



*Relatório técnico de execução parcial da UFPR do projeto*

*Validação em propulsão e aerodinâmica de foguetes*

**CFD-19**

**Período: 2016**

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, 31 de janeiro de 2017.

## 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 quinto ano (2016) são apresentados abaixo.

### Artigos publicados em periódicos (2):

- MARCHI, C. H.; MARTINS, M. A.; NOVAK, L. A.; ARAKI, L. K.; PINTO, M. A. V.; GONÇALVES, S. F. T.; MORO, D. F.; FREITAS, I. S. Polynomial interpolation with repeated Richardson extrapolation to reduce discretization error in CFD. **Applied Mathematical Modelling**, 40:8872-8885, 2016.
- MARCHI, C. H.; GIACOMINI, F. F.; SANTIAGO, C. D. Repeated Richardson extrapolation to reduce the field discretization error in computational fluid dynamics. **Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals**, 70:340-353, 2016.

### Artigos publicados em congressos (4):

- MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Solução da equação de Poisson 3D com múltiplas extrapolações de Richardson. In: I Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional (CBCFD). **Anais...** Campina Grande, 2016.
- MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Efeito de hardware e software sobre o erro de arredondamento em CFD. In: XXXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). **Anais...** Gramado, 2016.
- MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Formulação de volumes finitos para as faces. In: I Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia (SMNE). **Anais...** Curitiba, 2016.
- VICENTIN, I. C. F. S.; MARCHI, C. H. Determinação do fluxo de calor em motor-foguete utilizando método inverso. In: I Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia (SMNE). **Anais...** Curitiba, 2016.

### Resumos de artigos publicados em congressos (2):

- QUELUZ, T. P.; MARCHI, C. H., BERTOLDO, G. Cálculo e validação do coeficiente de arrasto de foguetes através de CFD. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2016.
- CORREIA, J. C.; MARCHI, C. H. Efeito da composição e forma de preparo do propelente KNSu sobre o desempenho de motor-foguete. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2016.

### Teses de doutorado concluídas (0):

### Dissertações de mestrado concluídas (2):

- VICENTIN, I. C. F. S. **Transferência de calor teórica e experimental em motor-foguete a propelente sólido**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- VERGARA, G. **Aplicando funções de interpolação para fluidos compressíveis com ou sem reação química**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.

### Projetos (qualificações) de doutorado aprovados (2):

- MORO, D. F. **Desenvolvimento de técnicas para reduzir o erro de iteração e discretização em CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

- SILVA, N. D. P. **Verificação e redução de erros de discretização para escoamentos com fluidos compressíveis**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

#### **Projetos (qualificações) de mestrado aprovados (1):**

- MATOS, F. M. **Desenvolvimento de localizador e altímetros digitais para minifoguetes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Projeto de dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

#### **Trabalhos de fim de curso de graduação concluídos (1):**

- QUELUZ, T. P. **Cálculo e validação do coeficiente de arrasto através de CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Trabalho de fim de curso de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

#### **Orientações de iniciação científica concluídas (4):**

- LIMA e SILVA, P. A. **Estudo de ondas choque em escoamentos unidimensionais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.
- De La VEGA, E. **Propulsão de foguetes**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: ARAKI, L. K.
- QUELUZ, T. P. **Projeto, montagem e teste de um espaçomodelo de baixo custo; Validação de soluções numéricas de escoamentos em tuberias de foguetes; Aplicativo computacional para cálculo do coeficiente de arrasto de minifoguetes; Cálculo e validação do coeficiente de arrasto de foguetes através de CFD**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.
- CORREIA, J. C. **Testes estáticos do motor-foguete MTP; Efeitos da composição e preparo de propelentes sobre o desempenho de motores-foguete**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. Trabalho de iniciação científica de aluno de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

#### **Aplicativos computacionais relevantes implementados (0):**

#### **Relatórios de pesquisa preparados (0):**

## **2 – OUTROS RESULTADOS E ATIVIDADES**

#### **Artigos submetidos a periódicos (7):**

- 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 **International Journal of Computational Methods**, 2016.
- ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Verification and validation of numerical solutions of two-dimensional reactive flow in rocket engine nozzles. Submetido a **Applied Mathematical Modelling**, 2016.
- ANUNCIÇÃO, 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 and Applied Mathematics**, 2016.
- MARCHI, C. H.; MORO, D. F. Solving the 3D Poisson equation with repeated Richardson extrapolation. Submetido a **Computational Thermal Sciences**, 2016.

- 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. Submetido a **Applied Mathematical Modelling**, 2016.
- GERMER, E. M.; MARCHI, C. H. Effect of convergent section contour on rocket engine nozzle thrust. Submetido a **Aerospace Science and Technology**, 2016.
- GERMER, E. M.; MARCHI, C. H. Effect of convergent section contour on the sonic line in rocket engine nozzles. Submetido a **Aerospace Science and Technology**, 2016.

#### Artigos submetidos a congressos e aceitos (0):

#### Orientações em andamento em 26 Jan 2017 (31):

<b>Orientador principal</b>	<b>Marchi</b>	<b>Araki</b>	<b>Total</b>
Iniciação científica	11	2	13
Trabalho de fim de curso	2	0	2
Mestrado	3	1	4
Doutorado	9	2	11
Pós-Doutorado	1	0	1
<b>Total</b>	<b>26</b>	<b>5</b>	<b>31</b>

#### Citações em 2016 de artigos publicados em periódicos:

- 13 = MARCHI, C. H. na base do Web of Science
- 11 = MARCHI, C. H. na base do Scopus

#### Previsão de conclusão de orientações de pós-graduação em 2017 (3):

1 = Pós-doutorado (Santiago)

1 = Doutorado (Ferreira)

1 = Mestrado (Matos)

#### Outras atividades relevantes executadas em 2016:

- Abril: foi realizado o *Festival de Minifoguetes de Curitiba 2016* nos dias 21 a 24 de abril de 2016, em Curitiba e Pinhais. Este evento contou com a participação de 17 equipes de 15 universidades brasileiras (ITA, PUC-RS, UEMA, UERJ, UFABC, UFMG, UFPR, UFRGS, UFSC, UnB, UNICAMP, UNIFEI, UP, USP-SC, UTFPR) e um grupo independente (CEGAPA), de 8 estados brasileiros (DF, MA, MG, PR, RJ, RS, SC, SP). O *Festival de Minifoguetes de Curitiba 2016* foi o terceiro evento realizado no Brasil no qual equipes competiram com seus projetos de minifoguetes. As competições foram divididas em 13 categorias com objetivo definido. Foram realizados 92 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.
- Agosto: foram formadas seis equipes com 21 de alunos de graduação e pós-graduação visando participar do *Festival de Minifoguetes de Curitiba 2017*.
- Em 8 Out 2016 foi realizado o primeiro *Dia Nacional de Lançamento de Minifoguetes* do Brasil. O nosso grupo de foguetes da UFPR participou com o lançamento de 9 minifoguetes. 101 pessoas participaram do evento que foi aberto à comunidade interna e externa a UFPR.
- Ao longo do ano, foram realizados os seguintes experimentos com motores-foguete e minifoguetes ou seus sistemas: 34 testes de sistemas; 6 testes de propelentes; 26 testes de resistência; 244 testes estáticos; e 102 lançamentos. Portanto, no total, foram realizados 412 experimentos em solo e voo.
- Entre outros, estes experimentos envolveram o desenvolvimento dos motores-foguete Netuno-R e Netuno-M da classe G e Urano da classe H. 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 Saturno, da classe I, também com KNSu.

### **3 – ESTÁGIO DE CONSECUÇÃO DAS METAS ESTABELECIDAS**

#### **Meta 1: rede de pesquisa**

- Etapa 1.1: implantar a rede. Em 2016 foi mantida a estrutura criada em 2013 para divulgar as notícias, atividades e resultados do projeto. Ou seja, o blog <http://foguetufpr.blogspot.com.br/>, que é operado (blogger) pelo próprio coordenador do projeto, e o site na internet <http://servidor.demec.ufpr.br/CFD/> do grupo de pesquisa da UFPR no projeto. As questões sobre publicações e direitos autorais estão sendo tratadas caso a caso. Em relação a 2016, considera-se que esta etapa foi satisfatoriamente executada.
- Etapa 1.2: publicar trabalhos. Foram publicados 8 trabalhos em periódicos e eventos. Em relação a 2016, considera-se que esta etapa foi bem executada.
- Etapa 1.3: incluir novos membros na rede. Foram incluídos na rede, através da equipe da UFPR, os seguintes novos estudantes de pós-graduação: (1) Josimar Palczuk (mestrado); (2) Rodrigo Canestraro Quadros (mestrado); (3) Antonio Carlos Foltran (doutorado); (4) Caroline Dall' Agnol (doutorado); e (5) Josenei Godoi de Medeiros (doutorado). Em relação a 2016, 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. Em andamento.
- Etapa 3.2: experimentos propulsivos da equipe do ITA. Em andamento.
- 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. Em andamento.
- Etapa 3.5: experimentos propulsivos e aerodinâmicos da equipe da UFPR. Foram realizados 412 experimentos em solo e dinâmicos com minifoguetes durante 2016. Em andamento.

#### **Meta 4: código computacional VonBraun**

- Etapa 4.1: otimizar os subcódigos. Em andamento.

- Etapa 4.2: melhorar os subcódigos. Em andamento.
- Etapa 4.3: ampliar os subcódigos. Em andamento.
- Etapa 4.4: verificar os subcódigos. Em 2016, continuaram os testes de verificação, tanto em aerodinâmica quanto em propulsão. 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 2016, foram usados dados aerodinâmicos da literatura em uma nova validação do código Mach2D para escoamentos supersônicos e hipersônicos sobre cone. Encerrado.
- Etapa 4.7: treinar usuários das equipes do projeto interessadas no código VonBraun. Não houve interesse dos envolvidos.
- 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. Nenhum doutor foi titulado em 2016.
- Etapa 5.2: mestres. Foram titulados 2 mestres em 2016. Portanto, em relação a 2016, considera-se que esta etapa foi satisfatoriamente executada.

## **4 – CRONOGRAMA ATÉ A CONCLUSÃO DO PROJETO**

**Início: janeiro/2017.**

**Término: setembro/2017.**

**Duração: 9 meses**

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

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

**Meta 2: obter resultados experimentais já existentes.** Concluído.

- Etapa 2.1: dados aerodinâmicos da equipe do IAE. Concluído.
- Etapa 2.2: dados propulsivos da equipe do ITA. **Cancelado; não existem os dados.**
- Etapa 2.3: dados propulsivos da equipe da UnB. **Cancelado; a equipe retirou-se do projeto.**
- Etapa 2.4: dados propulsivos da equipe do INPE. Concluído.
- Etapa 2.5: dados aerodinâmicos de outras fontes. Concluído.
- Etapa 2.6: dados propulsivos de outras fontes. Concluído.

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

- Etapa 3.1: experimentos aerodinâmicos da equipe do IAE. Período: jan/17 a set/17.
- Etapa 3.2: experimentos propulsivos da equipe do ITA. Período: jan/17 a set/17.

- Etapa 3.3: experimentos propulsivos da equipe da UnB. **Cancelado; a equipe retirou-se do projeto.**
- Etapa 3.4: experimentos propulsivos da equipe do INPE. Período: jan/17 a set/17.
- Etapa 3.5: experimentos propulsivos e aerodinâmicos da equipe da UFPR. Período: jan/17 a set/17.

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

- Etapa 4.1: otimizar os subcódigos. Período: jan/17 a mar/17.
- Etapa 4.2: melhorar os subcódigos. Período: jan/17 a mar/17.
- Etapa 4.3: ampliar os subcódigos. Período: jan/17 a mar/17.
- Etapa 4.4: verificar os subcódigos. Período: jan/17 a mar/17.
- Etapa 4.5: criar a primeira versão completa do código computacional VonBraun. Período: jan/17 a ago/17.
- Etapa 4.6: validar o código VonBraun com resultados experimentais já existentes. Concluído.
- Etapa 4.7: treinar usuários das equipes do projeto interessadas no código VonBraun. Concluído.
- Etapa 4.8: validar o código VonBraun com novos experimentos das equipes. Período: jan/17 a mar/17.
- Etapa 4.9: gerar nova versão completa do código VonBraun. Período: abr/17 a set/17.
- Etapa 4.10: divulgar o código VonBraun. Período: jan/17 a set/17.

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

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

## **5 – EQUIPE PARTICIPANTE PELA UFPR**

A equipe que participou da execução do projeto durante o ano 2016 soma 60 pessoas, e foi a seguinte:

### **7 professores doutores da UFPR**

Carlos Henrique Marchi  
 Geovani Nunes Grapiglia  
 Leandro Alberto Novak  
 Luciano Kiyoshi Araki  
 Mael Sachine  
 Márcio Augusto Villela Pinto  
 Simone de Fátima Tomazzoni Gonçalves

### **8 professores colaboradores de outras instituições**

Alysson Nunes Diógenes (UP)  
 Cosmo Damião Santiago (UTFPR)  
 Eduardo Matos Germer (UTFPR)  
 Fabiana de Fátima Giacomini (UTFPR)  
 Fabiane de Oliveira (UEPG)  
 Guilherme Bertoldo (UTFPR)  
 Jonas Joacir Radtke (UTFPR)  
 Márcio André Martins (UNICENTRO)

### **12 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  
Inajara da Silva Freitas  
Jean M. B. Oliveira  
Josenei Godoi de Medeiros  
Marcio A. M. Anunciação  
Nicholas Dicati Pereira da Silva

### **5 mestrandos**

Fabio Maurício Matos  
Gabriel Vergara  
Izabel Cecília Ferreira de Souza Vicentin  
Josimar Palczuk  
Rodrigo Canestraro Quadros

### **23 graduandos**

Alexandre Vidal Bento  
Álvaro Ricardo Ferreira Bento Júnior  
Carlos Eduardo Américo  
Dener Augusto Iorio  
Éderson Luiz dos Santos Dias  
Felipe Bavaroski Toledo Costa  
Fernanda Cristina Gomes Miranda  
Geverson Luciano Ramos  
Giovanna Deni Iorio  
Gustavo Padovany da Silva  
Jeovan Cezare Correia  
João Guilherme Motta  
Larissa Ribas dos Santos  
Leonardo de Castro Ferreira dos Santos  
Lia Doubrawa  
Nicolas Alexandre Enzo  
Pedro Augusto de Lima e Silva  
Renato Carlos David  
Ruven Wang  
Sofia Mariana Bozz Ferla  
Tobias Pinheiro Queluz  
Vinicius de Souza Tenório  
Vinicius Luiggi Bohrer Coser

### **1 técnico da UFPR**

José Osmar Klein Júnior

### **4 outros**

José Miraglia  
Jorge Miquelasso Junior  
José Roberto de Andrade e Paula  
Oswaldo Barbosa Loureda

## **6 – CONCLUSÃO**

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

- Publicados 2 artigos em periódicos.
- Publicados 4 artigos em congressos.
- Publicados 2 resumos de artigos em congressos.
- Concluídas 2 dissertações de mestrado.

Além disso:

- Foram submetidos 7 artigos para publicação em periódicos.
- Estão em andamento a orientação de 1 pós-doutorado, 11 teses de doutorado e 4 dissertações de mestrado.
- Foram realizados 412 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](http://www.cfd.ufpr.br) e [www.foguete.ufpr.br](http://www.foguete.ufpr.br).

Gostaríamos de registrar um protesto pelo cancelamento do pagamento da última parcela do projeto, referente ao ano de 2015. Isso está prejudicando enormemente a parte experimental e teórica do projeto das 4 equipes, o que afetará os resultados finais do projeto.