



Relatório técnico de execução parcial da UFPR do projeto

Validação em propulsão e aerodinâmica de foguetes

CFD-19

Período: 2012

Projeto número 20 financiado pela
Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)
Edital PRÓ-ESTRATÉGIA 50/2011

Carlos Henrique Marchi (UFPR)
(Coordenador-geral)

Curitiba, 30 de janeiro de 2013.

1 - RESULTADOS ALCANÇADOS

Os resultados alcançados pelos três pesquisadores (C. H. Marchi, L. K. Araki e M. A. V. Pinto) da equipe da UFPR com a execução do projeto durante o seu primeiro ano (2012) foram:

Artigos publicados em periódicos:

- 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.

Artigos publicados em congressos: nenhum

Resumos de artigos publicados em congressos:

- MORO, D. F.; MARCHI, C. H.; BERTOLDO, G.; ARAKI, L. K. Verificação e validação de soluções numéricas em tubeiras 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.

Teses de doutorado concluídas:

- 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

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.
- BERTOLDO, G. **Otimização aerodinâmica do nariz de foguetes nos regimes supersônico e hipersônico**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

Trabalhos de graduação concluídos:

- 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.

Trabalhos de iniciação científica concluídos:

- 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.

Aplicativos computacionais relevantes implementados:

- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. C.; BERTOLDO, G. **Mach2D 5.8 e 6.2 (1989-2012): solução numérica das equações de Euler e Navier-Stokes (laminar e turbulento) bidimensionais, em qualquer regime de velocidade, utilizando-se variáveis colocalizadas em coordenadas generalizadas de escoamentos não-reativos e reativos (congelado, equilíbrio químico local e taxa finita de reação)**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

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.

2 - COMENTÁRIOS ADICIONAIS**Artigos submetidos a periódicos:**

- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Verification and validation of numerical solutions of two-dimensional reactive flow in rocket engine nozzles. Submetido a **International Journal for Numerical Methods in Fluids**.
- MARCHI, C. H.; NOVAK, L. A.; SANTIAGO, C. D.; VARGAS, A. P. S. "Highly accurate numerical solutions with repeated Richardson extrapolation for 2D Laplace equation. Submetido a **Applied Mathematical Modelling**.
- MARCHI, C. H.; MARTINS, M. A.; PINTO, M. A. V.; GROSSI, L.; LA GUARDIA, G. G.; ARAKI, L. K.; GONÇALVES, S. F. T. Effect of norms on the accuracy order of

numerical solution errors in CFD. Submetido a **Mathematics and Computers in Simulation**.

Artigos submetidos a congressos: nenhum

Orientações em andamento (28 Jan 2013):

Orientador principal	Marchi	Araki	Pinto	Total
Iniciação científica	3	5	1	9
Trabalho de fim de curso	0	0	0	0
Mestrado	2	2	2	6
Doutorado	8	0	0	8
Total	13	7	3	23

Citações de artigos publicados em periódicos:

- 6 = MARCHI, C. H.
- 1 = ARAKI, L. K.
- 0 = PINTO, M. A. V.

Total = 7

Projetos (com financiamento e além do presente) executados no período:

- CFD-10/AEB-2 e CFD-14/AEB-3: **Simulação numérica de escoamento reativo, transferência de calor e termoelasticidade em motor-foguete**. Financiador: Agência Espacial Brasileira (AEB). Total: R\$ 153.000,00. Coordenador: MARCHI, C. H.
- CFD-8/CNPq/CAPES e CFD-7/FA: **Otimização do método multigrid para problemas de mecânica computacional**. Financiadores: CNPq (processo 475885/2006-6) e Fundação Araucária (Paraná) (protocolo 9174). Total: R\$ 55.530,00. Coordenador: MARCHI, C. H.
- AEN-2/CNPq: **Desenvolvimento de minifoguetes educativos (espaçomodelos) para difusão e popularização da Astronáutica**. Financiador: CNPq (processo 550729/2008-9). Total: R\$ 71.846,00. Coordenador: MARCHI, C. H.
- CFD-17 e CFD-18/CNPq/CAPES: **Multiextrapolação de Richardson para reduzir e estimar o erro de discretização em CFD**. Financiador: CNPq (processos 303055/2010-3 e 477348/2011-4). Total: R\$ 59.600,00. Coordenador: MARCHI, C. H.
- **Simulação numérica do processo de combustão do par propelente H₂/O₂ em motores-foguete**. Financiador: Agência Espacial Brasileira (AEB). Total: R\$ 21.000,00. Coordenador: ARAKI, L. K.
- **Simulação numérica de escoamentos compressíveis em motores-foguete**. Financiador: CNPq. Total: R\$ 15.000,00. Coordenador: ARAKI, L. K.

Atividades administrativas relevantes ligadas à pesquisa de C. H. Marchi:

- **Fundador e líder** (desde a sua criação no ano de 2002) do grupo de pesquisa em **CFD, propulsão e aerodinâmica de foguetes**, da UFPR, registrado no Diretório Nacional dos Grupos de Pesquisas do CNPq e certificado pela UFPR. Este grupo de pesquisa é integrado atualmente por 10 pesquisadores, 21 alunos (7 de graduação, 6 de mestrado e 8 de doutorado) e 1 técnico, totalizando 32 pessoas.
- **Fundador e coordenador** (desde a sua criação no ano de 1995) do **Laboratório de Experimentação Numérica (LENA)**, da UFPR.
- **Fundador e coordenador** (desde a sua criação no ano de 2011) do **Laboratório de Atividades Espaciais (LAE)**, da UFPR.

- Desde 2012, editor associado da área de propulsão e combustão do periódico **Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications**, publicado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), de São José dos Campos, SP.
- Desde 2010, membro do corpo editorial e revisor de artigos submetidos ao periódico **Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications**, publicado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), de São José dos Campos, SP.
- Desde 2010, revisor de artigos submetidos ao periódico **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, de Hong Kong, e incluído no Web of Science do ISI.
- Desde 2011, revisor de artigos submetidos ao periódico **Journal of Applied Mathematics**, publicado pela editora Hindawi Publishing Corporation, dos Estados Unidos, e incluído no Web of Science do ISI.
- Desde 2012, revisor de artigos submetidos ao periódico **Computers and Fluids**, publicado pela editora Elsevier, da Holanda, e incluído no Web of Science do ISI.
- Desde 2012, revisor de artigos submetidos ao periódico **International Journal of Aerospace Engineering**, publicado pela editora Hindawi Publishing Corporation, dos Estados Unidos, e incluído no Web of Science do ISI.

Previsão de conclusão de orientações e defesas em 2013:

4 = Doutorado (Simone, Ana Paula, Fabiana, Martins)

2 = Mestrado (Anúnciação, Réverton)

2 = Trabalho de graduação (Diego, Jonathas)

8 = Iniciação científica

Outras atividades executadas:

- Diversas reuniões e atividades da equipe que está implementando o código computacional Mach2D 7.0, que será a base do código VonBraun.
- Planejamento das atividades para 2013.
- Versão preliminar, para teste, do site do projeto.
- 102 testes estáticos de motores-foguete de espaçomodelos.

3 - JUSTIFICATIVA

Os resultados descritos acima se referem ao ano inteiro de 2012 porque o projeto CFD-19 teve seu início em janeiro de 2012, quando foi concebido e iniciada a sua estruturação e redação.

A UFPR não executou nenhum pagamento durante o período devido aos seguintes fatos:

- O anúncio da aprovação do projeto foi feito em 10 Jul 2012.
- A conta bancária para recebimento dos recursos financeiros foi aberta em 20 Ago 2012.
- O primeiro depósito da CAPES foi feito em 18 Out 2012.
- A CAPES não nos informou sobre este depósito.
- Tivemos conhecimento deste depósito apenas em 21 Nov 2012.
- Recebi esclarecimentos da CAPES sobre dúvidas a respeito da prestação de contas em 10 Dez 2012.
- Como já estava muito próximo do fim do ano e era necessário planejar as compras em função dos esclarecimentos recentes da CAPES, decidimos não executar gastos até 31 Dez 2012.

4 - ESTÁGIO DE CONSECUÇÃO DAS METAS ESTABELECIDAS

Meta 1: rede de pesquisa

- Etapa 1.1: implantar a rede. Em andamento.
- Etapa 1.2: publicar trabalhos. Executado o relativo ao ano de 2012.
- Etapa 1.3: incluir novos membros na rede. Em andamento.

Meta 2: obter resultados experimentais já existentes.

- Etapa 2.1: dados aerodinâmicos da equipe do IAE. Alguns resultados já foram recebidos; outros serão recebidos até março de 2013.
- Etapa 2.2: dados propulsivos da equipe do ITA. Em andamento.
- Etapa 2.3: dados propulsivos da equipe da UnB. Em andamento.
- Etapa 2.4: dados propulsivos da equipe do INPE. Em andamento.
- Etapa 2.5: dados aerodinâmicos de outras fontes. Em andamento.
- Etapa 2.6: dados propulsivos de outras fontes. Em andamento.

Meta 3: realizar novos experimentos.

- Etapa 3.1: experimentos aerodinâmicos da equipe do IAE. Em andamento.
- Etapa 3.2: experimentos propulsivos da equipe do ITA. Em andamento.
- Etapa 3.3: experimentos propulsivos da equipe da UnB. Em andamento.
- Etapa 3.4: experimentos propulsivos da equipe do INPE. Em andamento.
- Etapa 3.5: experimentos propulsivos da equipe da UFPR. Em andamento; 102 testes estáticos de motores-foguete de espaçomodelos foram realizados em 2012.

Meta 4: código computacional VonBraun

- Etapa 4.1: otimizar os subcódigos. Em andamento; foram publicados 4 relatórios técnicos a respeito.
- Etapa 4.2: melhorar os subcódigos. Em andamento; foram publicados 4 relatórios técnicos a respeito.
- Etapa 4.3: ampliar os subcódigos. Em andamento.
- Etapa 4.4: verificar os subcódigos. Em andamento.
- Etapa 4.5: criar a primeira versão completa do código computacional VonBraun. Em andamento.
- Etapa 4.6: validar o código VonBraun com resultados experimentais já existentes. Em andamento.
- Etapa 4.7: treinar usuários das equipes do projeto interessadas no código VonBraun. A ser realizado.
- Etapa 4.8: validar o código VonBraun com os novos experimentos das equipes. A ser realizado.
- Etapa 4.9: gerar nova versão completa do código VonBraun. A ser realizado.
- Etapa 4.10: divulgar o código VonBraun. A ser realizado.

Meta 5: formar e aperfeiçoar pessoal

- Etapa 5.1: doutores. Executado o relativo ao ano de 2012.
- Etapa 5.2: mestres. Em andamento.

5 – CRONOGRAMA ATÉ A CONCLUSÃO DO PROJETO

Início: janeiro/2013.

Término: janeiro/2017.

Duração: 49 meses

Meta 1: rede de pesquisa. Período: jan/13 a jan/17.

- Etapa 1.1: implantar a rede. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 1.2: publicar trabalhos. Período: jan/13 a jan/17.
- Etapa 1.3: incluir novos membros na rede. Período: jan/13 a jan/17.

Meta 2: obter resultados experimentais já existentes. Período: jan/13 a mai/14.

- Etapa 2.1: dados aerodinâmicos da equipe do IAE. Período: jan/13 a mai/13.
- Etapa 2.2: dados propulsivos da equipe do ITA. Período: jan/13 a mai/13.
- Etapa 2.3: dados propulsivos da equipe da UnB. Período: jan/13 a mai/13.
- Etapa 2.4: dados propulsivos da equipe do INPE. Período: jan/13 a mai/13.
- Etapa 2.5: dados aerodinâmicos de outras fontes. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 2.6: dados propulsivos de outras fontes. Período: jan/13 a mai/14.

Meta 3: realizar novos experimentos. Período: jan/13 a jan/17.

- Etapa 3.1: experimentos aerodinâmicos da equipe do IAE. Período: jan/13 a jan/17.
- Etapa 3.2: experimentos propulsivos da equipe do ITA. Período: jan/13 a jan/17.
- Etapa 3.3: experimentos propulsivos da equipe da UnB. Período: jan/13 a jan/17.
- Etapa 3.4: experimentos propulsivos da equipe do INPE. Período: jan/13 a jan/17.
- Etapa 3.5: experimentos propulsivos da equipe da UFPR. Período: jan/13 a jan/17.

Meta 4: código computacional VonBraun. Período: jan/13 a jan/17.

- Etapa 4.1: otimizar os subcódigos. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 4.2: melhorar os subcódigos. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 4.3: ampliar os subcódigos. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 4.4: verificar os subcódigos. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 4.5: criar a primeira versão completa do código computacional VonBraun. Período: jan/13 a mai/14.
- Etapa 4.6: validar o código VonBraun com resultados experimentais já existentes. Período: jun/14 a nov/14.
- Etapa 4.7: treinar usuários das equipes do projeto interessadas no código VonBraun. Período: dez/14 a mai/15.
- Etapa 4.8: validar o código VonBraun com os novos experimentos das equipes. Período: jun/15 a jan/16.
- Etapa 4.9: gerar nova versão completa do código VonBraun. Período: fev/16 a jan/17.
- Etapa 4.10: divulgar o código VonBraun. Período: jun/15 a jan/17.

Meta 5: formar e aperfeiçoar pessoal. Período: jan/13 a jan/17.

- Etapa 5.1: doutores. Período: jan/13 a jan/17.
- Etapa 5.2: mestres. Período: jan/13 a jan/17.

6 - CONCLUSÃO

Em resumo, os resultados obtidos durante o primeiro ano de execução deste projeto foram:

- Publicados 3 artigos em periódicos.
- Publicados 2 resumos de artigos em congressos.
- Formado 1 doutor.
- Aprovados 3 projetos de tese de doutorado.
- Concluída 1 orientação de trabalho de graduação.
- Concluídas 2 orientações de trabalho de iniciação científica.
- Implementadas 2 versões de aplicativo computacional relevante.
- Preparados 4 relatórios técnicos de pesquisa.

Além disso:

- Foram submetidos 3 artigos para publicação em periódicos.
- Estão em andamento a orientação de 8 teses de doutorado, 6 dissertações de mestrado e 9 trabalhos de iniciação científica.
- Foram obtidas 7 citações de artigos publicados em periódicos.
- Além do presente projeto, estão em execução 6 projetos de pesquisa com financiamento.

Os artigos, teses, dissertações, trabalhos de graduação, projetos de pesquisa, aplicativos computacionais e relatórios técnicos estão disponíveis na internet em

<http://www.cfd.ufpr.br/>