



# *Simulação numérica de escoamento reativo, transferência de calor e termoelasticidade em motor-foguete*

**CFD-10**

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

Projeto apoiado financeiramente pela  
Agência Espacial Brasileira (AEB)

Anúncio de Oportunidades 01/2006 do Programa UNIESPAÇO

Tema: Veículos Espaciais

Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

## **RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO 1**

**Luciano Kiyoshi Araki** (UFPR)

**Márcio Augusto Villela Pinto** (UEPG)

**Leandro Alberto Novak** (UFPR)

**Neil Franco de Carvalho** (UP)

**Ricardo Carvalho de Almeida** (UFPR)

**Cosmo Damião Santiago** (UNIBRASIL)

**Fabiana de Fátima Giacomini** (UFPR)

**Antônio Fábio Carvalho da Silva** (UFSC)

**Eduardo Matos Germer** (UFPR)

**José Miraglia** (UNIMARCO)

**José Nivaldo Hinckel** (INPE)

**Carlos Henrique Marchi**

(pesquisador principal)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 20 de abril de 2008.

## 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 em motor-foguete com refrigeração regenerativa”, financiado pelo Programa UNIESPAÇO 2004-2006 da Agência Espacial Brasileira. Os objetivos específicos são implementar códigos computacionais para: (1) dentro da câmara de combustão e tubeira, resolver escoamentos bidimensionais reativos (congelado, equilíbrio químico e taxa finita), considerando fluido viscoso com transferência de calor para a parede; (2) no caso de refrigeração regenerativa, resolver escoamentos unidimensionais do líquido refrigerante, considerando a transferência de calor da parede; (3) no caso de refrigeração radiativa, resolver a transferência de calor da parede para o ambiente externo, por convecção e radiação térmica; e (4) na parede do motor, resolver a condução de calor bidimensional bem como os campos de deslocamentos, tensões e deformações causados pelos campos de temperaturas e de escoamentos na tubeira. 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\$ 77.000,00. O projeto está sendo executado por uma equipe de 12 pessoas de 6 universidades e do INPE, sendo 6 doutores, 3 doutorandos, 1 mestre e 2 mestrands.

## CRONOGRAMA ATUAL

Na tabela abaixo são apresentados: (1) as metas, etapas e períodos previstos no projeto submetido em maio de 2007 a AEB; e (2) a situação atual de cada etapa.

Início efetivo: julho/2007.

Término previsto: junho/2009.

Meta	Etapas	Atividade	Período previsto	Situação atual
<b>1</b>		<b>Escoamento 2D não-reativo</b>		
	1a	Escoamento laminar	Jul/07-Dez/07	Em fase de conclusão
	1b	Otimizar e aplicar o código Mach2D não-reativo	Jan/08-Jun/08	Em desenvolvimento
<b>2</b>		<b>Escoamento 2D reativo</b>		
	2a	Adaptar e otimizar o código Gibbs	Jul/07-Jun/08	Em desenvolvimento
	2b	Adaptar o código Mach2D	Jul/08-Set/08	Em desenvolvimento
	2c	Otimizar e aplicar o código Mach2D reativo	Out/08-Dez/08	Não iniciada
<b>3</b>		<b>Refrigeração</b>		
	3a	Radiativa	Jan/09-Fev/09	Em fase inicial
	3b	Regenerativa	Mar/09-Abr/09	Não iniciada
	3c	Aplicações	Mar/09-Jun/09	Não iniciada
<b>4</b>		<b>Condução e termoelasticidade 2D</b>		
	4a	Condução com refrigeração radiativa	Jul/07-Dez/07	Em fase inicial
	4b	Termoelasticidade e refrigeração radiativa	Jan/08-Jun/08	Em fase inicial
	4c	Condução com refrigeração regenerativa	Jul/08-Dez/08	Em fase inicial
	4d	Termoelasticidade e refrigeração regenerativa	Jan/09-Jun/09	Em fase inicial

## ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO

A seguir são descritas as atividades já realizadas e em andamento relativas a cada etapa do projeto.

### **Meta 1: Escoamento 2D não-reativo**

O objetivo principal desta meta é implementar um código computacional para resolver escoamentos bidimensionais, não-reativos, de fluidos viscosos laminares.

A Meta 1 é composta de duas etapas:

- 1a) Incluir escoamento laminar, equações de Navier-Stokes, no código Mach2D. Isso também inclui alterações na equação da energia. Situação: os modelos matemático e numérico estão quase concluídos, faltando detalhes sobre as condições de contorno e implementar as alterações no código Mach2D.
- 1b) Otimizar e aplicar o código Mach2D não-reativo. Situação: foi detectado um problema no código Mach2D/não-reativo/Euler do projeto anterior, que está servindo de base para o projeto atual; o erro está na dependência da solução numérica com o incremento de tempo usado no processo de relaxação. Estão sendo feitos esforços para melhorar este código com a inclusão de *multigrid*, computação paralela, alteração dos algoritmos, passo de tempo variável, forma melhor de aplicar as condições de contorno, funções de interpolação mais eficientes, aproximações numéricas de 2ª ordem de acurácia nos termos químicos e o uso de múltiplas extrapolações de Richardson para reduzir as necessidades de memória e tempo de processamento para resolver um problema. Esta etapa provavelmente se estenderá até o fim do projeto.

### **Meta 2: Escoamento 2D reativo**

O objetivo principal desta meta é implementar um código computacional para resolver escoamentos bidimensionais, reativos, de fluidos viscosos laminares.

A Meta 2 é composta de três etapas:

- 2a) Adaptar e otimizar o código Gibbs para escoamento de fluido viscoso. Situação: está sendo incluído um modelo reduzido de reação no código Gibbs para testar sua utilidade em reduzir o tempo de CPU e testar a qualidade de seus resultados. Estão sendo definidas as alterações necessárias para escoamento viscoso. Estão sendo iniciados estudos para otimizar as rotinas do Gibbs.
- 2b) Adaptar o código Mach2D para escoamento reativo de fluido viscoso. Situação: os modelos matemático e numérico estão sendo definidos e deduzidos.
- 2c) Otimizar e aplicar o código Mach2D reativo viscoso. Situação: não iniciada.

### **Meta 3: Refrigeração**

O objetivo principal desta meta é implementar códigos computacionais para considerar refrigeração regenerativa e radiativa em motores-foguete.

A Meta 3 é composta de três etapas:

- 3a) Incluir refrigeração radiativa no código Mach2D da meta 2. Situação: os modelos matemático e numérico estão sendo definidos e deduzidos.
- 3b) Implementar o código RHG2D para refrigeração regenerativa. Situação: não iniciada.
- 3c) Aplicar os códigos Mach2D para refrigeração radiativa e RHG2D para refrigeração regenerativa. Situação: não iniciada.

### **Meta 4: Condução de calor e termoelasticidade 2D**

O objetivo principal desta meta é implementar códigos computacionais para resolver, na parede do motor, a condução de calor bidimensional e os campos de deslocamentos, tensões e deformações causados pelos campos de temperaturas e de escoamentos na tubeira, considerando-se refrigeração regenerativa e radiativa.

A Meta 4 é composta de quatro etapas:

- 4a) Resolver a condução de calor na parede considerando-se o escoamento na tubeira com refrigeração radiativa.
- 4b) Resolver os campos de deslocamentos, tensões e deformações causados pelos campos de temperaturas e de escoamento na tubeira com refrigeração radiativa.
- 4c) Resolver a condução de calor na parede considerando-se os escoamentos na tubeira com refrigeração regenerativa.
- 4d) Resolver os campos de deslocamentos, tensões e deformações causados pelos campos de temperaturas e de escoamentos na tubeira com refrigeração regenerativa.

Situação da meta 4: em fase inicial. Ela vem sendo desenvolvida de forma unificada, em um único modelo matemático e numérico. Isso deverá compensar o atraso inicial desta meta.

## **ETAPAS A CUMPRIR**

Conforme o cronograma atualizado, apresentado acima, nenhuma etapa ainda foi concluída. Portanto, ainda faltam todas as etapas para concluir o projeto. Porém, ressalta-se que, de acordo com o cronograma do projeto submetido em maio de 2007 a AEB, apenas as etapas 1a e 4a estão atrasadas no momento. Mas ressalta-se também que algumas etapas foram iniciadas antes do prazo previsto originalmente.

## **APLICAÇÃO DOS RECURSOS FINANCEIROS**

Um resumo da aplicação dos recursos financeiros recebidos é apresentado na tabela abaixo. Os valores são dados em R\$.

<b>Rubrica</b>	<b>Valor liberado</b>	<b>Valor gasto</b>	<b>Saldo</b>	<b>% gasto</b>
Equipamentos e material permanente	45.000,00	44.445,00	555,00	99
Material de consumo	19.000,00	13.238,06	5.761,94	70
Serviços de terceiros – pessoa jurídica	6.000,00	69,00	5.931,00	01
Serviços de terceiros – pessoa física	0,00	0,00	0,00	--
Passagens	5.000,00	0,00	5.000,00	00
Diárias	2.000,00	0,00	2.000,00	00
<b>Total</b>	<b>77.000,00</b>	<b>57.752,06</b>	<b>19.247,94</b>	<b>75</b>

## **COMENTÁRIOS GERAIS E CONCLUSÃO**

Nos cinco primeiros meses de execução do projeto, foi gasto um tempo considerável na definição e aquisição dos equipamentos e livros previstos no projeto.

As alterações da equipe do projeto até o momento são descritas a seguir. Por decisão do pesquisador principal deste projeto, o prof. Eduardo Márcio de Oliveira Lopes foi retirado da equipe do projeto. Foram incluídos na equipe do projeto: o prof. Dr. Ricardo Carvalho de Almeida, o doutorando Leandro Alberto Novak e o mestrando Eduardo Matos Germer. Eles atuarão, respectivamente, em computação paralela, múltiplas extrapolações de Richardson e funções de interpolação. Os esforços de todos eles estão voltados à otimização dos códigos computacionais em desenvolvimento.

De acordo com o cronograma do projeto submetido em maio de 2007 a AEB, apenas as etapas 1a e 4a estão atrasadas no momento. Porém, algumas etapas foram iniciadas antes do prazo previsto originalmente. O pesquisador principal acredita que o projeto original será executado até o prazo final previsto.