



***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, H₂/O₂, *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 **Luciano Kiyoshi Araki**
Márcio Augusto Villela Pinto **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; orientando 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)
- Dedicação 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
- Dedicação 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
- Dedicação 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
- Dedicação 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.