



*Relatório técnico de execução parcial e final da UFPR do
projeto*

Validação em propulsão e aerodinâmica de foguetes

CFD-19

Período: 2017

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, 1º de junho de 2018.

1 – RESULTADOS PRINCIPAIS ALCANÇADOS

Os resultados alcançados pelos dois pesquisadores (C. H. Marchi e L. K. Araki) e demais membros da equipe da UFPR com a execução do projeto durante o seu último ano (2017) são apresentados abaixo.

Artigos publicados em periódicos (2):

- BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. Verification and validation of the foredrag coefficient for supersonic and hypersonic flow of air over a cone of fineness ratio 3. **Applied Mathematical Modelling**, 44:409-424, 2017.
- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Verification and validation of numerical solutions of two-dimensional reactive flow in rocket engine nozzles. **Applied Mathematical Modelling**, 52:544-557, 2017.

Artigos publicados em congressos (4):

- MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Study of additive correction multigrid application. In: XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE). **Anais...** Florianópolis, 2017.
- SILVA, N. D. P.; BORGES, R. B. R.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Verification of WENO for hyperbolic conservation laws. In: XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE). **Anais...** Florianópolis, 2017.
- VICENTIN, I. C. F. S. ; MARCHI, C. H. ; FOLTRAN, A. C. ; MORO, D. F. ; SILVA, N. D. P. ; CAMPOS, M. C. ; ARAKI, L. K. . Theoretical and experimental heat transfer in rocket engine with solid propellant. In: International Congress of Mechanical Engineering, (COBEM). **Anais...** Curitiba, 2017.
- ZANATTA, D. C.; ARAKI, L. K.; PINTO, M. A. V. Multigrid method for the solution of 2D heat diffusion problem using non-orthogonal structured grids. In: XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE). **Anais...** Florianópolis, 2017.

Resumos de artigos publicados em congressos (0):

Supervisão de pós-doutorado concluída (1):

- SANTIAGO, C. D. 2017. **Método multigrid otimizado para resolver as equações de Navier-Stokes 2D com volumes finitos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Estágio de pós-doutorado em Engenharia Mecânica. Supervisor: MARCHI, C. H.

Teses de doutorado concluídas (1):

- FERREIRA, A. E. G. **Multiextrapolação de Richardson completa para o método de volumes finitos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

Dissertações de mestrado concluídas (0):

Projetos (qualificações) de doutorado aprovados (3):

- CARVALHO JUNIOR, C. A. R. **Efeito do tipo de malha sobre multiextrapolação de Richardson em problemas de CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Projeto de tese de doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia. Orientador: MARCHI, C. H.
- DALL'AGNOL, C. **Estimativa e redução do erro de iteração em dinâmica dos fluidos computacional**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H..

- FOLTRAN, A. C. **Verificação do erro numérico em problemas de radiação térmica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H..

Projetos (qualificações) de mestrado aprovados (0):

Trabalhos de conclusão de curso de graduação concluídos (3):

- DIAS, E. L. S. **Estimativa numérica da pressão e taxa de queima transiente de motor-foguete a propelente sólido**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- LIMA, E. A. R. **Redução do arrasto aerodinâmico de minifoguetes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- MILDE, F. G. M. **Estimador Psi médio para o erro de discretização em CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

Orientações de iniciação científica concluídas (2):

- USANDIZAGA, B. A. Simulação numérica de escoamentos compressíveis. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.
- SILVA, W. **Emprego do método multigrid para problemas difusivos e advectivo-difusivos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.

Aplicativos computacionais relevantes implementados (0):

Relatórios de pesquisa preparados (0):

Produtos tecnológicos (3):

- MARCHI, C. H.; MORO, D. F. ; FOLTRAN, A. C. ; SILVA, N. D. P. ; DIOGENES, A. N. . **Motor-foguete Netuno-R-Beta**: impulso total = 108 N.s (classe G80); empuxo médio = 82 N; tempo de queima = 1,34 s; impulso específico = 86 s; estrutura em ligas de alumínio; diâmetro externo = 44 mm; comprimento = 217 mm; carga de propelente (nitrato de potássio e sacarose) = 128 g; massa total = 425 g. 2017.
- MARCHI, C. H.; MORO, D. F. ; FOLTRAN, A. C. ; SILVA, N. D. P. ; DIOGENES, A. N. . **Motor-foguete Netuno-Médio**: impulso total = 136 N.s (classe G90); empuxo médio = 87 N; tempo de queima = 1,61 s; impulso específico = 82 s; estrutura em ligas de alumínio; diâmetro externo = 44 mm; comprimento = 268 mm; carga de propelente (nitrato de potássio e sacarose) = 170 g; massa total = 521 g. 2017.
- MARCHI, C. H.; MORO, D. F. ; FOLTRAN, A. C. ; SILVA, N. D. P. ; DIOGENES, A. N. . **Motor-foguete Urano**: impulso total = 247 N.s (classe H100); empuxo médio = 103 N; tempo de queima = 2,49 s; impulso específico = 71 s; estrutura em ligas de alumínio; diâmetro externo = 51 mm; comprimento = 332 mm; carga de propelente (nitrato de potássio e sacarose) = 355 g; massa total = 887 g. 2017.

2 – OUTROS RESULTADOS E ATIVIDADES

Artigos submetidos a periódicos e aceitos (1):

- GERMER, E. M.; MARCHI, C. H. Effect of convergent section contour on the sonic line in rocket engine nozzles. Aceito por **Aerospace Science and Technology**, 2017.

Artigos submetidos a periódicos (5):

- OLIVEIRA, F.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H. Effect of seven multigrid schedules on the CPU time for 2D Laplace and Poisson equations. Submetido a **Mathematical Social Sciences**, 2017.
- ANUNCIACÃO, M. A. M.; PINTO, M. A. V.; ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H.; MARTINS, M. A. Reduction of iteration error and acceleration of the multigrid method by using extrapolation techniques. Submetido a **Computational Thermal Sciences**, 2017.
- MARCHI, C. H.; MORO, D. F. Solving the 3D Poisson equation with repeated Richardson extrapolation. Submetido a **Latin American Applied Research**, 2017.
- GERMER, E. M.; MARCHI, C. H. Effect of convergent section contour on rocket engine nozzle thrust. Submetido a **Numerical Heat Transfer – Part A**, 2017.
- VICENTIN, I. C. F. S.; MARCHI, C. H.; FOLTRAN, A. C.; MORO, D. F.; SILVA, N. D. P.; CAMPOS, M. C.; ARAKI, L. K. Theoretical and experimental heat transfer in solid propellant rocket engine. Submetido a **Journal of Aerospace Technology and Management**, 2017.

Artigos submetidos a congressos e aceitos (0):**Orientações em andamento em 31 Dez 2017 (27):**

Orientador principal	Marchi	Araki	Total
Iniciação científica	10	1	11
Trabalho de fim de curso	0	0	0
Mestrado	2	2	4
Doutorado	10	2	12
Pós-Doutorado	0	0	0
Total	22	5	27

Outras atividades relevantes executadas em 2017:

- Abril: foi realizado o **IV Festival Brasileiro de Minifoguetes** nos dias 29 e 30 de abril e 1º de maio de 2017, em Curitiba e Pinhais. Este evento contou com a participação de 39 equipes de 22 universidades brasileiras, 2 grupos independentes e 3 escolas de ensino médio de 11 estados brasileiros. Foram realizados 72 lançamentos de minifoguetes. Este evento foi organizado por pesquisadores e estudantes da equipe da UFPR neste projeto, junto com professores e alunos da UP e UTFPR.
- Em 12 Out 2017 foi realizado o Segundo *Dia Nacional de Lançamento de Minifoguetes* do Brasil. O nosso grupo de foguetes da UFPR participou com o lançamento de 5 minifoguetes. Cerca de 40 pessoas participaram do evento que foi aberto à comunidade interna e externa à UFPR.
- Ao longo do ano, foram realizados os seguintes experimentos com motores-foguete e minifoguetes e seus sistemas: 6 testes de sistemas; 4 testes de propelentes; 15 testes de resistência; 76 testes estáticos; e 74 lançamentos. Portanto, no total, foram realizados 175 experimentos em solo e voo.
- Entre outros, estes experimentos envolveram o desenvolvimento dos motores-foguete Netuno-R e Netuno-M da classe G, Urano da classe H e Saturno da classe I. Estes motores são baseados nos resultados obtidos em 2014 a 2016 com o motor MTP, já relatado anteriormente, com propelente KNSu (sacarose e nitrato de potássio).
- Teve início o projeto do motor-foguete Júpiter, da classe J, também com KNSu.

3 – ESTÁGIO FINAL DE CONSECUÇÃO DAS METAS ESTABELECIDAS

Meta 1: rede de pesquisa

- Etapa 1.1: implantar a rede. Em 2017 foi mantida a estrutura criada em 2013 para divulgar as notícias, atividades e resultados do projeto. Ou seja, o blog <http://fogueteufpr.blogspot.com.br/>, que é operado (blogger) pelo próprio coordenador do projeto, e o site na internet <http://www.cfd.ufpr.br/> do grupo de pesquisa da UFPR no projeto. Considera-se que esta etapa foi satisfatoriamente executada.
- Etapa 1.2: publicar trabalhos. Foram publicados 6 trabalhos em periódicos e eventos durante 2017. Considera-se que esta etapa foi bem executada.
- Etapa 1.3: incluir novos membros na rede. Em 2017 foram incluídos na rede, através da equipe da UFPR, os seguintes novos estudantes de pós-graduação: (1) Filipe Melo de Aguiar (mestrado); (2) Izabel C. F. S. Vicentin (doutorado); (3) Phillipe M. Rosa (doutorado); e (4) Luciano P. Silva (doutorado). Considera-se que nesta etapa teve-se um bom aumento no número de pós-graduandos participando do projeto.

Meta 2: obter resultados experimentais já existentes.

- Etapa 2.1: dados aerodinâmicos da equipe do IAE. Etapa encerrada em 2014.
- Etapa 2.2: dados propulsivos da equipe do ITA. Etapa cancelada pela inexistência de dados.
- Etapa 2.3: dados propulsivos da equipe da UnB. Etapa cancelada pela saída da UnB do projeto.
- Etapa 2.4: dados propulsivos da equipe do INPE. Etapa encerrada em 2014.
- Etapa 2.5: dados aerodinâmicos de outras fontes. Etapa encerrada em 2014.
- Etapa 2.6: dados propulsivos de outras fontes. Etapa encerrada em 2014.

Meta 3: realizar novos experimentos.

- Etapa 3.1: experimentos aerodinâmicos da equipe do IAE. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 3.2: experimentos propulsivos da equipe do ITA. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 3.3: experimentos propulsivos da equipe da UnB. Etapa cancelada pela saída da UnB do projeto.
- Etapa 3.4: experimentos propulsivos da equipe do INPE. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 3.5: experimentos propulsivos e aerodinâmicos da equipe da UFPR. Foram realizados 175 experimentos em solo e dinâmicos com minifoguetes durante 2017. Etapa encerrada em 2017.

Meta 4: código computacional VonBraun

- Etapa 4.1: otimizar os subcódigos. Etapa encerrada em 2017.

- Etapa 4.2: melhorar os subcódigos. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 4.3: ampliar os subcódigos. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 4.4: verificar os subcódigos. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 4.5: criar a primeira versão completa do código computacional VonBraun. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 4.6: validar o código VonBraun com resultados experimentais já existentes. Etapa encerrada em 2016.
- Etapa 4.7: treinar usuários das equipes do projeto interessadas no código VonBraun. Não houve interesse dos envolvidos nas outras equipes do projeto.
- Etapa 4.8: validar o código VonBraun com os novos experimentos das equipes. Cancelada por falta de dados das outras equipes.
- Etapa 4.9: gerar nova versão completa do código VonBraun. Etapa encerrada em 2017.
- Etapa 4.10: divulgar o código VonBraun. Etapa encerrada em 2017.

Meta 5: formar e aperfeiçoar pessoal

- Etapa 5.1: doutores. Foi titulado um doutor em 2017.
- Etapa 5.2: mestres. Não foram titulados mestres em 2017.

4 – EQUIPE PARTICIPANTE PELA UFPR

A equipe que participou da execução do projeto durante o ano 2017 soma 41 pessoas, e foi a seguinte:

3 professores doutores da UFPR

Carlos Henrique Marchi
Geovani Nunes Grapiglia
Luciano Kiyoshi Araki

5 professores colaboradores de outras instituições

Alysson Nunes Diógenes (UP)
Cosmo Damião Santiago (UTFPR)
Eduardo Matos Germer (UTFPR)
Fabiane de Oliveira (UEPG)
Guilherme Bertoldo (UTFPR)

14 doutorandos

Abimael Alves de Oliveira Junior
Ana Eliza Gonçalves Ferreira
Antonio Carlos Foltran
Carlos Alberto Rezende de Carvalho Junior

Caroline Dall' Agnol
 Daiane Cristina Zanatta
 Diego Fernando Moro
 Izabel Cecília Ferreira de Souza Vicentin
 Jean M. B. Oliveira
 Josenei Godoi de Medeiros
 Luciano Pereira da Silva
 Marcio A. M. Anunciação
 Nicholas Dicati Pereira da Silva
 Phillipe Mendes Rosa

5 mestrandos

Fabio Maurício Matos
 Filipe Melo de Aguiar
 Josimar Palczuk
 Rodrigo Canestraro Quadros
 Tobias Pinheiro Queluz

13 graduandos

Alexandre Vidal Bento
 Álvaro Ricardo Ferreira Bento Júnior
 Carlos Eduardo Américo
 Dener Augusto Iorio
 Éderson Luiz dos Santos Dias
 Fernanda Cristina Gomes Miranda
 Geverson Luciano Ramos
 Giovanne Deni Iorio
 Gustavo Padovany da Silva
 Leonardo de Castro Ferreira dos Santos
 Ruven Wang
 Vinicius de Souza Tenório
 Vinicius Luiggi Bohrer Coser

1 técnico da UFPR

José Osmar Klein Júnior

5 – CONCLUSÃO

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

- Publicados 2 artigos em periódicos.
- Publicados 4 artigos em congressos.
- Concluída 1 tese de doutorado.
- Concluída 1 supervisão de pós-doutorado.
- Gerados 3 produtos tecnológicos.

Além disso:

- Foi aceito 1 artigo para publicação em periódico.
- Foram submetidos 5 artigos para publicação em periódicos.
- Estão em andamento a orientação de 12 teses de doutorado e 4 dissertações de mestrado.
- Foram realizados 175 experimentos com motores-foguete, minifoguetes e seus sistemas.

Os artigos, teses, dissertações, trabalhos de graduação, projetos de pesquisa, aplicativos computacionais e relatórios técnicos estão disponíveis na internet em www.cfd.ufpr.br e www.foguete.ufpr.br.

Gostaríamos de repetir o registro de nosso protesto pelo cancelamento do pagamento da última parcela do projeto, referente ao ano de 2015. Isso prejudicou enormemente a parte experimental e teórica do projeto das 4 equipes, afetando os resultados finais do projeto.