



Relatório final do projeto

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

CFD-14 / AEB-3

Período: Out/2009 a Dez/2012

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)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 12 de fevereiro de 2013.

1 - RESUMO

O objetivo principal do projeto CFD-14/AEB-3 era implementar códigos computacionais para projetar motores-foguete com refrigeração regenerativa e radiativa, operando com o sistema LOX/LH₂. 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\$ 76.000,00. O projeto foi executado por uma equipe de 22 pessoas. Os principais produtos gerados são: 4 códigos computacionais; 4 relatórios técnicos; 17 trabalhos publicados em periódicos e eventos; e conclusão de 6 teses, 3 trabalhos de iniciação científica e 2 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/cfd14/> e <ftp://ftp.demec.ufpr.br/CFD/>.

2 - METAS DO PROJETO

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

Meta 1: escoamento dos gases na tubeira

Objetivo: implementar códigos computacionais para resolver escoamentos bidimensionais, não-reativos e reativos, de fluidos viscosos laminares e turbulentos, em tubeiras de motores-foguete. Executado: 100%.

Meta 2: otimização do código Mach2D 5.6

Objetivo: 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. Embora tenha sido feito um grande esforço para incluir multigrid nos códigos, não tivemos sucesso até o momento; mas o esforço continua. Em relação ao estimador de erro de iteração, decidimos usar um procedimento que elimina o erro de iteração, que é mais confiável do que estimar o erro de iteração; além disso, este erro prejudica o uso de multiextrapolação de Richardson. Executado: 90%.

Meta 3: tubeira do motor-foguete

Objetivo: implementar códigos computacionais para resolver a condução de calor bidimensional na tubeira de motores-foguete submetidos à refrigeração regenerativa e radiativa. Esta meta foi definida antes da conclusão do projeto (CFD-10) anterior, com o qual se verificou que a bidimensionalidade tem pequeno efeito neste tipo de problema. Em função deste resultado, decidiu-se pela eliminação desta meta. Executado: 0%.

3 - RESULTADOS ALCANÇADOS

Os resultados alcançados pelos três pesquisadores (C. H. Marchi, L. K. Araki e M. A. V. Pinto) responsáveis pela execução do projeto foram:

4 aplicativos computacionais relevantes implementados:

- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. C.; BERTOLDO, G. **Mach2D 5.8** (1989-2012): solução numérica das equações de Euler e Navier-Stokes (laminar e turbulento) bidimensionais, em qualquer regime de velocidade, utilizando-se variáveis co-localizadas em coordenadas generalizadas de escoamentos não-reativos. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. C.; BERTOLDO, G. **Mach2D 6.2** (1989-2012): solução numérica das equações de Euler e Navier-Stokes (laminar) bidimensionais, em qualquer regime de velocidade, utilizando-se variáveis co-localizadas em coordenadas generalizadas de escoamentos reativos (congelado, equilíbrio químico local e taxa finita de reação). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.
- MARTINS, M. A.; PINTO, M. A. V.; ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. **Interp1D** (2011-2012): interpolação polinomial unidimensional de grau 1 a 10 para multiextrapolação de Richardson. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.
- MARTINS, M. A.; PINTO, M. A. V.; ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. **Interp2D** (2012): interpolação polinomial bidimensional de grau 1 a 6 para multiextrapolação de Richardson. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

4 relatórios de pesquisa preparados:

- MARCHI, C. H.; BERTOLDO, G. **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: modelagem de escoamento turbulento (Baldwin-Lomax) do código Mach2D**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 26 p.
- MORO, D. F.; BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: solução de escoamentos invíscidos, laminares e turbulentos com o código Mach2D 5.8**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 16 p.
- MORO, D. F.; BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: testes de paralelização do código Mach2D**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 7 p.
- ARAKI, L. K.; BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. **Relatório técnico do projeto CFD-14/UFPR: solução de escoamentos reativos com o código Mach2D 6.2**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 39 p.

5 artigos publicados em periódicos:

- 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, n. 3, p. 186-198, 2009.
- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Verification of numerical solutions for reactive flows in a regeneratively cooled nozzle. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXXII, n. 3, p. 267-275, 2010.
- SUERO, R.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K.; ALVES, A. C. Analysis of algebraic multigrid parameters for two-dimensional steady-state heat diffusion equations. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, p. 2996-3006, 2012.
- OLIVEIRA, F.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Optimized partial semicoarsening multigrid algorithm for heat diffusion problems and anisotropic grids. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, p. 4665-4676, 2012.
- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K.; ALVES, A. C.; SUERO, R.; GONÇALVES, S. F. T.; PINTO, M. A. V. Repeated Richardson extrapolation applied to the two-dimensional Laplace equation using triangular and square grids. **Applied Mathematical Modelling**, publicado online em 6 Out 2012.

9 artigos publicados em congressos:

- MARCHI, C. H.; GERMER, E. M. Verificação de esquemas advectivo-difusivos 1D com e sem múltiplas extrapolações de Richardson. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...** Armação de Búzios, 2009. 11 p. XXX CILAMCE.
- GIACOMINI, F. F.; MARCHI, C. H. Verificação da forma de aplicar condições de contorno em problemas unidimensionais com o método dos volumes finitos. In: Iberian Latin-American

Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...** Armação de Búzios, 2009. 16 p. XXX CILAMCE.

- CARVALHO, N. F.; MARCHI, C. H. Avaliação de esquemas numéricos para problemas difusivos 2D resolvidos com volumes finitos. In: Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. **Anais...** Armação de Búzios, 2009. 14 p. XXX CILAMCE.
- OLIVEIRA, F.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Efeito de malhas anisotrópicas bidimensionais sobre o desempenho do método multigrid geométrico. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais...** Campina Grande, 2010. 10 p. VI CONEM.
- SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H.; SOUZA, L. F. Análise do desempenho do método multigrid geométrico com a formulação função de corrente e velocidade. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais...** Campina Grande, 2010. 10 p. VI CONEM.
- SUERO, R.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K.; ALVES, A. C. Otimização do método multigrid algébrico para as equações bidimensionais de Laplace e Poisson. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. **Anais...** Campina Grande, 2010. 10 p. VI CONEM.
- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K.; ALVES, A. C.; SUERO, R.; GONÇALVES, S. F. T.; PINTO, M. A. V. Solutions of the 2D Laplace equation with triangular grids and multiple Richardson extrapolations. In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. **Anais...** Uberlândia, 2010. 7 p. XIII ENCIT.
- MARCHI, C. H.; MARTINS, M. A. Effect of p-norms on the accuracy order of numerical solution errors in CFD. In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. **Anais...** Uberlândia, 2010. 10 p. XIII ENCIT.
- SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H.; SOUZA, L. F. Performance of the multigrid method with alternative formulations for the Navier-Stokes equations. In: Brazilian Congress of Mechanical Engineering **Anais...** Natal, 2011. 10 p. XXI COBEM.

3 resumos de artigos publicados em congressos:

- MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Efeito de hardware e software sobre o erro de arredondamento em condução de calor 1D e 2D. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR. **Anais...** Curitiba, 2011. p. 255. EVINCI/2011.
- MORO, D. F.; MARCHI, C. H.; BERTOLDO, G.; ARAKI, L. K. Verificação e validação de soluções numéricas em tuberias de motores-foguete. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR. **Anais...** Curitiba, 2012. p. 293. EVINCI/2012.
- DIAS, E. L. S.; MARCHI, C. H.; MORO, D. F.; ARAKI, L. K. Determinação do desempenho de motores-foguete Bandeirante dos tipos B6-4, C20-0 e D20-0 para espaçomodelos. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR. **Anais...** Curitiba, 2012. p. 293. EVINCI/2012.

6 teses de doutorado concluídas:

- OLIVEIRA, F. **Efeito de malhas anisotrópicas bidimensionais sobre o desempenho do método multigrid geométrico.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- SUERO, R. **Otimização do método multigrid algébrico para problemas difusivos bidimensionais.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Tese de doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia. Orientador: MARCHI, C. H.
- ALVES, A. C. **Verificação de soluções numéricas da equação de Laplace 2D com malhas triangulares e múltiplas extrapolações de Richardson.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

- SANTIAGO, C. D. **Otimização de parâmetros do método multigrid para sistemas de equações 2D em CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- CARVALHO, N. F. **Esquemas para calcular a condutividade térmica nas faces de volumes finitos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- NOVAK, L. A. **Múltiplas extrapolações de Richardson para reduzir e estimar o erro de discretização em condução de calor**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

Dissertações de mestrado concluídas: nenhuma

2 projetos (qualificações) de doutorado aprovados:

- RADTKE, J. J. **Otimização do bocal divergente de tubeiras de foguetes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Projeto de tese de doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia. Orientador: MARCHI, C. H.
- GERMER, E. M. **Efeito da geometria do bocal convergente de tubeiras de motor-foguete**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

2 trabalhos de graduação concluídos:

- JOECKEL, R. D. N. **Efeito da precisão dos cálculos em CFD com múltiplas extrapolações de Richardson**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Trabalho de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- ROLAND, M. S. M. **Verificação da influência da viscosidade e da transferência de calor por convecção em soluções numéricas de escoamentos reativos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Trabalho de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.

3 trabalhos de iniciação científica concluídos:

- HALILA, G. L. O. **Comparação entre modelos físicos e químicos em escoamentos reativos em motores-foguete**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2010. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.
- MORO, D. F. **Simulação numérica de escoamento em tubeira de motor-foguete; e Efeito do hardware e software sobre o erro de arredondamento em CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- SANTOS, D. F. **Estudo do efeito do uso de diferentes razões de mistura combustível/oxidante sobre os parâmetros de propulsão em motores-foguete**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.

4 MATERIAL ADQUIRIDO

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

- 1 workstation Dell Precision T7500 com 2 processadores Intel Xeon X5690 (6 core) de 3,47 GHz, 2,4 TB de HD e 192 GB de RAM, monitor de 24" e nobreak
- 15 livros técnicos

5 EQUIPE PARTICIPANTE

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

3 professores doutores

Carlos Henrique Marchi
Luciano Kiyoshi Araki
Márcio Augusto Villela Pinto

13 mestres/doutorandos

Guilherme Bertoldo
Márcio André Martins
Jonas Joacir Radtke
Eduardo Matos Germer
Fabiana de Fátima Giacomini
Arileide Cristina Alves
Roberta Suero
Fabiane de Oliveira
Simone de Fátima Tomazzoni Gonçalves
Neil Franco de Carvalho
Leandro Alberto Novak
Cosmo Damião Santiago
Ana Paula da Silveira Vargas

1 graduando/mestrando

Diego Fernando Moro

5 graduandos

Éderson Luiz dos Santos Dias
Rayana Dal'Negro Joeckel
Murilo Sant'anna Mazur Roland
Gustavo Luiz Olichevis Halila
Diogo Figueiredo dos Santos

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Agência Espacial Brasileira (AEB) pelo apoio financeiro a este projeto, através do Programa Uniespaço, que motivou a equipe e proporcionou avanços nas pesquisas realizadas no grupo de CFD da UFPR.

Principalmente devido ao apoio da AEB, através do financiamento de quatro projetos do Uniespaço desde 2004, a partir de 2012 o grupo de CFD da UFPR passou a se chamar grupo de CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes.