



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 DE ACOMPANHAMENTO 2

Carlos Henrique Marchi (UFPR)
Luciano Kiyoshi Araki (UFPR)
Márcio Augusto Villela Pinto (UEPG)
Cosmo Damião Santiago (UNIBRASIL)
Fábio Alencar Schneider (UNICENP)

Curitiba, 6 de junho de 2006.

RESUMO

O objetivo principal deste projeto é implementar códigos computacionais para resolver escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH₂. O problema completo é dividido em três partes acopladas:

- 1) Câmara-tubeira: escoamento reativo turbulento de uma mistura de gases na câmara de combustão e no bocal convergente-divergente (tubeira).
- 2) Paredes: condução de calor através das paredes do motor-foguete entre os gases no seu interior e o líquido refrigerante.
- 3) Canais: escoamento turbulento do líquido refrigerante nos canais em torno do motor-foguete.

Os parâmetros principais de interesse são o empuxo produzido pelo motor, a temperatura máxima atingida pela parede e a queda de pressão do escoamento do refrigerante ao longo dos canais. Sobre estes parâmetros, pretende-se avaliar os efeitos causados por: geometria da tubeira; pressão de combustão; propriedades termofísicas e de transporte constantes ou variáveis; radiação térmica; modelos unidimensionais e bidimensionais; fluido invíscido, viscoso laminar e turbulento; número de reações químicas; condição de contorno na superfície da parede do lado dos gases quentes; e número de nós das malhas usadas para discretizar os domínios de cálculo.

Também são objetivos: obter soluções numéricas de referência (*benchmarks*) para os problemas em consideração, com suas estimativas do erro numérico; e esclarecer algumas questões controvertidas da literatura. Outros objetivos do projeto são: melhorar a infra-estrutura computacional do grupo de pesquisa; formar pesquisadores pós-graduados no tema do projeto; e tornar-se o grupo de pesquisa brasileiro mais avançado no tema deste projeto.

Todos os códigos computacionais serão implementados integralmente pelos membros do projeto. As principais características do modelo numérico a ser usado são: método dos volumes finitos; sistema de coordenadas não-ortogonais ajustadas aos contornos; arranjo co-localizado de variáveis; escoamentos em qualquer regime de velocidade; aproximações numéricas de 2^a ordem de acurácia; *solver* MSI com *multigrid*.

Os resultados que se pretende alcançar ao final da execução do projeto são:

- 1) Disponibilizar através da internet, gratuitamente a qualquer interessado, bem como a AEB, INPE e CTA, os programas-fonte e os programas-executáveis de todos os códigos computacionais implementados durante a execução deste projeto.
- 2) Ter publicado ou submetido para publicação pelo menos 3 artigos em revistas científicas internacionais para divulgar a pesquisa realizada.
- 3) Editar relatórios técnicos descrevendo em detalhes a pesquisa realizada.

- 4) Aumentar a complexidade dos problemas possíveis de serem resolvidos pelo grupo de pesquisa.
- 5) Possibilitar a 4 doutorandos uma aplicação relevante para suas teses.
- 6) Aumentar a capacitação nacional na simulação de escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH₂.

Os recursos financeiros solicitados a AEB totalizam R\$ 23.500,00. O projeto está sendo executado por uma equipe de 5 pessoas de 4 universidades, que atuam na área do projeto há mais de uma década, tendo publicado 6 artigos científicos sobre o tema do projeto em congressos e revistas internacionais.

CRONOGRAMA ATUAL

O cronograma atual de execução física das atividades previstas no projeto é apresentado na tabela abaixo. O término do projeto está sendo considerado adiado conforme pedido a ser feito a AEB em carta anexa a este relatório.

Início: dezembro/2004.

Término: julho/2007.

Meta	Etapa	Atividade	Período previsto	Situação
1		Escoamento 1D Reativo		
	1a	Código RHG1D, versão 3.0	Dezembro/2004 a Julho/2005	Concluída em Mai/06.
	1b	Código RHG1D, versão 4.0	Junho a Outubro/2005	Cancelada em Mai/06.
2		Escoamento 2D Monoespécie		
	2a	Código MACH2D, versão 5.1	Janeiro a Julho/2006	Em desenvolvimento
	2b	Código MACH2D, versão 6.0	Até Setembro/2006	
3		Escoamento 2D Reativo		
	3a	Código RHG2D, versão 1.0	Até Outubro/2006	
	3b	Código RHG2D, versão 2.0	Até Novembro/2006	
	3c	Código RHG2D, versão 3.0	Até Fevereiro/2007	
		Relatórios técnicos	Até Julho/2007	

ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO

Os programas computacionais relativos à etapa 1a foram concluídos em maio/2006. A seguir são apresentados os produtos já gerados durante a execução do projeto e aqueles em andamento.

PRODUTOS JÁ GERADOS E 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.
- 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.

PRODUTOS JÁ GERADOS EM ASSUNTOS CORRELATOS AO TEMA DO PROJETO

- 8) MARCHI, C. H.; SILVA, A. F. C. Multi-dimensional discretization error estimation for convergente apparent order. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVII, p. 432-439, 2005. Sobre estimativa de erros numéricos.
- 9) MORAIS, E. L.; SCHNEIDER, F. A.; MARCHI, C. H. Verification of the discretization error of numerical solutions of flows using unstructured meshes. In: International Congress of Mechanical Engineering. **Anais...** Ouro Preto, 2005. 8 p. XVIII COBEM. Sobre estimativa de erros numéricos.
- 10) SCHNEIDER, F. A.; MARCHI, C. H. On the grid refinement ratio for one-dimensional advective problems with nonuniform grids. In: International Congress of Mechanical Engineering. **Anais...** Ouro Preto, 2005. 8 p. XVIII COBEM. Sobre estimativa de erros numéricos.
- 11) PINTO, M. A. V.; SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H. Effect of parameters of a multigrid method on the cpu time for one-dimensional problems. In: International Congress of Mechanical Engineering. **Anais...** Ouro Preto, 2005. 8 p. XVIII COBEM. Sobre *multigrid* geométrico.
- 12) PINTO, M. A. V.; SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H. Effect of parameters of a multigrid method on the cpu time for one-dimensional problems. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...** Guarapari, 2005. 13 p. XXVI CILAMCE. Sobre *multigrid* geométrico.
- 13) MORAIS, E. L. **Verificação de soluções numéricas de escoamentos laminares obtidas com o método de volumes finitos e malhas não-estruturadas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica. Dissertação defendida em dezembro/2004, sobre estimativa de erros numéricos e orientada pelo gerente deste projeto.

- 14) SUERO, R. **Verificação de soluções numéricas de escoamentos bidimensionais laminares em malhas uniformes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Dissertação de mestrado em métodos numéricos em engenharia. Dissertação defendida em fevereiro/2006, sobre estimativa de erros numéricos e orientada pelo gerente deste projeto.
- 15) HACKE, O. **Verificação de soluções numéricas de problemas termoelásticos em malhas uniformes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. Dissertação de mestrado em métodos numéricos em engenharia. Dissertação defendida em março/2006, sobre estimativa de erros numéricos e orientada pelo gerente deste projeto.

ATIVIDADES EM ANDAMENTO SOBRE ASSUNTOS DIRETAMENTE LIGADOS AO TEMA DO PROJETO

- (a) ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Effects of chemical reaction schemes and physical models on a one-dimensional flow in a rocket engine nozzle. Submetido ao Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...** Belém, 2006. 21 p. XXVII CILAMCE.
- (b) MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Evaluation of chemical equilibrium and non-equilibrium properties for LOX/LH2 reaction schemes. A submeter ao **Brazilian Journal of Chemical Engineering**; em fase final.
- (c) Relatório técnico 3, sobre o programa computacional Mach1D 5.0; em fase final.
- (d) Artigo sobre o programa computacional RHG1D 3.0 a ser submetido ao Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (**ENCIT/2006**); em fase final.
- (e) Relatório técnico 4, sobre o programa computacional **RHG1D 3.0**; em fase inicial.
- (f) Programa computacional **Mach2D 5.1**; em desenvolvimento.

ETAPAS A CUMPRIR

Conforme o cronograma atualizado, apresentado acima, as etapas a concluir são: 2a, 2b, 3a, 3b e 3c.

APLICAÇÃO DOS RECURSOS FINANCEIROS

Um resumo da aplicação dos recursos financeiros recebidos é apresentado na tabela abaixo.

Rubrica	Valor liberado	Valor gasto	Saldo	% gasto
Equipamentos e material permanente	14.000,00	14.000,00	0,00	100
Material de consumo	2.400,00	1.274,00	1.126,00	53
Serviços de terceiros – pessoa jurídica	2.000,00	637,60	1.362,40	32
Serviços de terceiros – pessoa física	1.000,00	0,00	1.000,00	0
Passagens	3.300,00	393,10	2.906,90	12
Diárias	800,00	480,00	320,00	60
Total	23.500,00	16.784,70	6.715,30	71

Valores em R\$

COMENTÁRIOS GERAIS E CONCLUSÃO

No dia 10 de maio de 2005, o eng. Fausto Ivan Barbosa visitou a UFPR para avaliar o desenvolvimento do projeto. Na ocasião ele recebeu uma cópia do relatório técnico 1. A segunda visita do eng. Barbosa deverá ocorrer em junho de 2006, quando será entregue uma cópia do relatório técnico 2.

O eng. Luciano K. Araki realizou a visita prevista no projeto ao INPE e IAE no período de 28 de junho a 2 de julho de 2005. Na ocasião, além de visitar os laboratórios destas instituições, participou do 1º Simpósio Brasileiro sobre Propulsão Líquida.

Até o início deste ano, a equipe do projeto foi a mesma descrita no relatório de acompanhamento 1, de abril de 2005, exceto quanto ao eng. Fernando Laroca que se desligou do projeto. A partir do início deste ano, juntaram-se a equipe mais quatro pessoas: três doutorandas nas áreas de erros numéricos e *multigrid* e um aluno de iniciação científica que atuará diretamente no tema do projeto, auxiliando o eng. Luciano K. Araki.

Os resultados obtidos com o método *multigrid* em problemas unidimensionais indicam que seu uso é inadequado aos programas Mach1D e RHG1D. Ele não consegue diminuir o tempo computacional e além disso piora a estabilidade do algoritmo. Portanto, a etapa 1b do projeto foi cancelada. Os estudos com o método *multigrid* para problemas bidimensionais estão em desenvolvimento. Dependendo dos resultados, pretende-se incluir o método *multigrid* no programa Mach2D.

A equipe ainda pretende executar o projeto original. Mas, para tanto, espera-se que a AEB aceite a prorrogação de prazo que está sendo solicitada, para concluir o projeto em julho de 2007.