



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

CFD-5

Palavras-chave: propulsão líquida, CFD, volumes finitos, erro numérico, H₂/O₂, *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/LH₂. 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 H₂/O₂. 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.; LAROCA, F. Evaluation of thermochemical properties and combustion temperature for LOX/LH₂ 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.