



Relatório técnico final do projeto
*Multiextrapolação de Richardson para reduzir
e estimar o erro de discretização em CFD - II*

CFD-21

Processo CNPq 309365/2013-9

Período de execução: 1 Mar 2014 a 28 Fev 2017

Palavras-chave: erro numérico, diferenças finitas, volumes finitos, erro de truncamento, verificação, validação.

Projeto de pesquisa financiado pelo
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
através do **Edital Produtividade em Pesquisa – PQ – 2013**
com uma bolsa de produtividade em pesquisa (PQ)

Carlos Henrique Marchi

(coordenador)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 21 de abril de 2017.

SUMÁRIO

1 – Resumo		2
2 – Metas e objetivos do projeto		2
3 – Resultados obtidos		3
4 – Equipe participante		10
5 – Conclusão		11

1 – RESUMO

O objetivo geral deste projeto de pesquisa básica era reduzir e estimar o erro de discretização em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) através de múltiplas extrapolações de Richardson (MER). Pretendia-se melhorar, generalizar e testar o uso de MER visando diminuir a memória computacional e o tempo de CPU necessários para se resolver problemas de CFD, bem como obter soluções numéricas de grande acurácia. Seriam considerados: problemas governados pelas equações de Poisson, advecção-difusão, Laplace, Burgers e Navier-Stokes; uma, duas e três dimensões espaciais e o tempo; soluções numéricas obtidas com os métodos de diferenças finitas e volumes finitos; diversos tipos de variáveis de interesse e de aproximações numéricas; precisões simples, dupla e quádrupla nos cálculos; e malhas uniformes, não uniformes e não ortogonais. O projeto estava dividido em doze etapas para serem executadas em três anos pelo proponente e 17 colaboradores (9 pesquisadores-doutores, 5 doutorandos, 2 mestrados e 1 graduando) de seis instituições.

2 – METAS E OBJETIVOS DO PROJETO

O projeto foi estruturado em três metas, com 12 objetivos, para ser executado em três anos, conforme o texto original do projeto, abaixo, de 16 Ago 2013.

O objetivo geral deste projeto é reduzir e estimar o erro de discretização em CFD através da técnica denominada de múltiplas extrapolações de Richardson (MER). Para tanto, pretende-se melhorar, generalizar e testar o uso de MER. Com isso, visa-se diminuir a memória computacional e o tempo de CPU necessários para se resolver problemas de CFD, bem como obter soluções numéricas de grande acurácia.

As metas e objetivos específicos deste projeto são:

Meta 1: melhorar e testar o desempenho de MER

- 1) Melhorar o desempenho de MER em variáveis de campo que têm valores extremos locais ou globais (mínimos e máximos de funções), não linearidades e descontinuidades.
- 2) Testar o efeito dos seguintes parâmetros que afetam o desempenho de MER: razão de refino de malha; número de dimensões das equações; número de dimensões de refino de

malha; ordens do erro; perfis e campos; precisão dos cálculos; número de extrapolações; malha base.

- 3) Testar o efeito dos seguintes tipos de malha sobre o desempenho de MER: uniforme, não uniforme e não ortogonal.
- 4) Minimizar o efeito dos erros de iteração e de arredondamento sobre o erro numérico.
- 5) Desenvolver um estimador de erro para soluções obtidas com MER.
- 6) Aplicar MER a problemas transientes.
- 7) Aplicar MER a problemas envolvendo fluidos compressíveis.
- 8) Implementar programas computacionais para analisar o desempenho de MER e para usuários de MER.

Meta 2: validar resultados numéricos com e sem MER

- 9) Resolver problemas de aerodinâmica de projéteis e foguetes.
- 10) Resolver problemas de propulsão de foguetes.

Meta 3: gerar benchmarks com MER

- 11) Obter os resultados mais acurados da literatura, com suas estimativas de erro, para o problema clássico do escoamento 2D dentro de uma cavidade quadrada causado pela sua tampa móvel.
- 12) Idem ao objetivo 11 para o escoamento 3D dentro de uma cavidade cúbica.

3 – RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos com a execução deste projeto foram:

6 artigos publicados em periódicos:

- SANTIAGO, C. D.; MARCHI, C. H.; SOUZA, L. F. Performance of geometric multigrid method for coupled two-dimensional systems in CFD. **Applied Mathematical Modelling**, 39:2602-2616, 2014.
- MARCHI, C. H.; ALVES, A. C. Verification of numerical solutions of advection-diffusion and Burgers equations. **J Appl Computat Math** 3:154, 2014.
- FOLTRAN, A. C.; MORO, D. F.; SILVA, N. D. P.; FERREIRA, A. E. G.; ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Burning rate measurement of KNSu propellant obtained by mechanical press. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 7:193-199, 2015.
- MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Evaluation of chemical equilibrium and non-equilibrium properties for LOX/LH2 reaction schemes. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 7:31-42, 2015.
- 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.

1 artigo aceito para publicação em periódico:

- 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**, 2017.

7 artigos submetidos a periódicos:

- 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.
- 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 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.
- 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.
- 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**. 2013.

21 artigos completos publicados em congressos:

- BERTOLDO, G.; AVELAR, A. C.; FALCÃO FILHO, J. B.; HSU, J. J. L.; MARCHI, C. H. Numerical and experimental pressure distributions over a sounding vehicle model. In: XV Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). **Anais...** Belém, 2014.
- SUERO, R.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H. Otimização de parâmetros do multigrid algébrico para a equação de advecção-difusão bidimensional. In: XXXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE). **Anais...** Fortaleza, 2014.
- VARGAS, A. P. S.; MARCHI, C. H.; PINTO, M. A. V. Multiextrapolação de Richardson e verificação da ordem de acurácia de esquema híbrido sobre a equação 2D de advecção-difusão com termo fonte. In: XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). **Anais...** Natal, 2014.

- GIACOMINI, F. F.; MARCHI, C. H. Efeito da razão de refino de malha sobre o uso de multiextrapolação de Richardson em CFD. In: XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). **Anais...** Natal, 2014.
- OLIVEIRA, F.; PINTO, M. A. V.; MARCHI, C. H. The effect of the schedule on the CPU time for 2D Poisson equation. In: XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). **Anais...** Natal, 2014.
- RADTKE, J. J.; BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. Avaliação do código computacional DEPP na otimização de problemas de propulsão e aerodinâmica de foguetes. In: XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). **Anais...** Natal, 2014.
- MARTINS, M. A.; MARCHI, C. H. Multiextrapolação de Richardson com interpolação aplicada às equações de Navier-Stokes 2D. In: XXXV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). **Anais...** Natal, 2014.
- MORO, D. F.; MARCHI, C. H.; ANDRADE E PAULA, J. R.; MARQUES, A. Desempenho experimental de sete tipos de divergente de tubeira de motor-foguete a propelente sólido. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014.
- GERMER, E. M.; MARCHI, C. H. Efeito da geometria do bocal convergente sobre o empuxo de motor-foguete. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014.
- FOLTRAN, A. C.; MORO, D. F.; SILVA, N. D. P.; FERREIRA, A. E. G.; ARAKI, L. K.; MARCHI, C. H. Medição da velocidade de queima à pressão atmosférica do propelente sacarose/nitrato de potássio preparado a frio. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014.
- BERTOLDO, G.; RADTKE, J. J.; MARCHI, C. H. Otimização aerodinâmica nos regimes supersônico e hipersônico com base nas equações de Navier-Stokes. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014.
- RADTKE, J. J.; BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. Otimização da geometria do bocal divergente de tubeiras cônicas e parabólicas para empuxo máximo. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014.
- QUELUZ, T. P.; MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Validação da solução numérica do escoamento de ar a 300 K em tubeira plana na condição de projeto e razão de expansão 1,8. In: II Simpósio Aeroespacial Brasileiro (SAB). **Anais...** São José dos Campos, 2014.
- FERREIRA, A. E. G.; MARCHI, C. H. Emprego de MER e CRE em Poisson 1D para análise do erro de variáveis secundárias. In: III Congresso de Matemática Aplicada e Computacional Sudeste (CMAC-SE). **Anais...** Vitória, 2015.
- CARVALHO JR, C. A. R.; MARCHI, C. H.; MARTINS, M. A. Multiextrapolação de Richardson com interpolação para reduzir o erro de discretização em malhas não uniformes 1D. In: III Congresso de Matemática Aplicada e Computacional Sudeste (CMAC-SE). **Anais...** Vitória, 2015.
- MORO, D. F.; MARCHI, C. H. Efeito da geometria do bocal divergente sobre o empuxo de motor-foguete operando no vácuo. In: III Congresso de Matemática Aplicada e Computacional Sudeste (CMAC-SE). **Anais...** Vitória, 2015.

- MORO, D. F.; MARCHI, C. H.; PINTO, M. A. V. Um método iterativo eficiente para resolver sistemas de equações pentadiagonais. In: III Congresso de Matemática Aplicada e Computacional Sudeste (CMAC-SE). **Anais...** Vitória, 2015.
- 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.

15 resumos de artigos publicados em congressos:

- MORO, D. F.; MARCHI, C. H.; EURICH, R. D.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Classe A de minifoguetes no período de janeiro a maio de 2014. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2014.
- SANTOS, W. G.; MARCHI, C. H.; MORO, D. F.; SILVA, N. D. P.; GRACIA, M. D. P.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Classe B de minifoguetes no período de fevereiro a maio de 2014. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2014.
- FOLTRAN, A. C.; MARCHI, C. H.; QUELUZ, T. P.; MOREIRA, E. B.; SEGURO, F. A. ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Fixo de minifoguetes no período de abril de 2013 a maio de 2014. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2014.
- TISCHER FILHO, L.; MARCHI, C. H.; CARON, F. A. S.; SCHLOSSMACHER, L.; COLOMBO, R. H.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Máximo de minifoguetes no período de abril de 2013 a maio de 2014. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2014.
- QUELUZ, T. P.; MARCHI, C. H.; MORO, D. F. Validação da solução numérica do escoamento de ar a 300 K em tubeira plana na condição de projeto e razão de expansão 1,8. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2014.
- SILVA, N. P. D.; MARCHI, C. H.; MORO, D. F.; SMYTHE, A. L.; ARAKI, L. K.; YAMANAKA, R. B.; ALFARO, R. M.; ALISTE, R. C. M. Atividades da equipe UFPR-Livre de minifoguetes no período de abril de 2013 a maio de 2014. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2014.
- QUELUZ, T. P.; MARCHI, C. H. Aplicativo computacional para cálculo do coeficiente de arrasto de minifoguetes. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2015.
- CORREIA, J. C.; MARCHI, C. H. Comparação de métodos para calcular a pressão de câmara de motor-foguete. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR (EVINCI). **Anais...** Curitiba, 2015.
- MORO, D. F.; QUELUZ, T. P.; EURICH, R. D.; DOUBRAWA, L.; FERLA, S. M. B.; SANTOS, L. R.; BARTOLOME, J. R. M.; FUZIZAKI, G. C.; MARCHI, C. H.;

- ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Alfa de minifoguetes no período de setembro de 2014 a abril de 2015. In: Encontro das Atividades Formativas da UFPR (ENAF). **Anais...** Curitiba, 2015.
- FOLTRAN, A. C.; CORREIA, J. C.; SEGURO, F. A.; VICENTIN, I. F. S.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Beta de minifoguetes no período de setembro de 2014 a abril de 2015. In: Encontro das Atividades Formativas da UFPR (ENAF). **Anais...** Curitiba, 2015.
 - MORO, D. F.; SCHLOSSMACHER, L.; OUCHI, H. Y. G.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Delta de minifoguetes no período de setembro de 2014 a abril de 2015. In: Encontro das Atividades Formativas da UFPR (ENAF). **Anais...** Curitiba, 2015.
 - SILVA, N. D. P.; CARON, F. A. S.; SCHLOSSMACHER, L.; COLOMBO, R. H.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Gama de minifoguetes no período de setembro de 2014 a abril de 2015. In: Encontro das Atividades Formativas da UFPR (ENAF). **Anais...** Curitiba, 2015.
 - MORO, D. F.; SILVA, N. D. P.; MOTTA, J. G.; SILVA, G. P.; MARCHI, C. H.; ARAKI, L. K. Atividades da equipe UFPR-Epsilon de minifoguetes no período de setembro de 2014 a abril de 2015. In: Encontro das Atividades Formativas da UFPR (ENAF). **Anais...** Curitiba, 2015.
 - 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.

3 teses de doutorado concluídas:

- RADTKE, J. J. **Otimização da geometria da seção divergente de tuberias de motores-foguete.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. Tese de doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia.
- BERTOLDO, G. **Otimização aerodinâmica de Newton com base nas equações de Navier-Stokes.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica.
- GERMER, E. M.. **Avaliação do efeito da geometria da seção convergente em tuberias de motor-foguete.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica.

3 dissertações de mestrado concluídas:

- MORO, D. F. **Efeito da geometria do bocal divergente sobre o empuxo de motor-foguete operando no vácuo.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica.
- CARVALHO JR, C. A. R. **Interpolação polinomial com multiextrapolação de Richardson para reduzir o erro de discretização em malhas não uniformes 1D.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. Dissertação de mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia.

- 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.

1 trabalho de fim de curso de graduação concluído:

- SCHLOSSMACHER, L. **Desenvolvimento de motores-foguete para espaçomodelos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. Trabalho de fim de curso de graduação em engenharia mecânica. Orientador: MARCHI, C. H.

2 orientações de iniciação científica concluídas:

- QUELUZ, T. P. **Projeto, montagem e teste de um espaçomodelo de baixo custo; Validação de soluções numéricas de escoamentos em tubeiras 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.

4 projetos (qualificações) de doutorado aprovados:

- FERREIRA, A. E. G. **Redução do erro de discretização e iteração de campos em CFD através de multiextrapolação de Richardson**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014. Projeto de Tese de doutorado em Engenharia Mecânica.
- OLIVEIRA JR, A. A. **Análise de geometrias de narizes de foguetes em regime transônico**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. Projeto de tese de doutorado em Engenharia Mecânica.
- 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.
- 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.

1 projeto (qualificação) de mestrado aprovado:

- 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.

2 aplicativos computacionais relevantes implementados:

- RADTKE, J. J.; BERTOLDO, G.; MARCHI, C. H. **DEPP** (2013-2014): otimização de problemas de propulsão e aerodinâmica de foguetes. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014.
- CARVALHO JUNIOR, C. A. R.; MARTINS, M. A.; MARCHI, C. H. **Interp1Dg** (2014): interpolação polinomial unidimensional de graus 1 a 10, em malhas não

uniformes, para multiextrapolação de Richardson. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014.

nenhum relatório de pesquisa preparado:

1 projeto (com financiamento e além do presente) executado no período e coordenado por C. H. Marchi:

- Validação em propulsão e aerodinâmica de foguetes. Período: Jul/2012 a Set/2017. Financiador: CAPES. Total: R\$ 600.000,00.

Citações de artigos publicados em periódicos na base ISI-Web of Science:

- Ano 2014 = 9
- Ano 2015 = 5
- Ano 2016 = 13

Total = 27

Atividades administrativas relevantes ligadas à pesquisa no período:

- **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 conta atualmente com 10 pesquisadores, 16 alunos e 1 técnico.
- Desde 2012, Editor Associado na área de Propulsão e Combustão do periódico **Journal of Aerospace Technology and Management**, publicado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), de São José dos Campos (SP), e incluído no Web of Science do ISI.
- Desde 2013, membro do Comitê Assessor de Engenharia da Fundação Araucária (Paraná).
- Desde 2016, revisor de artigos submetidos ao periódico **Aerospace Science and Technology**, publicado pela editora Elsevier, e incluído no Web of Science do ISI.
- Desde 2012, revisor de artigos submetidos ao periódico **Computers and Fluids**, publicado pela editora Elsevier, 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.
- 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 2010, revisor de artigos submetidos ao periódico **Journal of Aerospace Technology and Management**, publicado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), de São José dos Campos (SP), e incluído no Web of Science do ISI.
- 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.
- **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.

4 – EQUIPE PARTICIPANTE

A equipe que efetivamente participou da execução do projeto soma 42 pessoas, e foi a seguinte:

8 professores doutores, da UFPR

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

14 professores doutores, colaboradores de outras 7 instituições

Giuliano Gadioli La Guardia (UEPG)
Luciane Grossi (UEPG)
Arileide Cristina Alves (UP)
Fabiane de Oliveira (UEPG)
Roberta Suero (IFPR)
Cosmo Damião Santiago (UTFPR)
Fabiana de Fátima Giacomini (UTFPR)
Ana Paula da Silveira Vargas (UNIBRASIL)
Márcio André Martins (UNICENTRO)
Leandro Franco de Souza (USP)
Alysson Nunes Diógenes (UP)
Eduardo Matos Germer (UTFPR)
Guilherme Bertoldo (UTFPR)
Jonas Joacir Radtke (UTFPR)

8 doutorandos

Ana Eliza Gonçalves Ferreira
Abimael Alves de Oliveira Junior
Diego Fernando Moro
Carlos Alberto Rezende de Carvalho Junior
Antonio Carlos Foltran
Nicholas Dicati Pereira da Silva
Caroline Dall' Agnol
Josenei Godoi de Medeiros

6 mestrandos

Inajara da Silva Freitas
Marcio Alexandre Maciel de Anunciação
Izabel Cecília Ferreira de Souza Vicentin

Fabio Maurício Matos
Gustavo Boscardin
Josimar Palczuk

2 graduandos

Éderson Luiz dos Santos Dias
Tobias Pinheiro Queluz

1 técnico da UFPR

José Osmar Klein Júnior

3 (outros colaboradores)

José Roberto de Andrade e Paula
José Miraglia
Jorge Miquelasso Junior

5 – CONCLUSÃO

Dez dos 12 objetivos foram alcançados total ou parcialmente. Na continuação deste projeto, deveremos concluir plenamente o que foi planejado.

Em resumo, os resultados obtidos durante a execução deste projeto foram:

- Publicados 6 artigos em periódicos.
- Aceito 1 artigo para publicação em periódico.
- Publicados 21 artigos completos em congressos.
- Publicados 15 resumos de artigos em congressos.
- Formados 3 doutores e 3 mestres.
- Concluída 1 orientação de trabalho de fim de curso de graduação.
- Concluídas 2 orientações de trabalho de iniciação científica.
- Aprovados 4 projetos de tese de doutorado e 1 projeto de dissertação de mestrado.
- Implementados 2 aplicativos computacionais relevantes.

Além disso:

- Foram submetidos 7 artigos para publicação em periódicos.
- Foram obtidas 27 citações de artigos publicados em periódicos.
- Este projeto está sendo continuado através de um novo financiamento do CNPq, por meio de uma bolsa de produtividade em pesquisa PQ-2, no período Mar/17 a Fev/20.

Material relativo aos resultados deste projeto estão disponíveis na internet em <http://servidor.demec.ufpr.br/CFD/>

Agradecemos o apoio do CNPq a este projeto, que motivou a equipe e proporcionou avançar nas pesquisas realizadas no grupo de CFD da UFPR.