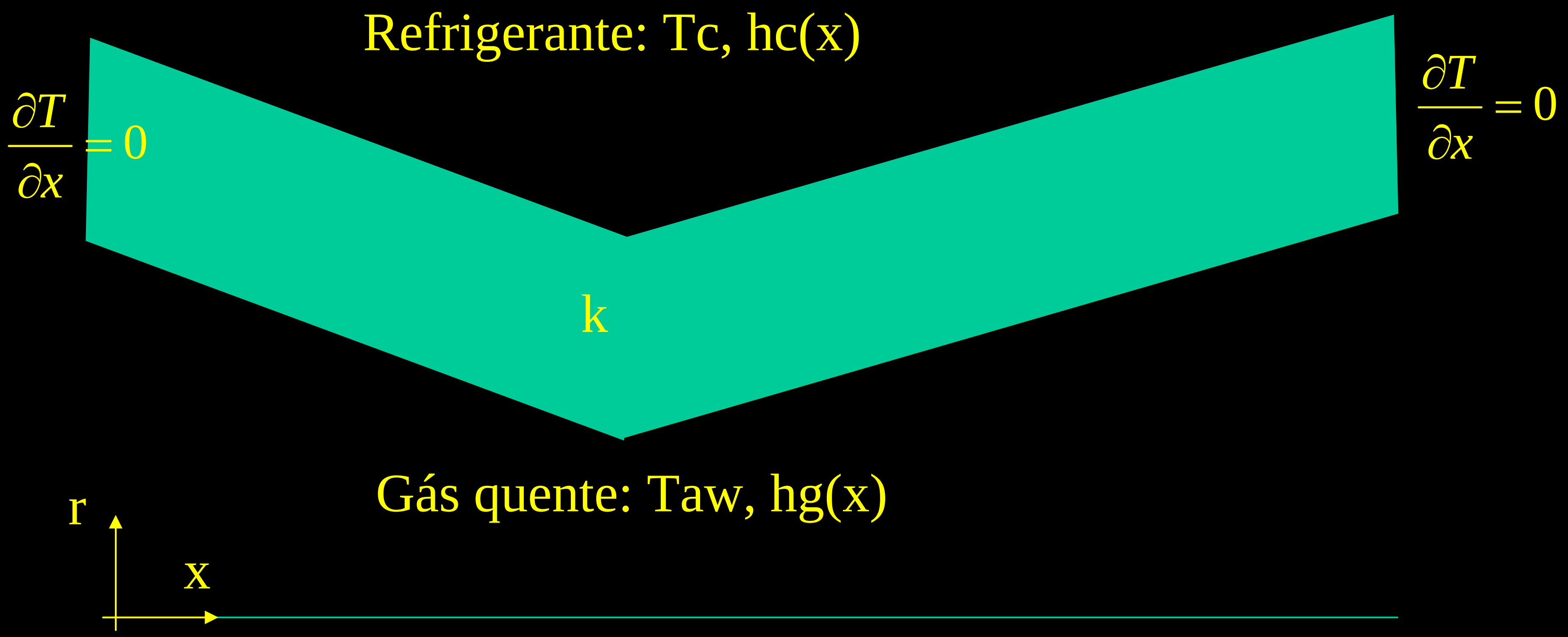
- t_{CPU} = 0,2” a 5h38’
- Iterações: 1 mil a 20 mil
- Tmax-1D = 600,9272 K
- Tmax-2D/1D = $1.009532 \pm 3.6\times10^{-5}$
- q-1D = $4{,}898817\times10^{4}$ W
- q-2D/1D = $0.9980379 \pm 6.8\times10^{-6}$

Conclusão: efeito 2D < 1%; modelo 1D é suficiente.

Problema térmico - longitudinal

Condução de calor 2D axissimétrica permanente

$$T(x,r) = ?$$



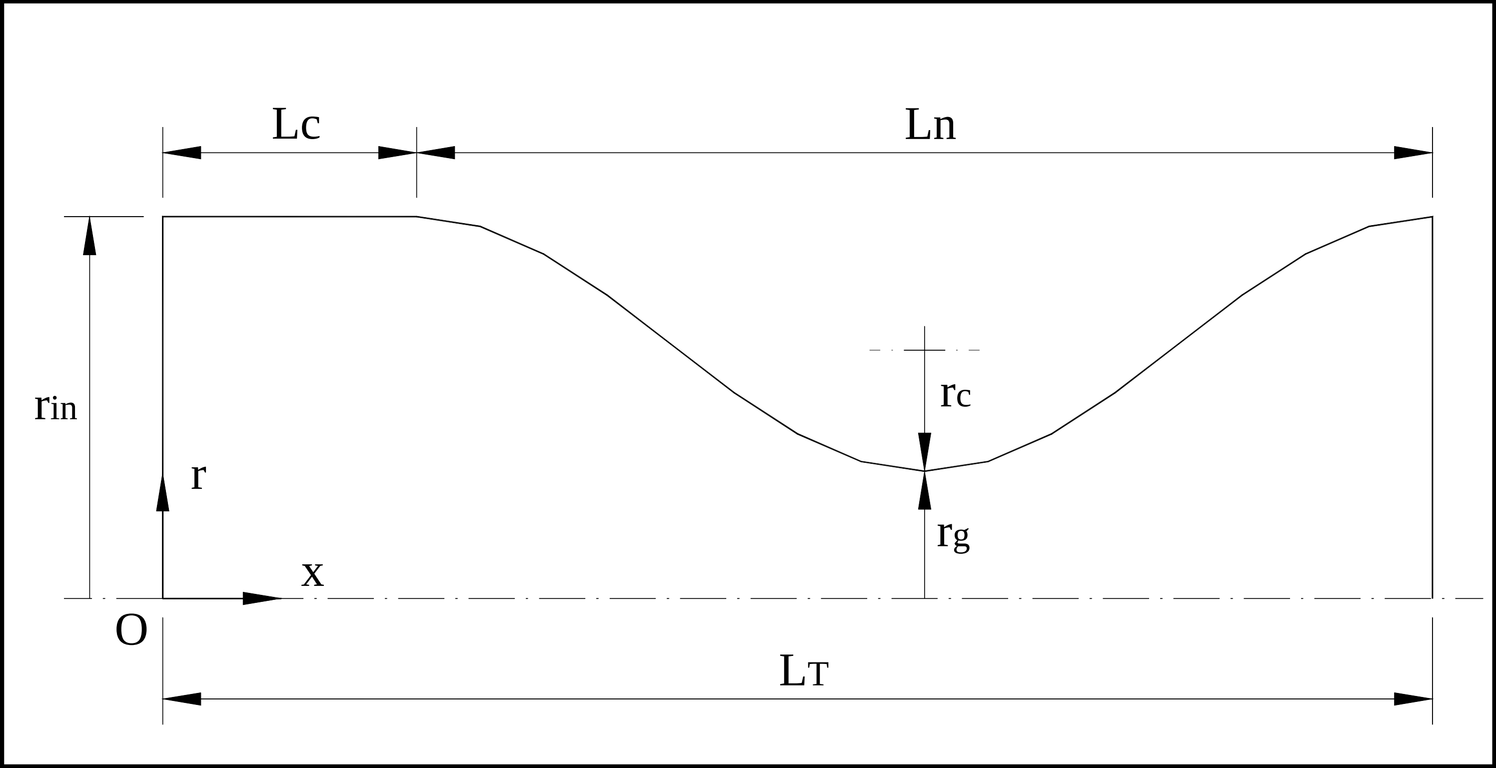
Modelo matemático - longitudinal

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) = 0$$

Modelo numérico longitudinal

- Método dos Volumes Finitos
- Aproximações numéricas de segunda ordem
- Malha não-ortogonal e estruturada
- Solver MSI de 9 diagonais
- Propriedades constantes: k, Taw, Tc
- Propriedades variáveis: hc(x), hg(x)
- GCI(pL=2;Fs=3;r=2)
- Linguagem Fortran 90
- Programa computacional: Parede2D 1.1

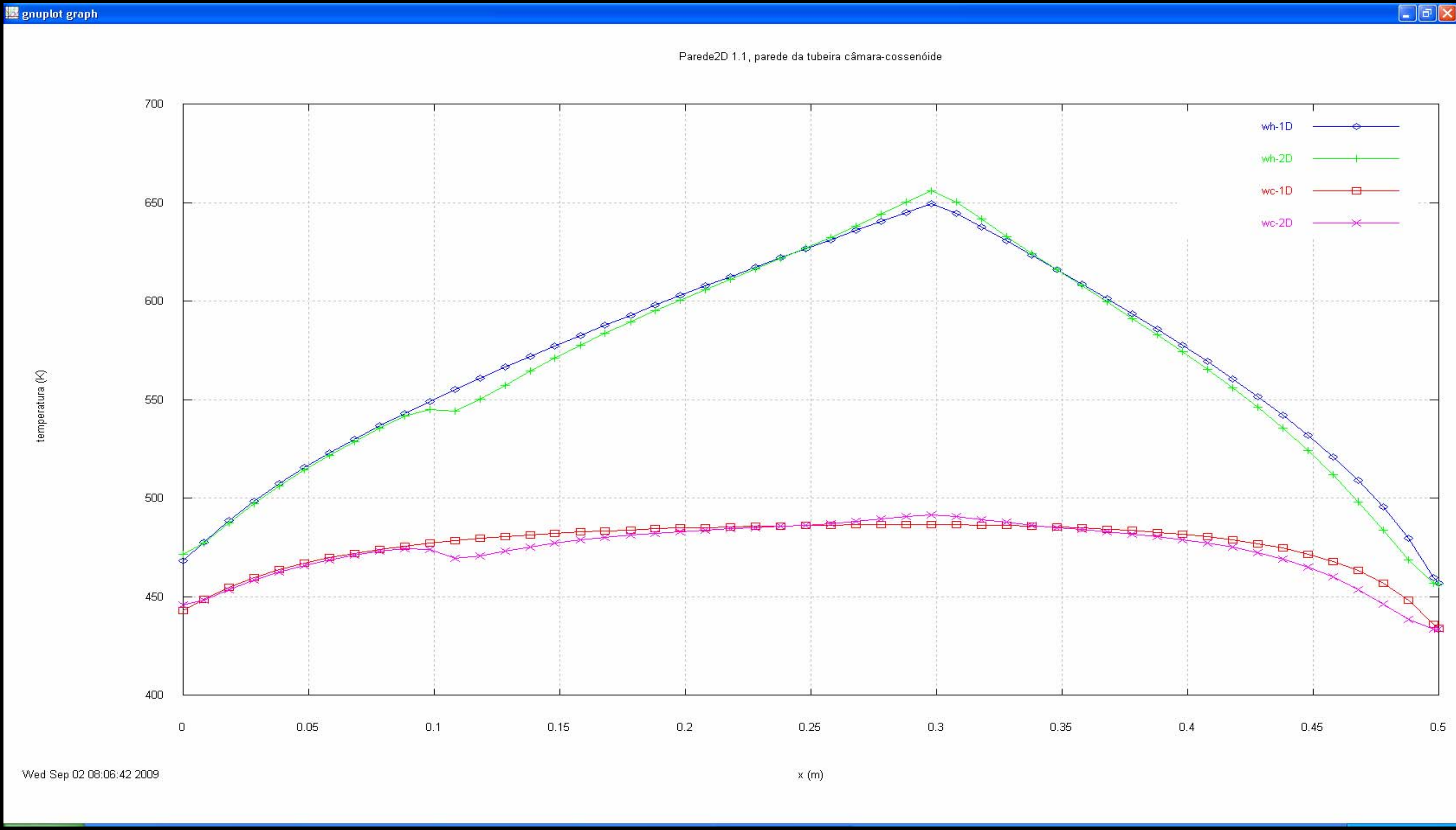
Geometria do problema



Dados

- 6 Malhas: 25x5, 50x10 ... 800x160
- Geometria: câmara-cossenóide, e = 2 mm
- rin = 0,3 m;   rg = 0,1 m
- Lc = 0,1 m;   Ln = 0,4 m
- Tc = 300 K;   Taw = 3400 K
- hc = 33.000, 162.000 e 31.000 $W/m^2.K$
- hg = 1.600, 11.000 e 1.400 $W/m^2.K$
- k = 370 W/m.K
- Bi = 0,327
- Iterações até o erro de máquina

Resultado



gnuplot graph
Parede2D 1.1, parede da tubeira câmara-cossenóide
wh-1D
wh-2D
wc-1D
wc-2D
700
650
600
550
500
450
400
temperatura (K)
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
x (m)
Wed Sep 02 08:06:42 2009

Resultados

- t_{CPU} = 0” a 4’20”
- Iterações: 20 a 200
- Tmax-1D = 650,075 K
- Tmax-2D/1D = 1.00940 ± 5.0×10^{-4}
- q-1D = $1{,}486986 \times 10^{7}$ W
- q-2D/1D = 1.0010454 ± 2.6×10^{-6}

Conclusão: efeito 2D < 1%; modelo 1D é suficiente.