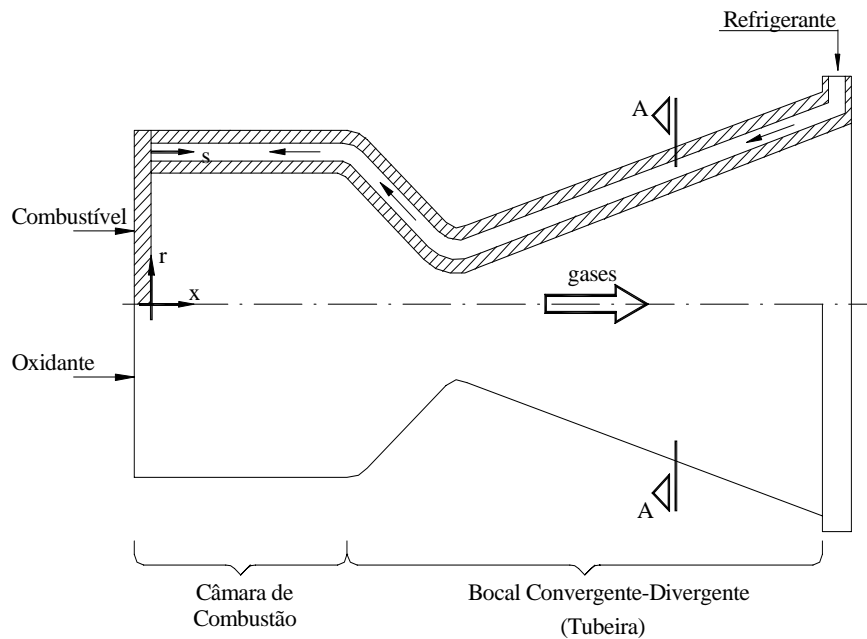


Simulação Numérica de Escoamento Reativo em Motor-Foguete com Refrigeração Regenerativa

Projeto de pesquisa financiado pela Agência Espacial Brasileira (AEB), Programa UNIESPAÇO 2004-2006



Carlos Henrique Marchi (UFPR, gerente do projeto)

Luciano Kiyoshi Araki (UFPR)

Thiago Fabricius Konopka (UFPR)

Fábio Alencar Schneider (UNICENP)

Márcio Augusto Villela Pinto (UEPG)

Cosmo Damião Santiago (UniBrasil)

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Endereço: Caixa postal 19040

81531-980, Curitiba, PR

Telefone: (41) 3361-3126

Fax: (41) 3361-3129

e-mail: marchi@demec.ufpr.br

Curitiba, 23 de novembro de 2006.

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

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 (oxigênio e hidrogênio líquidos). O problema completo é dividido em três partes acopladas:

- 1) Câmara-tubeira: escoamento reativo turbulento de uma mistura de gases na câmara de combustão e no bocal convergente-divergente (tubeira).
- 2) Parede: condução de calor através da parede 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.

O primeiro código computacional implementado foi o Gibbs 1.3. Sua função é calcular propriedades físicas e composição química de uma mistura de gases formada pela reação entre hidrogênio e oxigênio. Neste código foram incluídos diversos modelos de reações químicas entre hidrogênio e oxigênio, com três a oito espécies (H₂, O₂, H₂O, OH, O, H, H₂O₂ e HO₂), e até 18 reações de dissociação. A verificação do código foi realizada através da comparação entre os resultados numéricos obtidos e os dos códigos CEA e Teqworks, ambos desenvolvidos pela NASA.

O segundo código computacional implementado foi o Mach1D 5.0. Ele obtém a solução numérica do escoamento unidimensional ao longo da tubeira para cinco modelos físicos: gás monoespécie com propriedades constantes; gás monoespécie com propriedades variáveis; escoamento congelado de mistura de gases; escoamento

em equilíbrio químico local de mistura de gases; e escoamento em desequilíbrio químico (com taxa finita de reação) de mistura de gases. Alguns destes modelos físicos foram verificados através da comparação dos respectivos resultados aos obtidos a partir do código CEA e soluções analíticas.

Do acoplamento do código Mach1D 5.0 ao código Canal 2.0, este destinado à solução da transferência de calor ao longo da parede da tubeira e do escoamento do refrigerante no interior dos canais, obteve-se o código RHG1D 3.0. Este código permite resolver o problema unidimensional completo, anteriormente apresentado. Com este código, pode-se efetuar simulações levando-se em consideração efeitos físicos como a viscosidade dos gases, rugosidade da tubeira, radiação e convecção entre os gases de combustão e a parede da tubeira.

O quarto código computacional implementado foi o Mach2D 6.0, que permite resolver o escoamento bidimensional reativo, ou não, da mistura de gases de combustão ao longo da tubeira. Este código apresenta as mesmas opções de modelos físicos do programa Mach1D 5.0, exceto o modelo de escoamento em desequilíbrio químico, que ainda se encontra em implementação.

Todos os códigos computacionais foram implementados integralmente pelos membros do projeto. As principais características do modelo numérico 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 2^a ordem de acurácia; e *solver* TDMA (códigos unidimensionais) e MSI (código bidimensional).