

## **Simulação numérica de escoamento reativo, transferência de calor e termoelasticidade em motor-foguete - parte 2**

Projeto CFD-14/AEB-3 apoiado financeiramente pela  
Agência Espacial Brasileira (AEB)  
Anúncio de Oportunidades 01/2006 do Programa UNIESPAÇO  
Tema: Veículos Espaciais  
Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

# **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: testes de paralelização do código Mach2D**

**Diego Fernando Moro**, gr. Eng. Mec.  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Curso de Engenharia Mecânica (CEM)

**Guilherme Bertoldo**, Me. Física  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
Campus Francisco Beltrão

**Carlos Henrique Marchi**, Dr. Eng. Mec.  
Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Curitiba, 17 de setembro de 2012

## 1 INTRODUÇÃO

Este relatório descreve testes de paralelização feitos na workstation CFD-21, que foi adquirida com recursos financeiros da AEB (Agência Espacial Brasileira). Esta workstation está instalada no LENA-1 (Laboratório de Experimentação Numérica 1), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Esta workstation contém 2 processadores, cada um com 6 núcleos, totalizando 12 núcleos de CPU.

O código computacional utilizado nos testes foi o Mach2D 5.8, que está descrito no relatório [1]. Ele foi adaptado para resolver a tubeira da figura 3 de Back et al [2]. Entre as malhas utilizadas nos testes, a mais grossa (malha base) foi de 56x20 nós e a mais fina foi de 896x320 nós.

O objetivo principal deste estudo é verificar o nível de paralelização atingido pelo código Mach2D em função do: (1) número de núcleos de CPU; (2) tamanho da malha; e (3) sistema operacional.

## 2 MODELAGEM

### 2.1 MODELO FÍSICO

O modelo físico do código computacional Mach2D 5.8 considera um fluido compressível, contínuo, não-reactivo, e termicamente perfeito. As propriedades termodinâmicas do fluido (os calores específico à pressão e volume constante, a razão entre eles, a viscosidade, e a condutividade térmica) podem ser constantes ou variáveis. A pressão, a massa específica e a temperatura são relacionadas através da equação de estado dos gases perfeitos. São desconsideradas forças externas, como a força gravitacional. O escoamento pode ser invíscido, laminar ou turbulento (modelo de Baldwin-Lomax). Mais informações sobre os modelos matemáticos do código Mach2D estão no relatório técnico [1].

### 2.2 GEOMETRIA DO MOTOR-FOGUETE

A geometria do motor-foguete está ilustrada na Fig. 1. Ela é um dos problemas abordados por Back et al. [2]. O motor tem comprimento total  $L = 185,039 \text{ mm}$ , raio interno máximo  $R_c = 63,5 \text{ mm}$  e raio interno mínimo (garganta) de  $R_g = 20,32 \text{ mm}$ .

A geometria foi dividida em 6 partes, da esquerda para a direita:

- 1) câmara de combustão: seção constante de raio  $R_c = 63,5 \text{ mm}$  e comprimento  $L_c = 7,874 \text{ mm}$ .
- 2) transição de seção com arredondamento de raio  $r_i = 20,32 \text{ mm}$  e comprimento  $L_i = 14,3764 \text{ mm}$ .
- 3) tronco de cone convergente de comprimento  $L_{tc} = 33,6296 \text{ mm}$  e ângulo com a horizontal de  $45^\circ$ .
- 4) transição de seção até a garganta com arredondamento de raio  $r_g = 12,7 \text{ mm}$  e comprimento  $L_{dg} = 8,9916 \text{ mm}$ .
- 5) transição de seção após a garganta com o mesmo raio de arredondamento  $r_g = 12,7 \text{ mm}$  e comprimento  $L_{dg} = 3,2766 \text{ mm}$ .
- 6) tronco de cone divergente de comprimento  $L_{td} = 116,8908 \text{ mm}$  e ângulo com a horizontal de  $15^\circ$ .

### 2.3 DADOS

As Tabs. 1 e 2 apresentam os dados usados nas simulações. O fluido foi considerado invíscido. O solver empregado foi o TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm). Utilizou-se a sub-rotina

intrínseca 'date\_and\_time' para medir o tempo de CPU; com este comando é possível ter uma acurácia de centésimos de segundo.

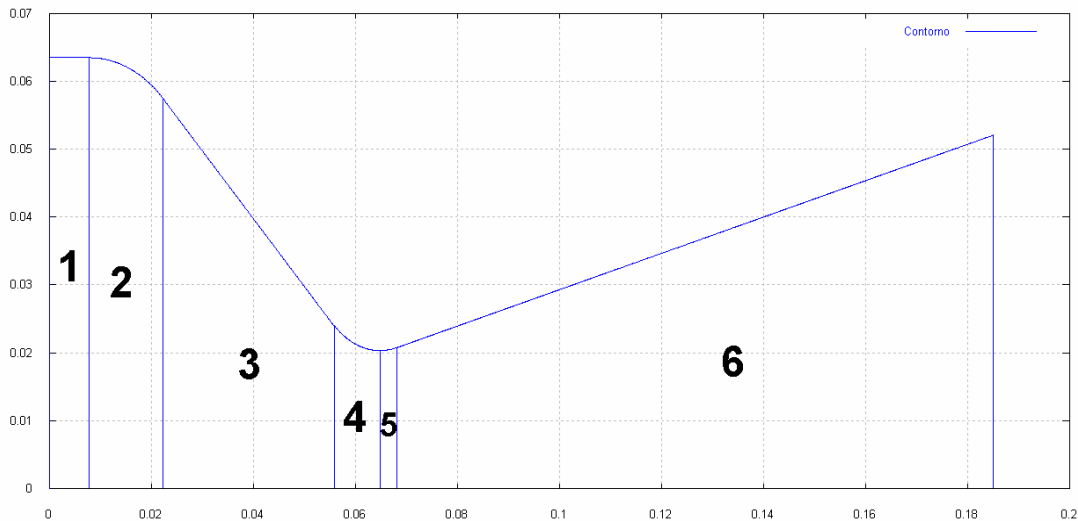


Figura 1. Geometria do motor-foguete.

Tabela 1. Parâmetros usados nas simulações com o código computacional Mach2D 5.8.

Tipo de parâmetro	Descrição	Valor
<b>Parâmetros físicos</b>	Temperatura de estagnação ( $T_0$ )	833,33 K
	Pressão de estagnação ( $P_0$ )	1 725 068,0 Pa
	Razão entre calores específicos ( $\gamma$ )	1,4
	Constante do gás (R)	286,9 J/kg·K
<b>Parâmetros ao nível do mar</b>	Pressão atmosférica ( $P_r$ )	101 325,0 Pa
	Aceleração gravitacional ( $g_0$ )	9,80665 m/s <sup>2</sup>
<b>Parâmetros numéricos</b>	Tolerance	1d-10
	beta1 = beta2	0
	modvis	0
	imax	5
	nitm_u = nitm_p	2
	Solver	TDMA
<b>Microcomputador</b>	Tipo de processador	Intel Xeon X5690 3,47 GHz
	Memória RAM	192 GB
	Número de processadores	2
	Número total de núcleos	12
	Sistema Operacional 1	Windows 7 Ultimate x64
	Sistema Operacional 2	Linux Ubuntu 2-6-32
<b>Compiladores utilizados</b>	Windows (com otimização)	Intel Fortran 11.1
	Linux (com otimização)	Gfortran 4.13

Na Tab. 2,  $N_x$  e  $N_y$  representam respectivamente o número de nós nas direções X (horizontal) e Y (vertical) da Fig. 1, de cada uma das cinco malhas usadas; e  $\Delta t$  é o passo de tempo empregado como parâmetro de relaxação no processo iterativo.

**Tabela 2. Malhas usadas nas simulações.**

Casos	$N_x$	$N_y$	$\Delta t$ (s)
TDMA_01	56	20	2,00E-005
TDMA_02	112	40	1,00E-005
TDMA_03	224	80	5,00E-006
TDMA_04	448	160	2,00E-006
TDMA_05	896	320	1,00E-006

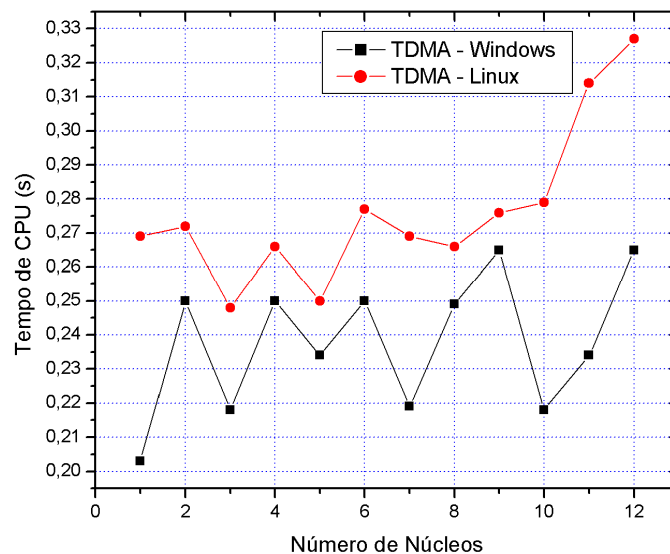
### 3 RESULTADOS

As Figs. 2 a 6 mostram o tempo de CPU em função do número de núcleos e da malha usados, tanto para o sistema operacional Windows quanto o Linux. Com estes resultados, verificou-se que:

- Em todos os casos, o sistema Windows resulta em menor tempo de CPU do que o Linux.
- Na malha mais grossa (56 x 20 nós), o efeito da paralelização é insignificante ou até aumenta o tempo de CPU, dependendo do número de núcleos usado.
- Nas demais malhas, em geral o tempo de CPU se reduz quanto mais núcleos são usados.
- Com o sistema Windows, para as malhas 112x40, 224x80, 448x160 e 896x320, a redução máxima do tempo de CPU em relação ao uso de um único núcleo (isto é, sem paralelização) chega a ser respectivamente de 24%, 28%, 60% e 61%.

As Figs. 7 e 8 mostram o tempo de CPU normalizado pelo tempo de CPU de 1 núcleo em cada malha com o Windows. Esta normalização é interessante pois permite avaliar o efeito da paralelização de todas as malhas em uma única figura. Com estes resultados, verificou-se que:

- Quanto mais fina é a malha, maior é o efeito da paralelização, ou seja, maior é a redução do tempo de CPU com o uso de mais núcleos.



**Figura 2. Resultados com a malha de 56 x 20 nós.**

- Aparentemente a malha 896x320 está quase no limite da redução do tempo de CPU pois seus resultados estão muito próximos da malha anterior (448x160). Portanto, malhas mais finas deverão ter desempenho muito próximo da malha 896x320.
- A redução mais significativa do tempo de CPU é obtida com até 6 núcleos. Com mais núcleos, a redução do tempo de CPU é pequena. Ou seja, na prática, pode-se usar apenas um processador, que tem 6 núcleos, em vez de usar os dois processadores na mesma simulação. Desta forma, é mais interessante usar cada processador simultaneamente para uma simulação diferente.
- A paralelização tem maior efeito no Windows do que no Linux, especialmente nas malhas mais grossas. Por exemplo: na malha 112x40, a redução máxima do tempo de CPU relativa a 1 núcleo chega a 24% no Windows, enquanto que no Linux essa redução é de apenas 11%. Já na malha mais fina (896x320), a redução máxima do tempo de CPU relativa a 1 núcleo chega a 61% no Windows, enquanto que no Linux essa redução é de 58%.

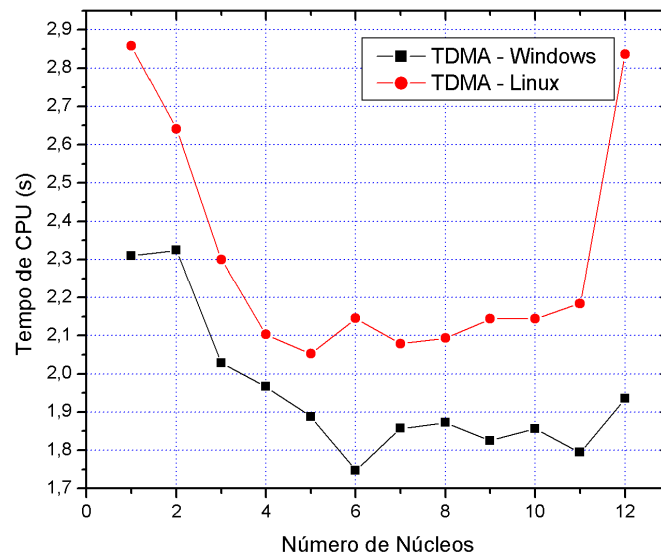


Figura 3. Resultados com a malha de 112 x 40 nós.

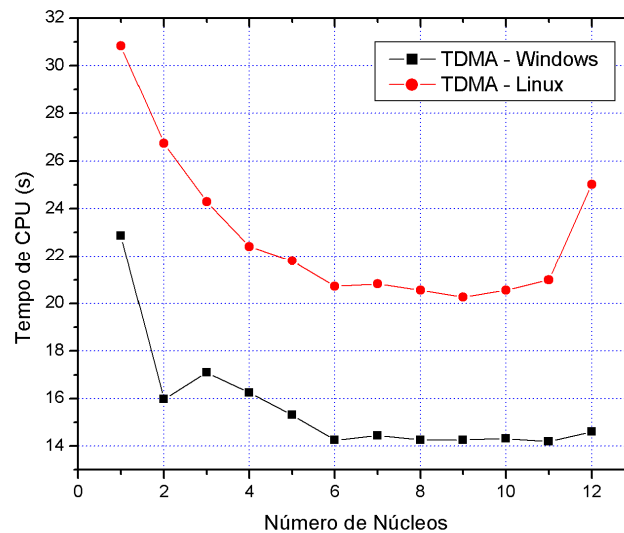


Figura 4. Resultados com a malha de 224 x 80 nós.

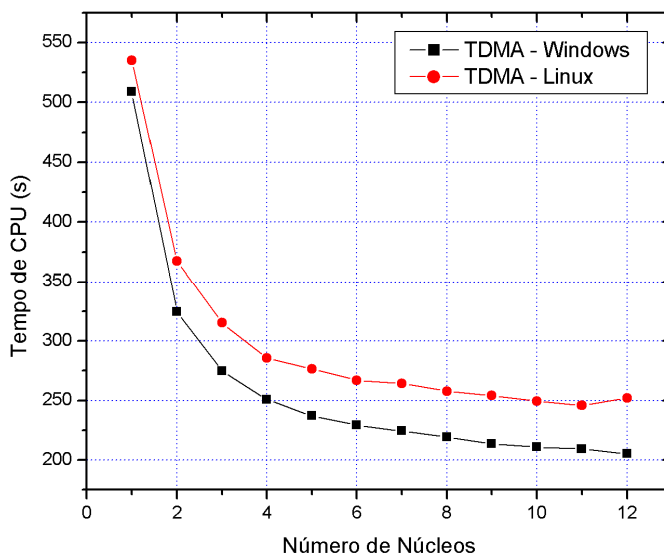


Figura 5. Resultados com a malha de 448 x 160 nós.

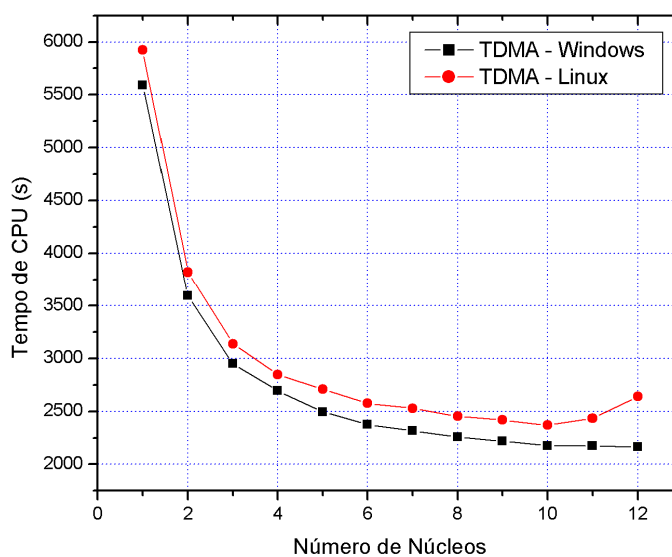


Figura 6. Resultados com a malha de 896 x 320 nós.

#### 4 CONCLUSÃO

Com a execução deste estudo, em resumo, verificou-se que:

- 1) O sistema Windows resulta em menor tempo de CPU do que o Linux.
- 2) Em geral, o tempo de CPU se reduz quanto mais núcleos são usados.
- 3) Com o sistema Windows, para as malhas 112x40, 224x80, 448x160 e 896x320, a redução máxima do tempo de CPU em relação ao uso de um único núcleo (isto é, sem paralelização) chega a ser respectivamente de 24%, 28%, 60% e 61%.
- 4) A redução mais significativa do tempo de CPU é obtida com até 6 núcleos.

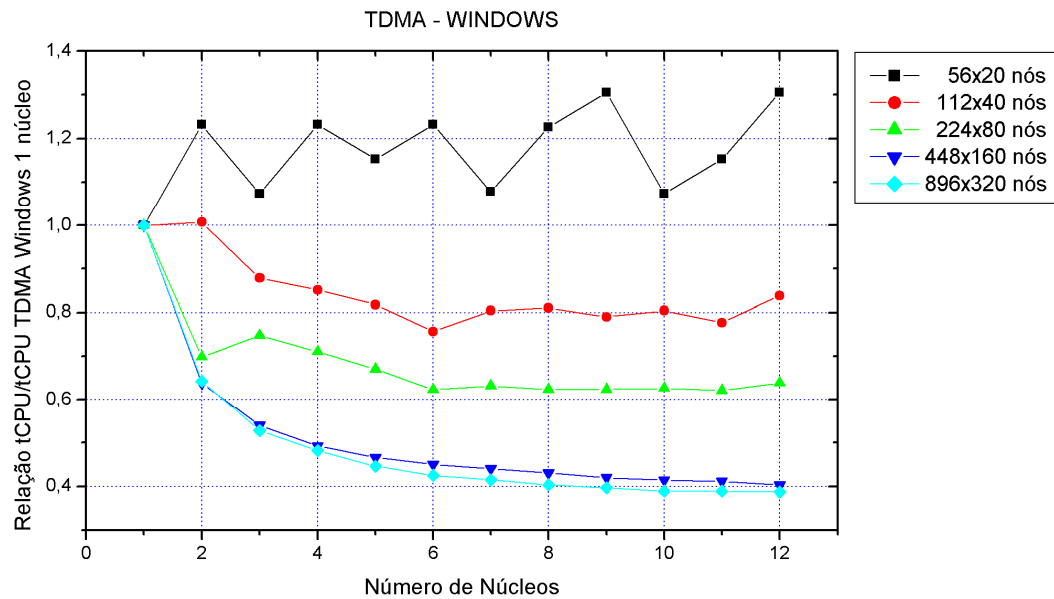


Figura 7. Resultados normalizados das cinco malhas no Windows.

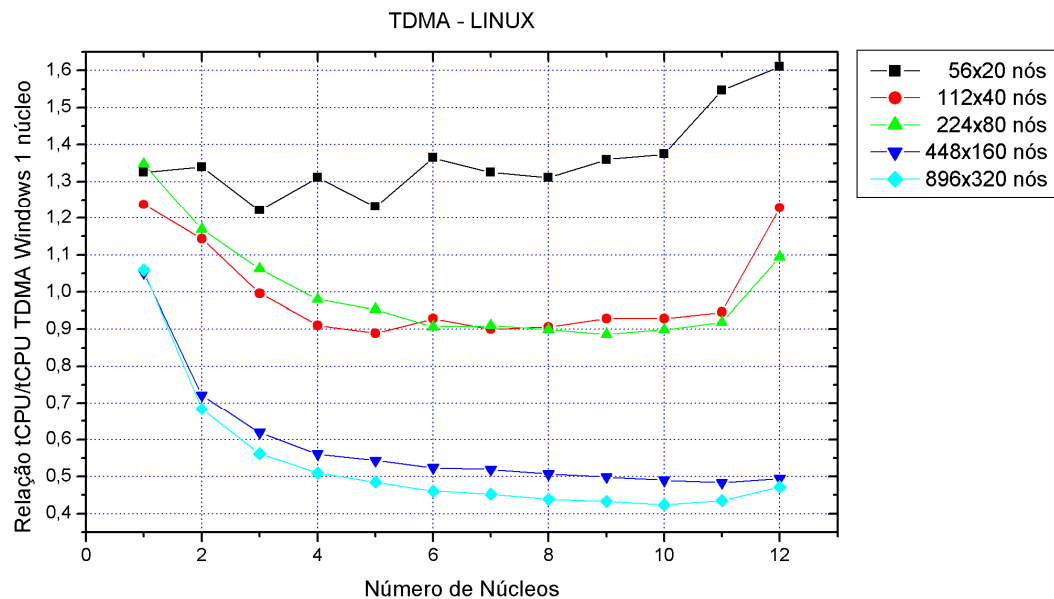


Figura 8. Resultados normalizados das cinco malhas no Linux.

## REFERÊNCIAS

[1] MARCHI, C. H.; BERTOLDO, G. **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: modelagem de escoamento turbulento (Baldwin-Lomax) do código Mach2D**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 26 p.

[2] BACK, L. H.; MASSIER, P. F.; GIER, H. L. Comparison of measured and predicted flows through conical supersonic nozzles, with emphasis on the transonic region. **AIAA Journal**, v. 3, n. 9, p. 1606-1614, 1965.