



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

AEB-3 / CFD-14

Período de execução previsto: 2 anos (Junho/2010 a Maio/2012)

Palavras-chave: propulsão líquida, CFD, volumes finitos, erro numérico, H_2/O_2 , *multigrid*, tubeira, câmara de combustão, refrigeração regenerativa, refrigeração radiativa, elasticidade

Projeto de pesquisa submetido à
Agência Espacial Brasileira (AEB)
para concorrer à renovação do Anúncio de Oportunidades 01/2006 do Programa UNIESPAÇO
Tema: Veículos Espaciais
Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

Carlos Henrique Marchi
Márcio Augusto Villela Pinto

Luciano Kiyoshi Araki
Ricardo Carvalho de Almeida

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Setor de Tecnologia (TC)
Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)
Caixa postal 19040, CEP 81531-980, Curitiba, PR
Telefone: (41) 3361-3126; Fax: (41) 3361-3701
e-mail: marchi@ufpr.br

Curitiba, 2 de abril de 2010.

1 RESUMO

O objetivo principal deste projeto é implementar códigos computacionais para projetar motores-foguete com refrigeração regenerativa ou radiativa. Ele consiste na continuação do projeto “Simulação numérica de escoamento reativo, transferência de calor e termoelasticidade em motor-foguete”, financiado pelo Programa UNIESPAÇO 2007-2009 da Agência Espacial Brasileira (AEB). Todos os códigos computacionais serão implementados integralmente pelos membros do projeto com a linguagem Fortran 2003 e usando o método dos volumes finitos. Os recursos financeiros aprovados pela AEB totalizam R\$ 76.000,00. O projeto será executado por uma equipe de 11 pessoas da Universidade Federal do Paraná (UFPR), sendo 4 professores e 7 doutorandos.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto é implementar códigos computacionais para projetar motores-foguete com refrigeração regenerativa e radiativa.

Os objetivos específicos são implementar códigos computacionais para:

- 1) Dentro da câmara de combustão e tubeira, resolver escoamentos bidimensionais, não-reativos e reativos (equilíbrio e taxa finita), considerando fluido viscoso (escoamento laminar e turbulento), com ou sem transferência de calor para a parede.
- 2) Otimizar o código Mach2D 5.6 (escoamento 2D laminar não-reativo), do projeto anterior, visando reduzir as necessidades de memória RAM e/ou tempo de CPU para resolver um problema.
- 3) Resolver a condução de calor bidimensional na tubeira do motor-foguete submetido à refrigeração regenerativa e radiativa.

3 METODOLOGIA

O projeto está estruturado em três metas a serem executadas em dois anos. Todos os códigos computacionais serão implementados integralmente pelos membros do projeto, empregando o método de volumes finitos e escritos com a linguagem de programação Fortran 2003. Ressalta-se que a maior parte do que será feito terá por base os códigos já implementados nos dois projetos anteriores financiados pela AEB, aumentando a chance de se atingir os objetivos definidos. O envolvimento dos pesquisadores é mencionado nas etapas pertinentes descritas abaixo; orientandos significa alunos já existentes de doutorado, orientados pelos pesquisadores do projeto, e que serão envolvidos na execução do projeto.

Meta 1: Escoamento dos gases na tubeira

O objetivo principal desta meta é implementar códigos computacionais para resolver escoamentos bidimensionais, não-reativos e reativos, de fluidos viscosos laminares e turbulentos, em tubeiras de motores-foguete.

A Meta 1 é composta de três etapas:

- 1a) Sobre o código Mach2D 6.1 (escoamento 2D laminar reativo-congelado), do projeto anterior, incluir escoamento reativo em equilíbrio químico para o propelente LOX/LH₂. Período: junho a agosto/2010 = 3 meses. Executor principal: Araki.

- 1b) Sobre o código Mach2D da etapa anterior, incluir escoamento reativo com taxa finita de reação para o propelente LOX/LH₂. Período: setembro/2010 a fevereiro/2011 = 6 meses. Executor principal: Araki.
- 1c) Sobre o código Mach2D 5.6 (escoamento 2D laminar não-reativo), do projeto anterior, incluir escoamento turbulento com o modelo algébrico de Baldwin e Lomax. Período: março/2011 a maio/2012 = 15 meses. Executores principais: Araki e Marchi.

Meta 2: Otimização do código Mach2D 5.6

O objetivo principal desta meta é otimizar o código Mach2D 5.6 (escoamento 2D laminar não-reativo), do projeto anterior. Otimizar, aqui, significa reduzir as necessidades de memória RAM e/ou tempo de CPU para resolver um problema.

A Meta 2 é composta de três etapas:

- 2a) Na primeira etapa, pretende-se: eliminar o efeito do passo de tempo sobre a solução numérica convergida até o erro de arredondamento de máquina; adaptar o código para malhas de nós centrados entre faces; melhorar a forma de aplicar condições de contorno e de calcular propriedades nas faces para reduzir o erro de discretização. Período: junho/2010 a maio/2011 = 12 meses. Executores principais: Marchi e orientando 1.
- 2b) Na segunda etapa, pretende-se testar o seguinte: método *multigrid*, computação paralela, multiextrapolação de Richardson e um estimador de erro de iteração. Os testes deverão ser feitos sobre as equações 2D de Laplace, Poisson, Burgers e Navier-Stokes incompressíveis. Período: junho/2010 a maio/2011 = 12 meses. Executores principais: Pinto, Almeida e orientandos 2 a 7.
- 2c) Na terceira etapa, pretende-se aplicar os resultados da etapa anterior sobre o código Mach2D 5.6 (escoamento 2D laminar não-reativo), do projeto anterior. Período: junho/2011 a maio/2012 = 12 meses. Executores principais: Araki, Pinto, Almeida e orientandos 2 a 7.

Meta 3: Tubeira do motor-foguete

O objetivo principal desta meta é implementar códigos computacionais para resolver a condução de calor e deslocamentos bidimensionais da tubeira de motores-foguete submetidos à refrigeração regenerativa e radiativa.

A Meta 3 é composta de duas etapas:

- 3a) Melhorar os modelos matemático e numérico usados no código Aleta2D 1.1, do projeto anterior, que resolve a condução de calor na tubeira considerando-se o escoamento na tubeira com refrigeração regenerativa. Período: junho/2010 a maio/2011 = 12 meses. Executor principal: Marchi.
- 3b) Melhorar os modelos matemático e numérico usados no código Tubeira2D 1.0, do projeto anterior, que resolve a condução de calor na tubeira considerando-se o escoamento na tubeira com refrigeração radiativa. Período: junho/2011 a maio/2012 = 12 meses. Executor principal: Marchi.

Cronograma

Na tabela abaixo, apresenta-se o cronograma de execução física das atividades previstas nas metas 1 a 3, organizado em períodos trimestrais.

Início: junho/2010.

Término: maio/2012.

Meta	Etapa	Atividade	2010		2011				2012	
			3º	4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º
1		Escoamento dos gases na tubeira								
	1a	Escoamento laminar em equilíbrio químico	X							
	1b	Escoamento laminar com taxa finita de reação	X	X	X					
	1c	Escoamento turbulento Baldwin-Lomax			X	X	X	X	X	X
2		Otimização do código Mach2D 5.6								
	2a	Redução do erro de discretização	X	X	X	X				
	2b	Testes para reduzir tempo de CPU e RAM	X	X	X	X				
	2c	Aplicação para reduzir tempo de CPU e RAM				X	X	X	X	X
3		Tubeira do motor-foguete								
	3a	Condução com refrigeração regenerativa	X	X	X	X				
	3b	Condução com refrigeração radiativa				X	X	X	X	X

4 EQUIPE TÉCNICA

O projeto será executado por uma equipe de 4 professores e 7 doutorandos. Todos os membros da equipe integram o grupo de pesquisa (registrado no CNPq) em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), da UFPR. A seguir, apresenta-se uma breve descrição dos quatro professores da equipe.

Carlos Henrique Marchi

- Título: doutor em engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2001
- Professor (desde 1994) associado da Universidade Federal do Paraná (UFPR)
- Dedicção ao projeto: 10 horas/semana
- Função no projeto: coordenar o projeto, definir modelos matemáticos e numéricos, e implementar códigos computacionais
- Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos multidimensionais em qualquer regime de velocidade, análise de erros numéricos, métodos *multigrid*

Luciano Kiyoshi Araki

- Título: doutor em métodos numéricos em engenharia, UFPR, 2007
- Professor adjunto da Universidade Federal do Paraná (UFPR), desde 2008
- Dedicção ao projeto: 10 horas/semana
- Função no projeto: implementar códigos computacionais e realizar simulações
- Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos reativos

Márcio Augusto Villela Pinto

- Título: doutor em métodos numéricos em engenharia, UFPR, 2006
- Professor adjunto da Universidade Federal do Paraná (UFPR), desde 2009
- Dedicção ao projeto: 10 horas/semana

- Função no projeto: otimizar algoritmos através de métodos *multigrid*
- Especialidades principais: análise numérica e métodos *multigrid*

Ricardo Carvalho de Almeida

- Título: doutor em ciências atmosféricas em engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2005
- Professor adjunto da Universidade Federal do Paraná (UFPR), desde 2008
- Dedicção ao projeto: 5 horas/semana
- Função no projeto: otimizar algoritmos através de computação paralela
- Especialidades principais: computação paralela

5 RECURSOS FINANCEIROS

Pretende-se aplicar os recursos financeiros a receber da Agência Espacial Brasileira no seguinte:

Custeio R\$ 4.000,00

Capital R\$ 72.000,00

Total R\$ 76.000,00

Equipamento e Material Permanente Nacional ou Importado (Total R\$ 72.000,00):

- 1) Um microcomputador ou cluster de alto desempenho com 64 ou 128 GB RAM e quatro processadores, incluindo monitor LCD e nobreak. Valor R\$ 72.000,00. Justificativa: ter um equipamento de alto desempenho para realizar simulações em malhas muito finas, para verificar e validar os códigos implementados, o que requer muita memória computacional e velocidade de processamento. Este equipamento será de uso comum a toda a equipe do projeto.

Material de Consumo Nacional ou Importado (Total R\$ 4.000,00):

- 2) Livros. Valor R\$ 4.000,00. Justificativa: atualizar a bibliografia do grupo de CFD da UFPR sobre propulsão de foguetes, métodos e erros numéricos.

6 DECLARAÇÃO

Eu, Carlos Henrique Marchi, pesquisador principal deste projeto, declaro ter conhecimento dos termos do Anúncio de Oportunidades 01/2006 e do Documento Base do Programa Uniespaço, da Agência Espacial Brasileira, e de estar de acordo com os mesmos.