



Simulação Numérica de Escoamento Reativo em Motor-Foguete com Refrigeração Regenerativa

CFD-5

Palavras-chave: propulsão líquida, CFD, volumes finitos, erro numérico, H₂/O₂, *multigrid*, tubeira, câmara de combustão

Projeto de pesquisa submetido à
Agência Espacial Brasileira (AEB)
para concorrer ao Anúncio de Oportunidades 01/2004 do Programa UNIESPAÇO
Tema: Veículos Espaciais
Tópico: Processos de Combustão em Motores-Foguete

Carlos Henrique Marchi (UFPR, gerente do projeto)

Luciano Kiyoshi Araki (UFPR)

Fernando Laroca (UFPR)

Márcio Augusto Villela Pinto (UEPG)

Fábio Alencar Schneider (UNICENP)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)
Endereço: Caixa postal 19040
81531-980, Curitiba, PR
Telefone: (41) 361-3126
Fax: (41) 361-3129
e-mail: marchi@demec.ufpr.br

Curitiba, 10 de setembro de 2004.

RESUMO

O objetivo principal deste projeto é implementar códigos computacionais para resolver escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH₂. O problema completo é dividido em três problemas acoplados:

- 1) Câmara-tubeira: escoamento reativo turbulento de uma mistura de gases na câmara de combustão e no bocal convergente-divergente (tubeira).
- 2) Paredes: condução de calor através das paredes do motor-foguete entre os gases no seu interior e o líquido refrigerante.
- 3) Canais: escoamento turbulento do líquido refrigerante nos canais em torno do motor-foguete.

Os parâmetros principais de interesse são o empuxo produzido pelo motor, a temperatura máxima atingida pela parede e a queda de pressão do escoamento do refrigerante ao longo dos canais. Sobre estes parâmetros, pretende-se avaliar os efeitos causados por: geometria da tubeira; pressão de combustão; propriedades termofísicas e de transporte constantes ou variáveis; radiação térmica; modelos unidimensionais e bidimensionais; fluido invíscido, viscoso laminar e turbulento; número de reações químicas; condição de contorno na superfície da parede do lado dos gases quentes; e número de nós das malhas usadas para discretizar os domínios de cálculo.

Também são objetivos: obter soluções numéricas de referência (*benchmarks*) para os problemas em consideração, com suas estimativas do erro numérico; e esclarecer algumas questões controversas da literatura. Outros objetivos do projeto são: melhorar a infra-estrutura computacional do grupo de pesquisa; formar pesquisadores pós-graduados no tema do projeto; e tornar-se o grupo de pesquisa brasileiro mais avançado no tema deste projeto.

Todos os códigos computacionais serão implementados integralmente pelos membros do projeto. As principais características do modelo numérico a ser usado são: método dos volumes finitos; sistema de coordenadas não-ortogonais ajustadas aos contornos; arranjo co-localizado de variáveis; escoamentos em qualquer regime de velocidade; aproximações numéricas de 2ª ordem de acurácia; *solver* MSI com *multigrid*.

Os resultados que se pretende alcançar ao final da execução do projeto são:

- 1) Disponibilizar através da internet, gratuitamente a qualquer interessado, bem como a AEB, INPE e CTA, os programas-fonte e os programas-executáveis de todos os códigos computacionais implementados durante a execução deste projeto.
- 2) Ter publicado ou submetido para publicação pelo menos 3 artigos em revistas científicas internacionais para divulgar a pesquisa realizada.
- 3) Editar relatórios técnicos descrevendo em detalhes a pesquisa realizada.
- 4) Aumentar a complexidade dos problemas possíveis de serem resolvidos pelo grupo de pesquisa.
- 5) Possibilitar a 3 doutorandos uma aplicação relevante para suas teses.
- 6) Aumentar a capacitação nacional na simulação de escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH₂.

Os recursos financeiros que estão sendo solicitados a AEB totalizam R\$ 23.500,00. O projeto será executado por uma equipe de 5 pessoas de 3 universidades, que atuam na área do projeto há mais de uma década, tendo publicado 6 artigos científicos sobre o tema do projeto em congressos e revistas internacionais.

1 INTRODUÇÃO

Os foguetes a propelente líquido são o principal sistema de propulsão espacial (Habiballah *et al.*, 1998). Um dos propelentes utilizados é o sistema LOX/LH₂, isto é, oxigênio líquido como oxidante e hidrogênio líquido como combustível. Este sistema provavelmente continuará a ser o preferido pelas próximas décadas (Haidn e Habiballah, 2003). A técnica mais utilizada para refrigerar motores-foguete a propelente líquido de alta pressão é a regenerativa, às vezes combinada com refrigeração por filme (Habiballah *et al.*, 1998).

Os principais elementos de um motor-foguete a propelente líquido com refrigeração regenerativa são:

- Placa injetora: promove a injeção e atomização do combustível e do oxidante na câmara de combustão.
- Câmara de combustão: espaço onde ocorre a mistura do combustível e do oxidante e a combustão do propelente. É conectada à tubeira.
- Tubeira: espaço formado por um bocal convergente-divergente através do qual escoam e são acelerados os produtos da combustão.
- Canais de refrigeração: espaço onde escoam o refrigerante do motor, externamente à câmara de combustão e à tubeira.
- Paredes do motor: estrutura que envolve a câmara de combustão, tubeira e canais de refrigeração.

Uma descrição dos fenômenos físico-químicos envolvidos no funcionamento de um motor-foguete a propelente líquido pode ser vista no trabalho de Haidn e Habiballah (2003). Em resumo, tem-se na câmara de combustão um escoamento turbulento tridimensional de diversos gases reagindo quimicamente com taxa finita de reação, a alta pressão e temperatura. Estes gases com velocidade subsônica são acelerados através da tubeira até velocidades supersônicas. Os gases aquecidos, na câmara e na tubeira, transferem calor por convecção e radiação para as paredes do motor. O calor se propaga por condução tridimensional através das paredes e é retirado pelo refrigerante. O escoamento do refrigerante nos canais é tridimensional turbulento.

No motor Vulcain (Fröhlich *et al.*, 1993; LeBail e Popp, 1993) do foguete Ariane 5, por exemplo, o oxidante é oxigênio líquido e o combustível/refrigerante é hidrogênio líquido. A parede interna do motor e parte dos canais são de cobre e a parede externa é de níquel. O empuxo ao nível do mar é de 1007 kN, a temperatura máxima da parede chega a 750 K e a queda de pressão do refrigerante é de 23 bar. A pressão e a temperatura na câmara de combustão são de 100 bar e 3500 K, aproximadamente, e o fluxo de massa dos gases é de 232,3 kg/s. O fluxo de calor na parede interna no lado dos gases atinge 60 MW/m² na região da garganta da tubeira. A altura e a largura dos canais variam nas faixas de 9,5 a 12 mm e 1,3 a 2,6 mm, respectivamente. O fluxo de massa do refrigerante é de 33,7 kg/s na soma de todos os 360 canais deste motor. Os diâmetros da câmara e da garganta são de 0,415 m e 0,262 m, e o comprimento total do motor com refrigeração em contra-corrente é de 0,75 m.

Em termos de projeto de um motor-foguete a propelente líquido com refrigeração regenerativa, alguns parâmetros de interesse são o empuxo (F) produzido pelo motor, a temperatura máxima (T_{MAX}) atingida pela parede e a queda de pressão (Δp) do escoamento do refrigerante ao longo dos canais. A determinação do empuxo é fundamental para atender à missão de um foguete: massa da carga útil, um satélite por exemplo, e sua órbita. A distribuição de temperaturas da parede e seu valor máximo são essenciais na previsão da vida útil do motor e de sua falha estrutural. Finalmente, a queda da pressão do refrigerante ao longo dos canais é importante para dimensionar o seu sistema de bombeamento.

A determinação de F , T_{MAX} e Δp pode ser dividida em três problemas acoplados, assim definidos (Habiballah *et al.*, 1998; Fröhlich *et al.*, 1993):

- 1) Câmara-tubeira: escoamento reativo turbulento de uma mistura de gases na câmara de combustão e no bocal convergente-divergente (tubeira).
- 2) Paredes: condução de calor através das paredes do motor-foguete entre os gases no seu interior e o líquido refrigerante.
- 3) Canais: escoamento turbulento do líquido refrigerante nos canais em torno do motor-foguete.

Uma perspectiva da situação atual sobre a simulação numérica dos fenômenos envolvidos num motor-foguete a propelente líquido, com refrigeração regenerativa, é a seguinte:

- Os projetos de motores-foguete ainda são feitos essencialmente com modelos unidimensionais que usam fatores de correção empíricos (Fröhlich *et al.*, 1993).
- É necessário mais progresso em métodos numéricos que demandem menor tempo de computação (Habiballah *et al.*, 1998).
- Ainda não foi resolvida a predição acurada do fluxo de calor para a parede da tubeira (Schley *et al.*, 1996), que é de grande importância para prever o tempo de vida da câmara e da tubeira.
- A modelagem dos fenômenos ocorrendo dentro da câmara de combustão ainda não alcançou um nível satisfatório para assegurar resultados quantitativos confiáveis (Schley *et al.*, 1996).
- É muito difícil obter resultados experimentais confiáveis de temperatura e fluxo de calor devido aos altíssimos gradientes de temperatura na parede (Fröhlich *et al.*, 1993).
- Não são encontrados na literatura dados suficientes para realizar comparações com resultados experimentais ou numéricos (Marchi *et al.*, 2004).
- São relatados resultados aparentemente contraditórios; por exemplo: (i) para o fluxo de calor no divergente de uma tubeira, sua solução numérica do escoamento laminar apresenta uma diferença de 15% para o resultado experimental, e 120% para escoamento turbulento (Kacynski *et al.*, 1987); e (ii) dependendo da variável de interesse, se fluxo de massa, velocidade característica, impulso específico ou empuxo, comparações com resultados experimentais mostram que a solução numérica unidimensional pode ter erro menor do que uma bidimensional (Barros *et al.*, 1990).
- Não são estimados os erros numéricos das soluções numéricas. Conseqüentemente, conclusões equivocadas podem ser extraídas de comparações entre resultados numéricos de modelos matemáticos distintos, ou entre resultados numéricos e experimentais.
- Numa pesquisa bibliográfica feita em 26 de julho de 2004, na base de dados corrente do Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq, verificou-se que, excluindo-se dois grupos do INPE, o grupo de pesquisa proponente deste projeto é o único que tem atuado nos últimos cinco anos no tema da pesquisa proposta.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto é implementar códigos computacionais para resolver escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH₂. E avaliar os efeitos sobre os parâmetros F , T_{MAX} e Δp causados por:

- geometria da tubeira;

- pressão de combustão;
- propriedades termofísicas e de transporte constantes ou variáveis;
- radiação térmica;
- modelos unidimensionais e bidimensionais;
- fluido invíscido, viscoso laminar e turbulento;
- número de reações químicas;
- condição de contorno na superfície da parede do lado dos gases quentes; e
- número de nós das malhas usadas para discretizar os domínios de cálculo.

Também são objetivos: obter soluções numéricas de referência (*benchmarks*) para os problemas em consideração, com suas estimativas do erro numérico; e esclarecer algumas questões controversas da literatura, como aquelas mencionadas na Introdução.

Outros objetivos do projeto são: melhorar a infra-estrutura computacional do grupo de pesquisa; formar pesquisadores pós-graduados no tema do projeto; e tornar-se o grupo de pesquisa brasileiro mais avançado no tema deste projeto.

3 METODOLOGIA

O projeto está estruturado em três metas, cada uma com duração de 8 meses, totalizando dois anos. Ao final de cada meta, pretende-se ter um código computacional correspondente a ela, um relatório técnico e um artigo científico. Todos os códigos computacionais serão implementados integralmente pelos membros do projeto, e eles empregarão a linguagem de programação Fortran-95, com precisão dupla.

3.1 Meta 1: escoamento 1D Reativo

O objetivo principal desta meta é implementar um código computacional que resolve o problema unidimensional completo em consideração neste projeto, servindo de referência para comparações com os códigos que resolvem o problema bidimensional.

Atualmente, o grupo de pesquisa proponente deste projeto já tem implementado e testado um código computacional, denominado RHG1D, versão 2.0, que resolve de forma acoplada os três problemas seguintes:

- 1) Câmara-tubeira: escoamento unidimensional subsônico a supersônico, de gás compressível viscoso, monoespécie, com troca de calor.
- 2) Paredes: condução de calor unidimensional através das paredes do motor-foguete entre os gases no seu interior e o líquido refrigerante.
- 3) Canais: escoamento unidimensional subsônico, de líquido compressível viscoso, monoespécie, com troca de calor, do líquido refrigerante nos canais em torno do motor-foguete.

As propriedades termofísicas e de transporte podem ser consideradas constantes ou variáveis.

As principais características do modelo numérico usado no código RHG1D, cujos detalhes podem ser vistos nos textos de Maliska (2004) e Ferziger e Peric (2001), são: método dos volumes finitos; arranjo co-localizado de variáveis; escoamentos em qualquer regime de velocidade; aproximações numéricas de 2ª ordem de acurácia; *solver* TDMA.

Também já se tem um código computacional, denominado EQUIL1D, versão 1.0, que resolve o escoamento unidimensional subsônico a supersônico, em bocal convergente-divergente, congelado e reativo em equilíbrio químico para o propelente H₂/F₂, de gás compressível invíscido, multiespécie, sem troca de calor.

A Meta 1 é composta de duas etapas:

- 1a) Juntar os modelos matemáticos e numéricos dos códigos EQUIL1D e RHG1D gerando o código RHG1D, versão 3.0. Além dos problemas das Paredes e dos Canais, ele resolverá o seguinte problema da Câmara-tubeira: escoamento unidimensional subsônico a supersônico, em bocal convergente-divergente, congelado, reativo em equilíbrio químico e reativo com taxa finita de reação para o propelente LOX/LH₂, de gás compressível viscoso, multiespécie, com troca de calor. Período previsto: outubro/2004 a fevereiro/2005 = 5 meses.
- 1b) Incluir um *solver multigrid* geométrico (Hortmann *et al.*, 1990) ao código RHG1D, versão 3.0, gerando a versão 4.0. Assim será possível obter soluções numéricas em malhas extremamente refinadas para estimar confiavelmente o erro numérico das variáveis de interesse. Período previsto: março a maio/2005 = 3 meses.

3.2 Meta 2: Escoamento 2D Monoespécie

O objetivo principal desta meta é implementar um código computacional que resolve o problema bidimensional, não-reativo, para estudar os efeitos viscosos sobre as variáveis de interesse.

Atualmente, o grupo de pesquisa proponente deste projeto já tem implementado um código computacional, denominado MACH2D, versão 4.0, que resolve o escoamento bidimensional axissimétrico, laminar ou turbulento com o modelo algébrico de Baldwin e Lomax (Wilcox, 2004), de gás compressível, monoespécie, com troca de calor, para escoamento subsônico a supersônico em bocal convergente-divergente. Também resolve as equações de Euler.

As principais características do modelo numérico usado no código MACH2D, versão 4.0, cujos detalhes podem ser vistos nos textos de Maliska (2004) e Ferziger e Peric (2001), são: método dos volumes finitos; sistema de coordenadas não-ortogonais ajustadas aos contornos; arranjo co-localizado de variáveis; escoamentos em qualquer regime de velocidade; aproximações numéricas de 1^a ordem de acurácia; *solver* MSI.

A Meta 2 é composta de duas etapas:

- 2a) A partir do código MACH2D, versão 4.0, gerar a versão 5.0 com as seguintes inclusões: aproximações numéricas de 2^a ordem de acurácia; *solver multigrid* geométrico (Hortmann *et al.*, 1990); e acoplá-lo aos códigos que resolvem os problemas unidimensionais das Paredes e Canais. Período previsto: junho a outubro/2005 = 5 meses.
- 2b) A partir do código MACH2D, versão 5.0, gerar a versão 6.0 com a inclusão do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ de baixo número de Reynolds (Wilcox, 2004). Período previsto: novembro/2005 a janeiro/2006 = 3 meses.

3.3 Meta 3: Escoamento 2D Reativo

O objetivo principal desta meta é implementar um código computacional para resolver o problema bidimensional axissimétrico completo em consideração neste projeto, e para verificar os efeitos multidimensionais sobre as variáveis de interesse.

A Meta 3 é composta de três etapas:

- 3a) A partir do código MACH2D, versão 6.0, gerar o código RHG2D, versão 1.0 com a inclusão de escoamento multiespécie congelado para o propelente LOX/LH₂. Período previsto: fevereiro a março/2006 = 2 meses.
- 3b) A partir do código RHG2D, versão 1.0, gerar a versão 2.0 com a inclusão de escoamento reativo em equilíbrio químico para o propelente LOX/LH₂. Período previsto: abril a junho/2006 = 3 meses.

- 3c) A partir do código RHG2D, versão 2.0, gerar a versão 3.0 com a inclusão de escoamento reativo com taxa finita de reação para o propelente LOX/LH₂. Período previsto: julho a setembro/2006 = 3 meses.

3.4 Cronograma

Na tabela abaixo, apresenta-se o cronograma de execução física das atividades previstas nas metas 1 a 3, organizado em períodos trimestrais.

Início: outubro/2004.

Término: setembro/2006.

Meta	Etapa	Atividade	2005					2006		
			4º	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º
1		Escoamento 1D Reativo	X	X	X					
	1a	Código RHG1D, versão 3.0	X	X						
	1b	Código RHG1D, versão 4.0		X	X					
2		Escoamento 2D Monoespécie			X	X	X	X		
	2a	Código MACH2D, versão 5.0			X	X	X			
	2b	Código MACH2D, versão 6.0					X	X		
3		Escoamento 2D Reativo						X	X	X
	3a	Código RHG2D, versão 1.0						X		
	3b	Código RHG2D, versão 2.0							X	
	3c	Código RHG2D, versão 3.0								X

4 RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES ESPERADOS

Os resultados que se pretende alcançar ao final da execução do presente projeto são:

- 1) Disponibilizar através da internet, gratuitamente a qualquer interessado, bem como a AEB, INPE e CTA, os programas-fonte e os programas-executáveis de todos os códigos computacionais implementados durante a execução deste projeto.
- 2) Ter publicado ou submetido para publicação pelo menos 3 artigos em revistas científicas internacionais para divulgar a pesquisa realizada.
- 3) Editar relatórios técnicos descrevendo em detalhes a pesquisa realizada.
- 4) Aumentar a complexidade dos problemas possíveis de serem resolvidos pelo grupo de pesquisa.
- 5) Possibilitar a 3 doutorandos uma aplicação relevante para suas teses.
- 6) Aumentar a capacitação nacional na simulação de escoamentos reativos em motores-foguete, com refrigeração regenerativa, operando com o sistema LOX/LH₂.

5 REFERÊNCIAS

BARROS, J. E. M.; ALVIM FILHO, G. F.; PAGLIONE, P. Estudo de escoamento reativo em desequilíbrio químico através de bocais convergente-divergente. In: III ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS. **Anais...** Itapema, 1990.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. ed. Berlin: Springer, 2001.

FRÖHLICH, A.; POPP, M.; SCHMIDT, G.; THELEMANN, D. Heat transfer characteristics of H_2/O_2 – combustion chambers. In: 29th JOINT PROPULSION CONFERENCE. **Proceedings...** Monterey, 1993. AIAA paper 93-1826.

HABIBALLAH, M.; VINGERT, L.; DUTHOIT, V.; VUILLERMOZ, P. Research as a key in the design methodology of liquid-propellant combustion devices. **Journal of Propulsion and Power**, v. 14, n. 5, p. 782-788, 1998.

HADIN, O. J.; HABIBALLAH, M. Research on high pressure cryogenic combustion. **Aerospace Science and Technology**, v. 7, p. 473-491, 2003

HORTMANN, M.; PERIC, M.; SCHEUERER, G. Finite volume multigrid prediction of laminar natural convection: bench-mark solutions. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 11, p. 189-207, 1990.

KACYNSKI, K. J.; PAVLI, A. J.; SMITH, T. A. **Experimental evaluation of heat transfer on a 1030:1 area ratio rocket nozzle**. Cleveland: NASA Lewis Research Center, 1987. NASA Technical Paper 2726.

LAROCA, F. **Solução de escoamentos reativos em bocais de expansão usando o método dos volumes finitos**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica.

LAROCA, F.; MARCHI, C. H.; SILVA, A. F. C. Soluções de escoamentos quase-unidimensionais de fluidos compressíveis e viscosos em tuberias com troca de calor. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS. **Anais...** Rio de Janeiro, 1998. p. 1031-1036.

LAROCA, F.; MARCHI, C. H.; SILVA, A. F. C.; HINCKEL, J. N. Simulação de escoamentos quase-unidimensionais e reativos em bocais do tipo convergente-divergente. In: CONGRESSO IBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000.

LEBAIL, F.; POPP, M. Numerical analysis of high aspect ratio cooling passage flow and heat transfer. In: 29th JOINT PROPULSION CONFERENCE. **Proceedings...** Monterey, 1993. AIAA paper 93-1829.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MARCHI, C. H. Solução numérica do escoamento supersônico invíscido em bocais divergentes operando no vácuo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL. **Anais...** São José do Rio Preto, 1989.

MARCHI, C. H. **Solução numérica de escoamentos tridimensionais viscosos em qualquer regime de velocidade**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1992. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica.

MARCHI, C. H.; LAROCA, F.; SILVA, A. F. C.; HINCKEL, J. N. Solução numérica de escoamentos em motor-foguete com refrigeração regenerativa. In: CONGRESSO

IBERO LATINO-AMERICANO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000.

MARCHI, C. H.; LAROCA, F.; SILVA, A. F. C.; HINCKEL, J. N. Numerical solutions of flows in rocket engines with regenerative cooling. **Numerical Heat Transfer, Part A**, v. 45, p. 699-717, 2004.

MARCHI, C. H.; MALISKA, C. R. A nonorthogonal finite-volume method for the solution of all speed flows using co-located variables. **Numerical Heat Transfer, Part B**, v. 26, p. 293-311, 1994.

MARCHI, C. H.; SILVA, A. F. C.; MALISKA, C. R. Solução numérica de escoamentos invíscidos em tuberias com velocidade supersônica na saída. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS. **Anais...** Rio de Janeiro, 1992. p. 145-148.

MARCHI, C. H.; SILVA, A. F. C. Unidimensional numerical solution error estimation for convergent apparent order. **Numerical Heat Transfer, Part B**, v. 42, p. 167-188, 2002.

SCHLEY, C. A.; HAGEMANN, G.; KRÜLLE, G. Towards an optimal concept for numerical codes simulating thrust chamber processes in high pressure chemical propulsion systems. **Acta Astronautica**, v. 38, n. 4-8, p. 427-436, 1996.

SILVA, A. F. C.; MARCHI, C. H. Estimativa de erros de discretização multidimensional em dinâmica dos fluidos. In: IV SIMPÓSIO MINEIRO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL. **Anais...** Uberlândia, v. 1, 2000, p. 497-504.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. 2. ed. La Canada: DCW Industries, 2004.

APÊNDICE

1 EQUIPE TÉCNICA

O projeto será executado por uma equipe de 5 pessoas de 3 universidades:

Carlos Henrique Marchi

Título: doutor em engenharia mecânica, UFSC, 2001

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cargo: professor efetivo adjunto

Dedicação ao projeto: 10 horas/semana

Função no projeto: gerenciar o projeto, implementar códigos computacionais

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos multidimensionais em qualquer regime de velocidade, análise de erros numéricos, métodos *multigrid*

Luciano Kiyoshi Araki

Título: engenheiro mecânico, UFPR, 2003

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cargo: doutorando, bolsista CAPES

Dedicação ao projeto: 40 horas/semana

Função no projeto: implementar códigos computacionais, modelar escoamentos turbulentos

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos reativos turbulentos

Fernando Laroca

Título: mestre em engenharia mecânica, UFSC, 2000

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cargo: professor efetivo assistente

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: modelar escoamentos reativos

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos reativos

Márcio Augusto Villela Pinto

Título: mestre em matemática e computação científica, UFSC, 1997

Instituição: Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG)

Cargo: professor efetivo assistente

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: implementar rotinas *multigrid*

Especialidades principais: análise numérica e métodos *multigrid*

Fábio Alencar Schneider

Título: mestre em engenharia mecânica, UFSC, 1998

Instituição: Centro Universitário Positivo (UNICENP)

Cargo: professor efetivo adjunto

Dedicação ao projeto: 2 horas/semana

Função no projeto: analisar erros numéricos

Especialidades principais: simulação numérica de escoamentos multidimensionais, análise de erros numéricos

Todos os membros da equipe são doutorandos no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, da Universidade Federal do Paraná, orientados pelo gerente do projeto. E todos integram o Grupo de Pesquisa em Dinâmica dos Fluidos Computacional da UFPR.

2 RECURSOS FINANCEIROS

Pretende-se aplicar os recursos financeiros recebidos da Agência Espacial Brasileira conforme segue.

Custeio R\$ 9.500,00

Capital R\$ 14.000,00

Total R\$ 23.500,00

Rubrica: Equipamento e Material Permanente Nacional

Descrição: 2 microcomputadores Pentium IV HT 3,4 GHz Intel, memória DDR de 3 GB RAM, HD 120 GB, monitor 19", placa de vídeo GF FX5200 128 MB, placa de rede 10/100, CD-ROM, CD-RW, caixas de som, teclado, drive 1.44 MB, mouse óptico com 3 botões, gabinete tipo torre e estabilizador

Total: R\$ 14.000,00

Rubrica: Material de Consumo Nacional

Descrição: 4 toners para impressora laser HP 1100 (R\$ 1.400), 5 caixas de papel A-4 (R\$ 625), outros (CD, disquete, pastas etc) (R\$ 375)

Total: R\$ 2.400,00

Rubrica: Outros Serviços de Terceiros – Pessoa Física

Descrição: Tradução/revisão de 3 artigos escritos em inglês

Total: R\$ 1.000,00

Rubrica: Outros Serviços de Terceiros – Pessoa Jurídica

Descrição: Aquisição de papers, despesas de correio e outras para publicação de 3 artigos

Total: R\$ 2.000,00

Rubrica: Passagens

Descrição: 1 viagem de Luciano K. Araki de Curitiba a São José dos Campos e Cachoeira Paulista para conhecer as instalações do IAE, ITA e INPE (R\$ 1.200); 2 viagens de Carlos H. Marchi de Curitiba a Brasília para apresentação dos relatórios anuais do projeto (R\$ 2.100)

Total: R\$ 3.300,00

Rubrica: Diárias

Descrição:	5 diárias para a viagem de Luciano K. Araki de Curitiba a São José dos Campos e Cachoeira Paulista para conhecer as instalações do IAE, ITA e INPE (R\$ 500); 2 diárias para as 2 viagens de Carlos H. Marchi de Curitiba a Brasília para apresentação dos relatórios anuais do projeto (R\$ 300)
Total:	R\$ 800,00

Rubrica: Contrapartida das Instituições

Descrição:	Apenas considerando-se os salários de 3 professores envolvidos no projeto, de um bolsista CAPES de doutorado e a dedicação de cada um ao projeto, estima-se que a contrapartida das três instituições envolvidas no projeto seja:
UFPR:	40 horas/mês do prof. Carlos H. Marchi, R\$ 1.350 x 24 meses = R\$ 32.400,00
CAPES:	bolsa do doutorando Luciano K. Araki, R\$ 1.267 x 24 meses = R\$ 30.408,00
UEPG:	8 horas/mês do prof. Márcio A. V. Pinto, R\$ 110 x 24 meses = R\$ 2.640,00
UNICENP:	8 horas/mês do prof. Fábio A. Schneider, R\$ 275 x 24 meses = R\$ 6.600,00
Total:	R\$ 72.048,00

3 INFRA-ESTRUTURA DISPONÍVEL

O projeto será desenvolvido no Laboratório de Experimentação Numérica (LENA), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. A infra-estrutura disponível no LENA para desenvolver o projeto de pesquisa é a seguinte:

- Microcomputadores Pentium III e IV 2.4 GHz, 1GB RAM
- Impressora laser HP 1100
- *Softwares* Windows, Word, Wgnuplot, Notepad e Fortran

4 TRABALHOS PRÉVIOS

Os trabalhos já publicados pelos integrantes do grupo deste projeto, e que têm relação direta com o presente projeto, podem ser divididos em três temas: métodos numéricos, análise de erros numéricos e propulsão.

Sobre métodos numéricos, podem ser citados os trabalhos de Marchi (1992) e Marchi e Maliska (1994). Ambos tratam da solução numérica de fluidos compressíveis, equações de Euler e Navier-Stokes, bi e tridimensionais, em qualquer regime de velocidade, isto é, desde escoamentos subsônicos até supersônicos.

Sobre análise de erros numéricos, podem ser citados os trabalhos de Silva e Marchi (2000) e Marchi e Silva (2002). Eles mostram como estimar confiavelmente erros de discretização de problemas uni e multidimensionais.

Sobre propulsão, podem ser citados diversos trabalhos e seus respectivos problemas considerados:

- Marchi (1989) e Marchi *et al.* (1992): escoamento bidimensional axissimétrico de gás compressível invíscido, monoespécie, sem troca de calor; no primeiro, escoamento supersônico em bocal divergente e no segundo, escoamento subsônico a supersônico em bocal convergente-divergente.

- Laroca *et al.* (1998): escoamento unidimensional subsônico a supersônico, em bocal convergente-divergente, de gás compressível viscoso, monoespécie, com troca de calor.
- Laroca *et al.* (2000) e Laroca (2000): escoamento unidimensional subsônico a supersônico, em bocal convergente-divergente, congelado e reativo em equilíbrio químico para o propelente H_2-F_2 , de gás compressível invíscido, multiespécie, sem troca de calor.
- Marchi *et al.* (2000, 2004): escoamento na tubeira acoplado à condução de calor na parede e ao escoamento nos canais de refrigeração de um motor-foguete. Na tubeira, tem-se escoamento unidimensional subsônico a supersônico, de gás compressível viscoso, monoespécie, com troca de calor. Na parede, a condução de calor é unidimensional. Nos canais, tem-se escoamento unidimensional subsônico, de líquido compressível viscoso, monoespécie, com troca de calor. As propriedades termofísicas e de transporte são variáveis.

Os cinco autores destes 11 trabalhos são: Marchi, Laroca, Silva, Maliska e Hinckel. Marchi e Laroca integram o projeto proposto. Maliska, professor da UFSC, orientou o mestrado de Marchi. Silva, também professor da UFSC, orientou o mestrado de Laroca e o doutorado de Marchi. Hinckel é pesquisador do INPE. Marchi, Laroca e Silva integram o grupo de pesquisa em Propulsão Líquida, do INPE, liderado por Hinckel.

Ainda sobre propulsão, o grupo de CFD da UFPR já tem implementado um código computacional que resolve o escoamento bidimensional axissimétrico, laminar ou turbulento (modelo algébrico de Baldwin e Lomax), de gás compressível, monoespécie, com troca de calor, para escoamento subsônico a supersônico em bocal convergente-divergente. Ainda não foram publicados trabalhos com estes modelos matemáticos.