



## **Relatório final do projeto**

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

**CFD-10**

Período: Jul/2007 a Set/2009

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

Projeto de pesquisa financiado pela

Agência Espacial Brasileira (AEB)

Anúncio de Oportunidades 01/2006 do Programa UNIESPAÇO

Tema: Veículos Espaciais

Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

**Carlos Henrique Marchi**

(coordenador do projeto CFD-10)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 4 de setembro de 2009.

## **1 RESUMO**

O objetivo principal do projeto CFD-10 era implementar códigos computacionais para projetar motores-foguete com refrigeração regenerativa e radiativa, operando com o sistema LOX/LH<sub>2</sub>. Os parâmetros principais de interesse eram o empuxo produzido pelo motor e a temperatura máxima atingida pela parede da tubeira. A Agência Espacial Brasileira (AEB), através do Programa Uniespaço (AO-01/2006), financiou este projeto com R\$ 77.000,00. O projeto foi executado por uma equipe de 13 pessoas. Os principais produtos gerados são: seis códigos computacionais; cinco relatórios técnicos; sete trabalhos publicados em periódicos e eventos; e conclusão de uma tese, três dissertações, um trabalho de iniciação científica e dois trabalhos de graduação. Todos os códigos implementados e seus resultados, os relatórios técnicos, trabalhos e artigos publicados do projeto estão disponíveis na internet no endereço: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/CFD/projetos/cfd10/> e <ftp://ftp.demec.ufpr.br/CFD/>.

## **2 METAS DO PROJETO**

O projeto foi estruturado em quatro metas, a serem executadas em dois anos. O título, objetivo e percentual executado de cada meta são apresentados a seguir.

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

Objetivo: implementar um código computacional para resolver escoamentos bidimensionais, não-reativos, de fluidos viscosos laminares. Executado: 75%.

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

Objetivo: implementar um código computacional para resolver escoamentos bidimensionais, reativos, de fluidos viscosos laminares. Executado: 90%.

### **Meta 3: Refrigeração**

Objetivo: implementar códigos computacionais para considerar refrigeração regenerativa e radiativa em motores-foguete. Executado: 90%.

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

Objetivo: 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. Executado: 40%.

## **3 PRODUTOS GERADOS**

Os produtos gerados com a execução deste projeto foram:

### **6 Códigos computacionais:**

- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Programa Mach2D 5.6**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Programa computacional com cerca de 5.400 linhas, concluído em março/2009, para solução numérica de escoamentos bidimensionais, não-reativos, de fluidos viscosos laminares.
- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. **Programa Mach2D 6.1**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Programa computacional com cerca de 12.150 linhas, concluído em julho/2009, para solução numérica de escoamentos bidimensionais, reativos (congelado e equilíbrio químico), de fluidos viscosos laminares.

- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. **Programa RHG2D 1.0**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Programa computacional com cerca de 6.100 linhas, concluído em julho/2009, para solução numérica de escoamento reativo (congelado e equilíbrio químico local) bidimensional 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, bem como efeito de refrigeração radiativa.
- MARCHI, C. H. **Programa Aleta2D 1.1**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Programa computacional com cerca de 1.400 linhas, concluído em julho/2009, para solução numérica da condução de calor bidimensional, na parede de um canal da tubeira com refrigeração regenerativa.
- MARCHI, C. H. **Programa Parede2D 1.1**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Programa computacional com cerca de 2.500 linhas, concluído em agosto/2009, para solução numérica da condução de calor bidimensional, na seção longitudinal da tubeira com refrigeração regenerativa.
- MARCHI, C. H. **Programa Richardson 3.1**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Programa computacional com cerca de 2.900 linhas, concluído em dezembro/2007, para analisar e estimar o erro de discretização com base na extrapolação de Richardson.

### **5 Relatórios técnicos:**

- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. **Relatório técnico do projeto CFD-10/UFPR: códigos Mach2D 6.1 e RHG2D 1.0**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. 63 p.
- ARAKI, L. K. **Modificação da condição de contorno de entrada: modelos parcialmente catalítico e não catalítico para escoamentos com taxa finita de reação**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. 7 p.
- ARAKI, L. K. **Testes com modificações no transporte de informações para o modelo de equilíbrio químico local**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. 4 p.
- ARAKI, L. K. **Testes preliminares do modelo reduzido (modelo 13)**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. 7 p.
- ALMEIDA, R. C. **Análise preliminar da eficiência de diferentes métodos de paralelização na solução numérica da equação de Laplace**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. 9 p.

### **1 Artigo publicado em periódico:**

- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Effects of chemical and physical models on a one-dimensional flow in a rocket nozzle. **Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications**, v. 1, n. 2, p. 1-13, 2008.

### **1 Artigo aceito para publicação em periódico:**

- MARCHI, C. H.; SUERO, R.; ARAKI, L. K. The lid-driven square cavity flow: numerical solution with a 1024x1024 grid. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXXI, 13 p., 2009. (Aceito para ser publicado em 2009.)

### **1 Artigo submetido a periódico:**

- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Numerical solution of reactive flow in nozzle with regenerative cooling. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2008

### **6 Artigos apresentados/publicados em congressos:**

- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Effects of chemical and physical models on flows in rocket engine nozzles. In: XXIX CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE). **Anais...** Maceió, 2008.

- MARCHI, C. H.; NOVAK, L. A.; SANTIAGO, C. D. Múltiplas extrapolações de Richardson para reduzir e estimar o erro de discretização da equação de Laplace 2D. In: XXIX CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE). **Anais...** Maceió, 2008.
- MARCHI, C. H.; SUERO, R. The lid-driven square cavity flow: numerical solution with a 1024x1024 grid. In: XXIX CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE). **Anais...** Maceió, 2008.
- SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H. Parâmetros ótimos do método multigrid geométrico CS e FAS para problemas 2D com duas equações. In: XXIX CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA (CILAMCE). **Anais...** Maceió, 2008.
- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Verification of numerical solution of two-dimensional reactive flow in rocket engine nozzles. In: XIX INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM). **Anais...** Brasília, 2007.
- SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H. Optimum parameters of a geometric multigrid for a two-dimensional problem of two-equations. In: XIX INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM). **Anais...** Brasília, 2007.

### **1 Tese de doutorado concluída e orientada pelo coordenador do projeto:**

- ARAKI, L. K. **Verificação de soluções numéricas de escoamentos reativos em motores-foguete.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Tese de doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia.

### **3 Dissertações de mestrado concluídas e orientadas pelo coordenador do projeto:**

- GERMER, E. M. **Verificação de funções de interpolação em advecção-difusão 1D com volumes finitos.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.
- GIACOMINI, F. F. **Verificação da forma de aplicar condições de contorno em problemas unidimensionais com o método dos volumes finitos.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.
- PERTSCHI, C. T. L. **Esquemas de cálculo da condutividade térmica nas faces de volumes finitos.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

### **2 Projetos de tese de doutorado defendidos e aprovados, e orientados pelo coordenador do projeto:**

- CARVALHO, N. F. **Proposta de uma nova função de interpolação em advecção-difusão 2D para volumes finitos.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica.
- SANTIAGO, C. D. **Otimização do método *multigrid* geométrico para sistemas de equações 2D em CFD.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica.

### **1 Trabalho de iniciação científica concluído e orientado pelo coordenador do projeto:**

- KONOPKA, T. F. **Simulação numérica de escoamento reativo bidimensional em tubeiras.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Trabalho de graduação em Engenharia Mecânica.

## **2 Trabalhos de graduação concluídos e orientados pelo coordenador do projeto:**

- OLIVEIRA, T. H. S. **Esquemas de cálculo da condutividade térmica nas faces de volumes finitos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2008. Trabalho de graduação em Engenharia Mecânica.
- CHIQUITO, P. R. **Desempenho de motor-foguete sem tubeira, a propelente sólido, de espaçomodelo**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2007. Trabalho de graduação em Engenharia Mecânica.

## **4 MATERIAL ADQUIRIDO**

A infra-estrutura do grupo de pesquisa em CFD, da UFPR, foi melhorada com os recursos financeiros deste projeto. Foram adquiridos:

- 2 computadores com processador Intel Xeon quad-core de 2,66 GHz e 32 GB RAM
- 1 computador com processador Intel Core 2 Quad de 2,4 GHz e 8 GB RAM
- 1 computador com processador Intel Core 2 Duo de 2,66 GHz e 4 GB RAM
- 1 impressora laser colorida HP 2600
- 1 compilador Fortran Intel 11.0
- 1 sistema operacional Windows Vista 64 bits
- 1 software VTune 9.1
- 20 livros técnicos
- Toners para impressoras
- Papel A4
- Passagens e diárias
- Fotocópias e encadernações
- Traduções de artigos
- Pentas de memória RAM

## **5 EQUIPE PARTICIPANTE**

A equipe que efetivamente participou da execução do projeto foi a seguinte:

### **Professores doutores**

Carlos Henrique Marchi  
Luciano Kiyoshi Araki  
Ricardo Carvalho de Almeida

### **Mestres/doutorandos**

Leandro Alberto Novak  
Cosmo Damiano Santiago  
Neil Franco de Carvalho  
Roberta Suero

### **Graduados/mestrados**

Eduardo Matos Germer  
Fabiana de Fátima Giacomini  
Caroline de Toledo Lima Pertschi

### **Graduandos**

Thiago Fabricius Konopka  
Paulo Roberto Chiquito  
Thaís Helena Santana de Oliveira

## **6 COMENTÁRIOS FINAIS**

Diversas ações, relacionadas ao projeto, ainda estão em andamento, destacando-se:

- três trabalhos serão submetidos ao CILAMCE/2009 em setembro/2009;
- seis trabalhos estão em fase de redação, devendo serem submetidos a periódicos durante o ano 2009 e início de 2010;
- em junho/2009, foi submetido a AEB uma proposta para continuação do presente projeto; e
- um novo projeto será submetido a AEB, AO-2009, ainda neste mês de setembro/2009.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos à Agência Espacial Brasileira (AEB) pelo apoio financeiro nestes últimos cinco anos, através do Programa Uniespaço. Os dois projetos financiados pela AEB motivaram a equipe e proporcionaram avançar nas pesquisas realizadas no grupo de CFD da UFPR.