



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

*CFD-5*

**Palavras-chave:** propulsão líquida, CFD, volumes finitos, erro numérico, H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, *multigrid*, tubeira, câmara de combustão

Projeto apoiado financeiramente pela  
Agência Espacial Brasileira (AEB)  
Anúncio de Oportunidades 01/2004 do Programa UNIESPAÇO  
Tema: Veículos Espaciais  
Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

## **RELATÓRIO FINAL**

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

**Luciano Kiyoshi Araki** (UFPR)

**Fernando Laroca** (UFPR)

**Jérémie Taillandier** (UFPR)

**Thiago Fabricius Konopka** (UFPR)

**Fábio Alencar Schneider** (UNICENP)

**Márcio Augusto Villela Pinto** (UEPG)

**Cosmo Damião Santiago** (UniBrasil)

Curitiba, 8 de março de 2007.

## RESUMO

O objetivo principal do projeto CFD-5/UFPR era implementar códigos computacionais para resolver escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH<sub>2</sub>. Os parâmetros principais de interesse eram o empuxo produzido pelo motor, a temperatura máxima atingida pela parede e a queda de pressão do escoamento do refrigerante ao longo dos canais. A Agência Espacial Brasileira (AEB) financiou o projeto com R\$ 23.500,00. O projeto foi executado por uma equipe de 8 pessoas de 4 universidades. Os principais produtos gerados pelo projeto são quatro códigos computacionais: (1) Gibbs 1.3, calcula propriedades físicas e composição química de uma mistura de gases formada pela reação entre hidrogênio e oxigênio, com 15 modelos de reação envolvendo até oito espécies; (2) Mach1D 5.0, resolve o escoamento unidimensional, reativo ou não, ao longo da tubeira para cinco modelos físicos; (3) RHG1D 3.0, resolve o problema unidimensional do escoamento na tubeira acoplado à transferência de calor na parede da tubeira e ao escoamento do refrigerante no interior dos canais; e (4) Mach2D 6.0, resolve o escoamento bidimensional, reativo ou não, ao longo da tubeira. Todos os códigos implementados, os relatórios técnicos e artigos publicados sobre o projeto estão disponíveis na internet no endereço: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/CFD/projetos/cfd5/>.

## PRODUTOS GERADOS DIRETAMENTE LIGADOS AO TEMA DO PROJETO

- 1) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Programa Gibbs 1.3**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. Programa computacional com cerca de 6000 linhas, concluído em maio/2005, com 15 modelos para cálculo de propriedades de reações químicas em equilíbrio e não-equilíbrio químico para o propelente H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. É o módulo químico do programa Mach1D.
- 2) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Relatório técnico 1: programa Gibbs 1.3**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005. Relatório com 62 páginas, concluído em maio/2005, que descreve a teoria envolvida no programa Gibbs 1.3 sobre cálculo de propriedades termodinâmicas, equilíbrio químico e temperatura de combustão.
- 3) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K.; LAROCCA, F. Evaluation of thermochemical properties and combustion temperature for LOX/LH<sub>2</sub> reaction schemes. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...** Guarapari, 2005. 16 p. XXVI CILAMCE. Artigo publicado em outubro de 2005 no congresso CILAMCE/2005.

- 4) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Projeto CFD-5: relatório técnico 2; programa Gibbs 1.3.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Relatório com 38 páginas, concluído em fev/2006, que descreve a teoria envolvida no programa Gibbs 1.3 sobre cálculo de não-equilíbrio químico e propriedades de transporte.
- 5) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Programa Mach1D 5.0.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Programa computacional com cerca de 17.700 linhas, concluído em fevereiro/2006, para solução numérica de escoamento reativo (congelado, equilíbrio e taxa finita) quase-unidimensional de fluido compressível e viscoso em tubeira com troca de calor.
- 6) TAILLANDIER, J. **Efeito do modelo matemático sobre a solução numérica do escoamento em tubeira de motor-foguete.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Trabalho de graduação em engenharia mecânica. Trabalho defendido em março/2006, envolvendo estimativa de erros numéricos e orientado pelo gerente deste projeto.
- 7) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Programa RHG1D 3.0.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Programa computacional, concluído em maio/2006, para solução numérica de escoamento reativo (congelado, equilíbrio e taxa finita) quase-unidimensional de fluido compressível e viscoso em tubeira com troca de calor e acoplado ao escoamento quase-unidimensional de líquido compressível em canais de refrigeração, e condução de calor na estrutura da tubeira. Ele envolve os programas Tubeira 1.2, Parede 1.0, Canal 2.0, Gibbs 1.4 e Mach1D 5.0.
- 8) ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Numerical solution of one-dimensional reactive flows in rocket engines with regenerative cooling. In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. **Anais...** Curitiba, 2006. 12 p. XI ENCIT. Artigo publicado em dezembro de 2006 no congresso ENCIT/2006.
- 9) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Código computacional Mach2D 6.0.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Programa computacional com cerca de 13.100 linhas, concluído em fevereiro/2007, para solução numérica de escoamento reativo (congelado, equilíbrio e taxa finita) bidimensional de fluido compressível e invíscido em tubeira.
- 10) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Relatório técnico 3 do projeto CFD-5/UFPR: programa Mach1D 5.0.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Relatório com 209 páginas,

concluído em mar/2007, que descreve a teoria e resultados do código computacional Mach1D 5.0.

- 11) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Relatório técnico 4 do projeto CFD-5/UFPR: programa RHG1D 3.0**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Relatório com 59 páginas, concluído em mar/2007, que descreve a teoria e resultados do código computacional RHG1D 3.0.
- 12) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Relatório técnico 5 do projeto CFD-5/UFPR: código Mach2D 6.0**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Relatório com 44 páginas, concluído em mar/2007, que descreve a teoria e resultados do código computacional Mach2D 6.0.

### COMENTÁRIOS GERAIS E CONCLUSÃO

Em termos de recursos humanos, a execução do projeto CFD-5 propiciou o seguinte:

- 1) Treinamento do eng. Luciano K. Araki em simulação numérica de escoamentos reativos com refrigeração em motores-foguete. Além disso, ele realizou uma visita aos laboratórios do INPE e IAE ligados à propulsão. Na mesma ocasião, participou do 1º Simpósio Brasileiro sobre Propulsão Líquida. Junto com o prof. Marchi, o eng. Araki foi o principal executor do projeto. Ele deve defender sua tese de doutorado, sobre o tema do projeto CFD-5, em agosto de 2007.
- 2) Treinamento dos estudantes de graduação em engenharia mecânica Thiago Fabricius Konopka e Jérémie Taillandier em simulação numérica de escoamentos em motores-foguete. O primeiro contou com uma bolsa de iniciação científica do CNPq e o segundo, realizou seu trabalho de graduação em tema ligado ao projeto CFD-5.
- 3) Além disso, o tema do projeto CFD-5 serviu de motivação para o desenvolvimento das teses de doutorado de Fábio Alencar Schneider, sobre erros numéricos, e de Márcio Augusto Villela Pinto e Cosmo Damião Santiago sobre otimização do método *multigrid*.

Em termos de infra-estrutura, os recursos da AEB colaboraram na manutenção do grupo de CFD da UFPR e na aquisição de dois novos computadores.

Infelizmente por diversos motivos não foi possível cumprir todas as etapas previstas no projeto CFD-5. Porém, uma nova proposta de projeto está sendo submetida a AEB para atender ao AO-01/2006 com o objetivo de concluir as etapas previstas no projeto CFD-5 e avançar em outros tópicos como a refrigeração radiativa, condução de calor e termoelasticidade bidimensionais na parede do motor.