



# *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 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 I**

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

Curitiba, 7 de abril de 2005.

## 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/LH<sub>2</sub>. O problema completo é dividido em três problemas acoplados:

- 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<sup>a</sup> 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/LH<sub>2</sub>.

Os recursos financeiros solicitados a AEB totalizam R\$ 23.500,00. O projeto está sendo executado por uma equipe de 6 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.

Início: dezembro/2004.

Término: setembro/2006.

Meta	Etapa	Atividade	Período previsto
<b>1</b>		<b>Escoamento 1D Reativo</b>	
	1a	Código RHG1D, versão 3.0	Dezembro/2004 a Julho/2005
	1b	Código RHG1D, versão 4.0	Junho a Outubro/2005
<b>2</b>		<b>Escoamento 2D Monoespécie</b>	
	2a	Código MACH2D, versão 5.0	Junho a Outubro/2005
	2b	Código MACH2D, versão 6.0	Novembro/2005 a Janeiro/2006
<b>3</b>		<b>Escoamento 2D Reativo</b>	
	3a	Código RHG2D, versão 1.0	Fevereiro a Março/2006
	3b	Código RHG2D, versão 2.0	Abril a Junho/2006
	3c	Código RHG2D, versão 3.0	Julho a Setembro/2006

### ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO

A etapa 1a vem sendo executada, conforme previsto no cronograma original. Até o fim de março/2005, com 4 meses de execução efetiva do projeto, as seguintes atividades foram ou estão sendo desenvolvidas:

### **Estimativa de erros numéricos:**

Objetivo: estimar erros de discretização de soluções numéricas unidimensionais em malhas não-uniformes.

Executores: Fábio Alencar Schneider e Carlos Henrique Marchi.

- Estudo sobre a aplicação do conceito usual de razão de refino em malhas não-uniformes unidimensionais, para o método de diferenças finitas. Produto: artigo para o COBEM/2005.
- Estudo sobre a aplicação do conceito usual de razão de refino em malhas não-uniformes unidimensionais, para o método de volumes finitos. Produto: deve resultar num artigo para o CILAMCE/2005.

### **Multigrid geométrico:**

Objetivo: acelerar o processo iterativo para reduzir substancialmente o tempo de computação necessário para obter as soluções numéricas, em relação aos métodos mais simples.

Executores: Márcio Augusto Villela Pinto, Cosmo Damião Santiago e Carlos Henrique Marchi.

- Estudo de diversos parâmetros que afetam o desempenho do método multigrid geométrico em problemas unidimensionais resolvidos com o método de diferenças finitas. Estão sendo investigados os efeitos de: número de elementos da malha, razão de engrossamento, número de níveis de malha, tolerância, condição inicial e número de iterações internas. Produto: deve resultar num artigo para o CILAMCE/2005.

### **Modelos de reação para escoamentos reativos:**

Objetivo: implementar uma biblioteca computacional para cálculo de propriedades de reações químicas em equilíbrio e não-equilíbrio envolvendo o sistema  $H_2/O_2$ .

Executores: Luciano Kiyoshi Araki e Carlos Henrique Marchi, com colaboração de Fernando Laroca.

Foi implementado o programa computacional GIBBS 1.3 com as seguintes características:

- Até 8 espécies químicas disponíveis:  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $OH$ ,  $O$ ,  $H$ ,  $HO_2$  e  $H_2O_2$ .
- Propriedades termodinâmicas e de transporte são calculadas conforme NASA TM-4513 (1993).
- O equilíbrio químico é resolvido com o método das constantes de equilíbrio, que necessita definir as reações e as espécies envolvidas, e o método de Newton simples para resolver as taxas de dissociação.
- A temperatura de combustão é resolvida com o método da bissecção.
- Linguagem FORTRAN 95.
- Aproximadamente 6000 linhas de programação.
- Aplicativo usado: Microsoft Developer Studio, Fortran PowerStation 4.0.

- Tipo de projeto: Console Application.
- O programa permite resolver 5 tipos de problemas:
  - 1) TERMO: calcular propriedades termodinâmicas e de transporte de cada espécie química, na base mássica ou molar.
  - 2) CONGELADO: calcular propriedades termodinâmicas e de transporte de uma mistura de espécies químicas.
  - 3) EQUILIBRIO: calcular a composição de uma mistura de gases; há 9 modelos disponíveis, com 0 a 18 reações de dissociação, envolvendo 3 a 8 espécies químicas.
  - 4) CÂMARA: calcular a temperatura de combustão e a composição de uma mistura de gases; há 9 modelos disponíveis, com 0 a 18 reações de dissociação, envolvendo 3 a 8 espécies químicas.
  - 5) TAXA FINITA: calcular a taxa de geração de massa por unidade de volume de cada espécie química; há 6 modelos disponíveis, com 4 a 18 reações de dissociação, envolvendo 6 ou 8 espécies químicas.

Produto: relatório a ser entregue durante a visita.

Atualmente está sendo feita a integração da biblioteca GIBBS 1.3 ao código computacional MACH1D. Isso permitirá resolver o escoamento unidimensional subsônico a supersônico, em bocal convergente-divergente, congelado, reativo em equilíbrio químico e reativo com taxa finita de reação para o propelente LOX/LH<sub>2</sub>, de uma mistura de gases com troca de calor. Esta atividade concluirá a etapa 1a do projeto. Produto: deve resultar num artigo a ser publicado no CILAMCE/2005.

### **ETAPAS A CUMPRIR**

Conforme o cronograma atualizado, apresentado acima, as etapas a concluir são: 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b e 3c.

### **APLICAÇÃO DOS RECURSOS FINANCEIROS**

Até o momento, nenhum recurso financeiro foi aplicado.

## COMENTÁRIOS GERAIS

O cronograma original do projeto, referente à meta 1, foi adaptado devido aos seguintes fatores:

- O projeto foi efetivamente celebrado, isto é, teve parte de seus recursos financeiros liberados, apenas no fim de novembro/2005. Conseqüentemente, o início do projeto ocorreu realmente em dezembro/2004, com o gerente do projeto, Marchi, iniciando a etapa 1a.
- O encarregado principal da etapa 1b, Márcio, esteve envolvido com a elaboração e defesa de seu projeto de tese até meados de dezembro/2004. Agora está integralmente voltado ao desenvolvimento do método multigríd para sua tese e o projeto. Além disso, a partir de janeiro/2005, o novo integrante da equipe, Cosmo, passou a atuar também com multigríd.
- O encarregado principal da etapa 1a, Luciano, esteve cursando disciplinas relativas ao seu curso de doutorado até meados de dezembro/2004. Agora está integralmente voltado à execução da etapa 1a.
- O principal especialista da equipe sobre escoamentos reativos, Fernando, colaborador na etapa 1a e na meta 3, se demitiu da UFPR, reduzindo drasticamente sua participação no projeto.
- O andamento do projeto está sendo prejudicado em parte pela falta dos microcomputadores previstos no projeto, que não foram adquiridos devido a não liberação dos recursos de capital em quantia suficiente para adquirir pelo menos 1 dos 2 micros.

Os recursos financeiros relativos ao ano de 2004 ainda não foram aplicados devido aos seguintes fatores:

- 87% dos recursos de custeio do projeto estão previstos para serem aplicados apenas no fim do primeiro ano e no segundo ano do projeto. Eles envolvem as duas viagens do gerente para relatar os resultados parciais e finais, publicação de artigos e a viagem de Luciano Araki às instalações do INPE e CTA sobre propulsão.
- 100% dos recursos de capital referem-se à aquisição de 2 microcomputadores. Como foram liberados até o momento apenas 38%, não foi possível adquirir nenhum dos 2 micros previstos.

## EQUIPE TÉCNICA ATUAL

Atualmente o projeto está sendo executado por uma equipe de 6 pessoas de 4 universidades:

### **Carlos Henrique Marchi**

Título: doutor em engenharia mecânica, UFSC, 2001

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cargo: professor efetivo adjunto

Dedicação ao projeto: 10 horas/semana

Função no projeto: gerenciar o projeto, 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: engenheiro mecânico, UFPR, 2003

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cargo: doutorando, bolsista CAPES

Dedicação ao projeto: 40 horas/semana

Função no projeto: implementar códigos computacionais, modelar escoamentos turbulentos

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos reativos turbulentos

### **Fernando Laroca**

Título: mestre em engenharia mecânica, UFSC, 2000

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cargo: doutorando

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: modelar escoamentos reativos

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos reativos

### **Márcio Augusto Villela Pinto**

Título: mestre em matemática e computação científica, UFSC, 1997

Instituição: Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Cargo: professor efetivo assistente

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: implementar rotinas *multigrid*

Especialidades principais: análise numérica e métodos *multigrid*

### **Cosmo Damião Santiago**

Título: mestre em métodos numéricos em engenharia, UFPR, 2001

Instituição: Complexo de Ensino Superior do Brasil (UNIBRASIL)

Cargo: professor

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: implementar rotinas *multigrid*

Especialidades principais: análise numérica e métodos *multigrid*

### **Fábio Alencar Schneider**

Título: mestre em engenharia mecânica, UFSC, 1998

Instituição: Centro Universitário Positivo (UNICENP)

Cargo: professor efetivo adjunto

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: analisar erros numéricos

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos multidimensionais, análise de erros numéricos

Todos os membros da equipe são doutorandos no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, da Universidade Federal do Paraná, orientados pelo gerente do projeto. E todos integram o Grupo de Pesquisa em Dinâmica dos Fluidos Computacional da UFPR.

## **CONCLUSÃO**

A equipe pretende executar o projeto original, tendo adaptado apenas os prazos da meta 1.

Aguardamos a liberação dos recursos financeiros referentes ao ano 2005 para adquirir os microcomputadores previstos no projeto e, assim, agilizar o seu desenvolvimento.