

TRANSIENTE EM TÚNEL DE VENTO TRANSÔNICO PELO USO COMBINADO DO SISTEMA DE INJEÇÃO COM O COMPRESSOR PRINCIPAL

João Batista Pessoa Falcão Filho

Luís Carlos Sandoval Góes

Marcos Aurélio Ortega

Centro Técnico Aeroespacial (CTA), Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Sistemas Aeronáuticos – Subdivisão de Aerodinâmica (ASA-L)

Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50

12.228-904, São José dos Campos, São Paulo, E-mail: joaobpff@uol.com.br

Resumo

O trabalho descreve um modelo matemático, baseado na técnica de parâmetros concentrados, aplicado ao circuito aerodinâmico de um túnel de vento transônico, para análise do seu comportamento transiente. O modelo matemático é construído de maneira a permitir implementar os principais sistemas de controle da pressão de estagnação, temperatura de estagnação e número de Mach relativos às condições na seção de testes e o sistema de controle da injeção de massa. Esses sistemas foram discretizados pelo método de diferenças finitas, para acoplamento com as equações obtidas para o circuito aerodinâmico do túnel. O modelo foi utilizado na investigação do comportamento transiente do túnel de vento transônico em projeto pelo CTA (Centro Técnico Aeroespacial – São José dos Campos – SP), às solicitações dos diversos sistemas e na análise da estabilidade de operação, dando especial atenção ao sistema de injeção, por representar uma inovação tecnológica do projeto.

Palavras-chave: Túnel Transônico, Parâmetros Concentrados, Sistema de Controle, Injeção

INTRODUÇÃO

Desde 1986 o CTA (Centro Técnico Aeroespacial – São José dos Campos – SP) tem envidado esforços para prover o país com um túnel de vento transônico de alta qualidade, uma vez que sua única instalação industrial para ensaios de modelos aeronáuticos é o Túnel Subsônico do CTA, construído na década de 50. O projeto do Túnel Transônico foi criado com o propósito de dar suporte ao atual estágio de desenvolvimento da aeronáutica no país, incorporando os principais avanços na área de construção de túneis, refletindo o “estado da arte”. Dentro da realidade de escassez de recursos do país, foi adotada uma solução de otimização que combina o uso do sistema convencional de potência por compressor principal (contínuo) com a injeção de ar comprimido a alta velocidade (intermitente) para ampliar o envelope de operação, sem aumento da potência do compressor principal. A Tabela 1 mostra as principais características do túnel e a Fig. 1 o seu envelope de operação relativo às condições na seção de testes, na qual está destacada a região da injeção. O envelope é a região fechada na figura e indica a capacidade de desempenho do túnel em termos de uma potência limite. A região de injeção é obtida a partir de uma condição de escoamento estacionário, na qual, operando com o compressor principal na condição de potência máxima (curva tracejada na Fig. 1) e, nessas circunstâncias, a injeção de massa a alta entalpia de estagnação é acionada. Há um aumento da energia total do fluxo que se refletirá num aumento da pressão e

do número de Mach, resultando num aumento do número de Reynolds na seção de testes. O uso da injeção como fonte de potência em túneis de vento é bem conhecido (Long, 1984), entretanto, seu uso combinado com o compressor convencional, representa uma novidade tecnológica que justifica uma análise cuidadosa, razão da presente pesquisa. O objetivo principal, então, é o de conhecer a resposta dinâmica do túnel às perturbações advindas das ações dos diversos controles, para avaliar sua estabilidade e estabelecer ações de controle mais efetivas para cada modo de operação do túnel.

Tabela 1. Características Principais do Túnel Transônico do CTA

Área da Seção de Testes (A_{ST})	2,0 x 2,4 m ²
Número de Mach	de 0,2 a 1,3
Pressurização do circuito	de 0,5 a 3,0 atm

- Operação contínua por compressor axial de 34 MW de potência;
- Operação intermitente com uso de injeção por 30 segundos (mínimo);
- Circuito fechado, seção de testes com paredes fendidas.
- Primeira garganta móvel, segunda garganta e flapes;

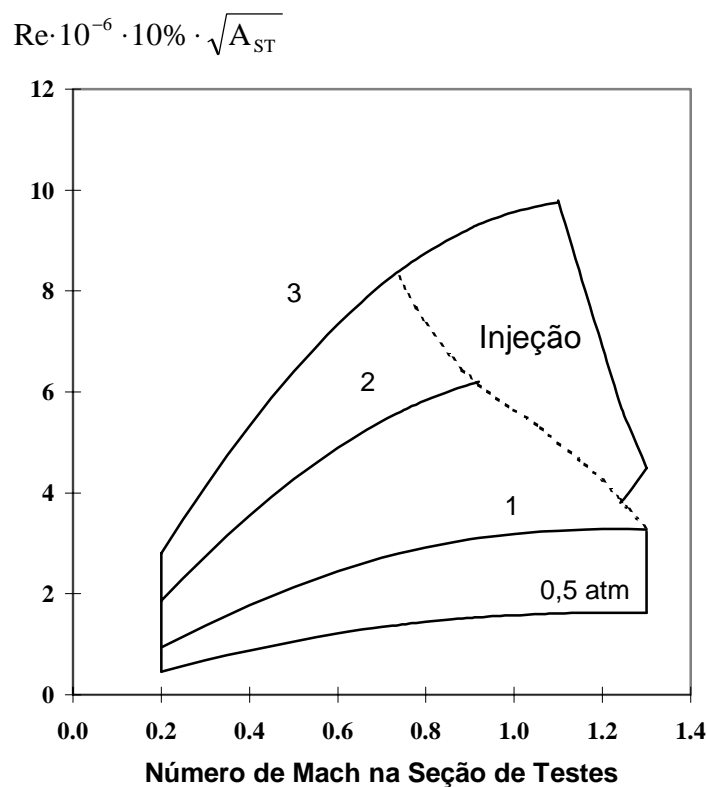


Figura 1. Envelope de Operação do Túnel (Re - número de Reynolds).

Os fenômenos presentes no escoamento em um túnel transônico só são corretamente representados a partir de modelos tridimensionais de parâmetros distribuídos, entretanto, a solução das equações diferenciais fundamentais seria de enorme dificuldade de implementação numérica. Além disso, para a resposta dinâmica e em aplicações de controle, a necessidade de uma solução rápida de razoável precisão preponderam sobre as soluções de

alta precisão em regime permanente. Como exemplos de pesquisas em túneis de vento, para análises de alta precisão em regime permanente tem-se Fico (1991), Jackson (1976) e Stich (1985), enquanto para aplicações de controle tem-se ETW (1980), Krosel (1986), Long (1984) e NTF (1982).

Sob esse enfoque é que se fez uso do modelo zero-dimensional com a técnica de parâmetros concentrados. A primeira aplicação sistemática da técnica empregada a um túnel de vento é a devida a Krosel *et al* (1986), na qual o túnel subsônico do AWT (*Altitude Wind Tunnel*) do complexo do *Lewis Research Center* da NASA (*National Aeronautical and Space Administration*) foi modelado. O presente trabalho representa um avanço em relação aos casos citados, porque o túnel a ser tratado é transônico e, sobretudo, introduz-se no modelo o sistema de injeção.

As simulações em computador são de grande importância na área de túneis de vento pois representam meios baratos e seguros para projetos e previsões de desempenho de grandes instalações de testes aerodinâmicos. As simulações do comportamento transiente podem ser usadas para descobrir alternativas de procedimentos de controle e cenários operativos, assegurando uma operação estável das instalações reais. Além disso elas permitem a familiarização e o treinamento para operadores.

A Figura 2 mostra os principais sistemas de controle do túnel e onde eles atuam.

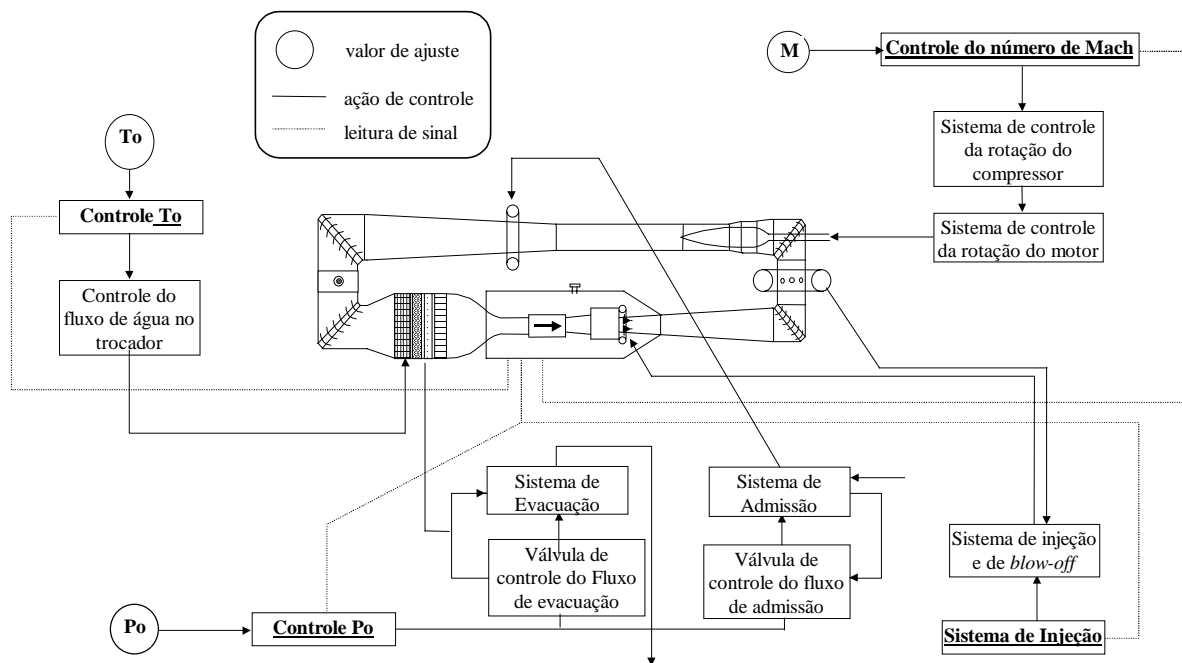


Figura 2. Localização dos sistemas de controle do túnel.

MODELO MATEMÁTICO

O modelo resolve as equações básicas da continuidade, energia e quantidade de movimento nas suas formas integrais, sujeitas às hipóteses de: ar como gás perfeito, desprezadas as forças de campo, as gerações internas de calor, e o circuito do túnel é considerado adiabático, exceto no trocador de calor e no compressor axial. As variáveis das equações são a densidade, a energia interna e o fluxo de massa. O modelo é construído de modo a permitir ações de controle a partir das seguintes variáveis de controle relativas às condições da seção de testes: número de Mach, pressão de estagnação e temperatura de estagnação.

A injeção contribui aumentando a quantidade de movimento do escoamento principal, recuperando parte das perdas de carga do circuito, causadas pelos vários processos irreversíveis presentes. O efeito final desejado é o aumento do número de Mach na seção de testes. O sistema consiste em 10 injetores distribuídos nas paredes inferior e superior da seção após a segunda garganta, na entrada do difusor (ver Fig. 2). Os injetores estão imersos num escoamento principal com velocidade máxima aproximada de número de Mach 0,5 e operam em condição de entupimento aerodinâmico com número de Mach 1,8 na sua saída.

De um modo particularizado, descrito com detalhes em Falcão (1996), o método divide o circuito fechado do túnel em um certo número de regiões chamadas de ‘elementos concentrados’ (cada uma abrangendo um comprimento determinado do circuito do túnel) para as quais todas as propriedades são consideradas constantes num determinado instante. O elemento concentrado é concebido com área transversal constante para permitir o emprego da equação da quantidade de movimento. Como os elementos concentrados são sequenciais, as metades dos volumes de dois elementos adjacentes são combinados para definir um ‘volume de controle’, para emprego das equações da continuidade e da energia. A utilização de volumes de controle e elementos concentrados é feita de forma casada e, convenientemente, parâmetros físicos são “trocados” entre as duas geometrias representativas. As equações, da forma como são empregadas no modelo, são:

$$\dot{\rho}_i = \frac{1}{V_i} \left[\sum_{\text{entrada}} \dot{m}_i - \sum_{\text{saída}} \dot{m}_i \right], \quad (1)$$

$$\dot{E}_{o_i} = \left[\sum_{\text{entrada}} \dot{m}_i T_{o_i} - \sum_{\text{saída}} \dot{m}_i T_{o_i} \right] + \dot{Q} - \dot{W}_e, \quad (2)$$

$$\dot{m}_i = \frac{\bar{A}_i}{L_i} \left\{ \left(1 - \frac{A_{inj}}{\bar{A}_i} \right) (P_i - P_{i+1}) + \frac{A_{inj}}{\bar{A}_i} P_{inj} + \frac{\dot{m}_i}{\bar{A}_i} (V_i - V_{i+1}) + \frac{\dot{m}_{inj}}{\bar{A}_i} V_{inj} - f_i \frac{L_i}{D_i} \rho_i \frac{V_i^2}{2} \right\}, \quad (3)$$

onde $\dot{\rho}_i$, \dot{m}_i , \dot{E}_{o_i} , T_{o_i} , \dot{Q} , \dot{W}_e e V_i são a taxa de variação da densidade, o fluxo de massa, a taxa de variação da energia total, a temperatura de estagnação, o fluxo de calor, a taxa de variação do trabalho de eixo e o volume relativos ao volume de controle i ; \dot{m}_i , \bar{A}_i , L_i , P_i , V_i e D_i são a taxa de variação do fluxo de massa, a área transversal, o comprimento, a pressão estática na entrada, a velocidade na entrada e o diâmetro equivalente relativos ao elemento concentrado i ; \dot{m}_{inj} , A_{inj} , V_{inj} e P_{inj} são o fluxo de massa, a área, a velocidade e a pressão estática na saída dos injetores; e, finalmente, f_i é o coeficiente de atrito na forma convencional como definido em Shapiro (1953).

O modelo usa dados experimentais da operação do túnel em regime permanente e/ou previsões teóricas a partir de programas que calculam as perdas de carga em circuitos de túneis de vento para a determinação do coeficiente de atrito “ f ” para cada elemento concentrado. Neste caso os coeficientes de atrito empregados foram os obtidos a partir do programa de cálculo de perda de carga desenvolvido para a elaboração do projeto conceptual do túnel, desenvolvido em parceria com a firma norte americana Sverdrup Technology Inc. (Sverdrup, 1988). O comportamento do compressor é implementado pela discretização de seu envelope de operação. Seus parâmetros são interpolados para atender os requisitos de perda de carga momentâneo no circuito do túnel.

As Equações (1), (2) e (3) modelam o circuito aerodinâmico do túnel e foram discretizadas a partir do método de Runge-Kutta de quarta ordem (ver Cormick, 1971).

SISTEMAS DE CONTROLE

Para poder-se repetir determinadas condições de ensaio em túnel, é necessário o completo controle dos parâmetros de escoamento na seção de testes, que é obtido pelo uso de sistemas de controle automático. A Tabela 2 mostra os parâmetros e as ações de controle para cada sistema. A pressão no túnel é controlada a partir do fluxo de massa que é admitido ou extraído do túnel por meio de compressores auxiliares. A temperatura é controlada pelo fluxo de massa da água que passa pelo trocador de calor (tipo ar-água), instalado na região de baixa velocidade. O número de Mach é controlado primordialmente pela rotação do compressor principal e por vários outros meios de menor grandeza (ajuste fino). O sistema de injeção é subdividido em dois outros tendo duas funções bem distintas: a de controlar a pressão de estagnação nos injetores e a de extrair a massa de ar admitida no túnel para manter o balanço de massa no túnel, esta última executado pelo chamado sistema *blow-off*.

Table 2. Parâmetros de Controle (relativos à seção de testes)

Parâmetro a ser controlado	Ação
Pressão de estagnação	→ Fluxo de massa do sistema de pressurização
Temperatura de estagnação	→ Fluxo de água de refrigeração
Número de Mach	→ Rotação do compressor principal
Número de Mach com a Injeção	→ Pressão de estagnação nos injetores/ <i>blow-off</i>

Para cada sistema de controle as funções de transferência foram discretizadas por diferenças finitas a montante para obter as equações a serem empregadas em conjunto com as equações discretizadas obtidas a partir das Eqs. (1), (2) e (3), que descrevem o circuito aerodinâmico do túnel. Em cada sistema de controle o sinal de erro é processado por um controlador ‘proporcional + integral’ (PI) para poder atingir erro nulo de estado estacionário. Como exemplificação do procedimento empregado, o sistema de injeção/*blow-off* será apresentado em detalhe (apenas a parte da injeção). A Figura 3 mostra o diagrama de blocos do sistema, com o modelo para a válvula de controle obtida a partir de Buckley (1964). A variável de controle para o sistema de injeção é a pressão de estagnação nos injetores que determina o fluxo de massa pela condição de entupimento, para uma velocidade de saída de número de Mach 1,8 (Zucker, 1977). O sinal de pressão é comparado com o sinal de ajuste e a diferença é processada por um controlador tipo ‘proporcional+integral’ para a obtenção do ajuste apropriado da válvula de controle (ver Fig. 3). Os parâmetros da válvula com os parâmetros do reservatório de ar comprimido determinam o fluxo de massa e a perturbação na pressão que realimenta o diagrama. As Eqs. (4), (5) e (6) são as formas discretas das funções de transferência do diagrama de blocos. Quanto à outra parte da injeção que é o sistema *blow-off*, convém salientar que o fluxo de massa da injeção é o parâmetro de ajuste do sistema *blow-off*, e apresenta um diagrama de blocos semelhante ao da injeção. Os símbolos usados nas equações são os de uso comum em teoria de controle (Ogata, 1987). Outros detalhes e definições desses e dos demais sistemas são encontrados em Falcão (1996).

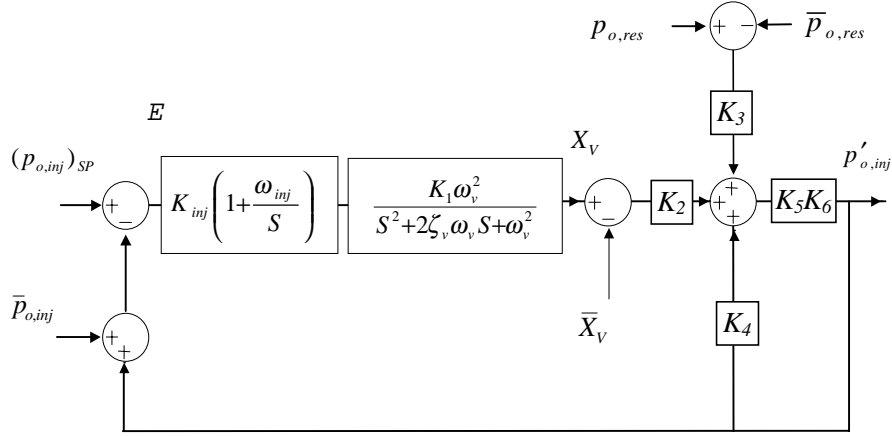


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de controle da injeção.

$$E[kT] = (p_{o,inj})_{SP}[kT] - (\bar{p}_{o,inj}[kT] + p'_{o,inj}[kT]), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} X_V[kT] = & \frac{3 + 4\zeta_v \omega_v T + \omega_v^2 T^2}{1 + 2\zeta_v \omega_v T + \omega_v^2 T^2} X_V[(k-1)T] - \frac{3 + 2\zeta_v \omega_v T}{1 + 2\zeta_v \omega_v T + \omega_v^2 T^2} X_V[(k-2)T] \\ & + \frac{1}{1 + 2\zeta_v \omega_v T + \omega_v^2 T^2} X_V[(k-3)T] + \frac{K_v K_{inj} \omega_v^2 T^2 (1 + \omega_{inj} T)}{1 + 2\zeta_v \omega_v T + \omega_v^2 T^2} E[kT] \\ & - \frac{K_v K_{inj} \omega_v^2 T^2}{1 + 2\zeta_v \omega_v T + \omega_v^2 T^2} E[(k-1)T], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p'_{o,inj}[kT] = & K_5 K_6 K_3 (p_{o,res}[kT] - \bar{p}_{o,res}[kT]) + K_5 K_6 K_2 (X_V[kT] - \bar{X}_V[kT]) \\ & + K_5 K_6 K_4 p'_{o,inj}[kT] \end{aligned} \quad (6)$$

RESULTADOS

Inicialmente, para fins de validação, o presente modelo foi empregado para obtenção da resposta do túnel AWT (*Altitude Wind Tunnel*), da Nasa, comparando com os resultados de Krosel *et al* (1986), sendo bem sucedido.

Depois o modelo foi empregado para representar o Túnel Transônico do CTA. O emprego da técnica de parâmetros concentrados para o circuito aerodinâmico em conjunto com os modelos discretos dos diversos sistemas de controle serviu para demonstrar que as condições de operação do túnel se dão de uma forma estável. Foram realizadas exaustivas simulações de alteração do comando de 10% do valor de regime da temperatura de estagnação, da pressão de estagnação e do número de Mach, individualmente e combinados, para levantar as respostas do sistema como um todo. Os parâmetros de saída foram a temperatura de estagnação, a pressão de estagnação e o número de Mach relativos à seção de testes, a taxa de compressão, o fluxo de massa, a eficiência e a rotação relativos ao compressor principal, o fluxo de massa no sistema de controle de temperatura (troca de calor) e o fluxo de massa no sistema de pressurização do túnel. Falcão (1996) apresenta inúmeros desses resultados.

Finalmente, foi simulado o processo de injeção tanto com todos os sistemas de controle ativos como quando o sistema de pressurização e do controle do número de Mach foram mantidos inativos, para definição da estratégia de ação de controle em relação ao sistema de injeção. A Figura 4 mostra a resposta do número de Mach na seção de testes para uma ação típica de atuação da injeção onde, neste caso, os demais sistemas de controle foram mantidos inativos, exceto o do controle de temperatura. Observa-se uma estabilização no valor por cerca de 20 segundos, tempo este suficiente para a aquisição de dados no túnel. O sistema de controle da temperatura possui grande inércia, sendo muito pouco sensível às alterações provenientes do processo de injeção.

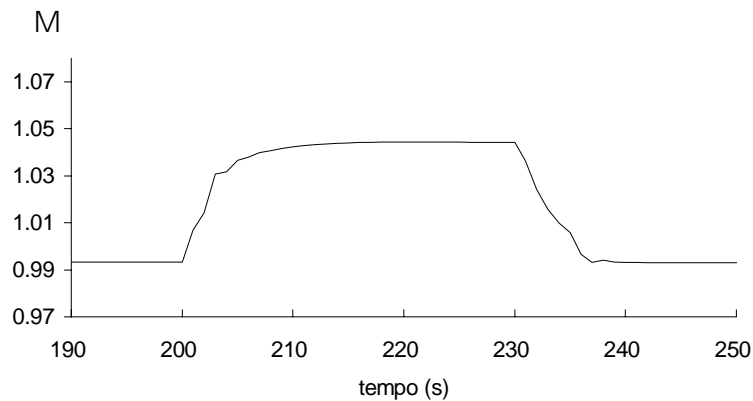


Figura 4. Influência da injeção sobre o número de Mach na seção de testes.

A Figura 5 mostra o envelope de operação do compressor da forma como foi discretizado para uso no modelo. Nela vê-se o impacto sofrido pelo compressor com o uso da injeção. A injeção proporciona ao circuito do túnel um ganho em termos de pressão de estagnação. Devido à inércia do compressor principal, sua rotação mantida constante (controle inativo), ele “sente” o circuito requerendo uma taxa de compressão menor e, para esta condição de rotação, ocorre um aumento no fluxo de massa pelo mesmo e em todo o circuito do túnel, o que acarretará num aumento do número de Mach na seção de testes. Como os valores de fluxo e rotação normalizados a partir dos valores de temperatura e pressão na entrada do compressor e condições do ambiente não diferem muito para este processo, a linha de evolução praticamente acompanha a curva de rotação constante.

Razão de compressão , $\lambda_c = p_{0,CS} / p_{0,CE}$

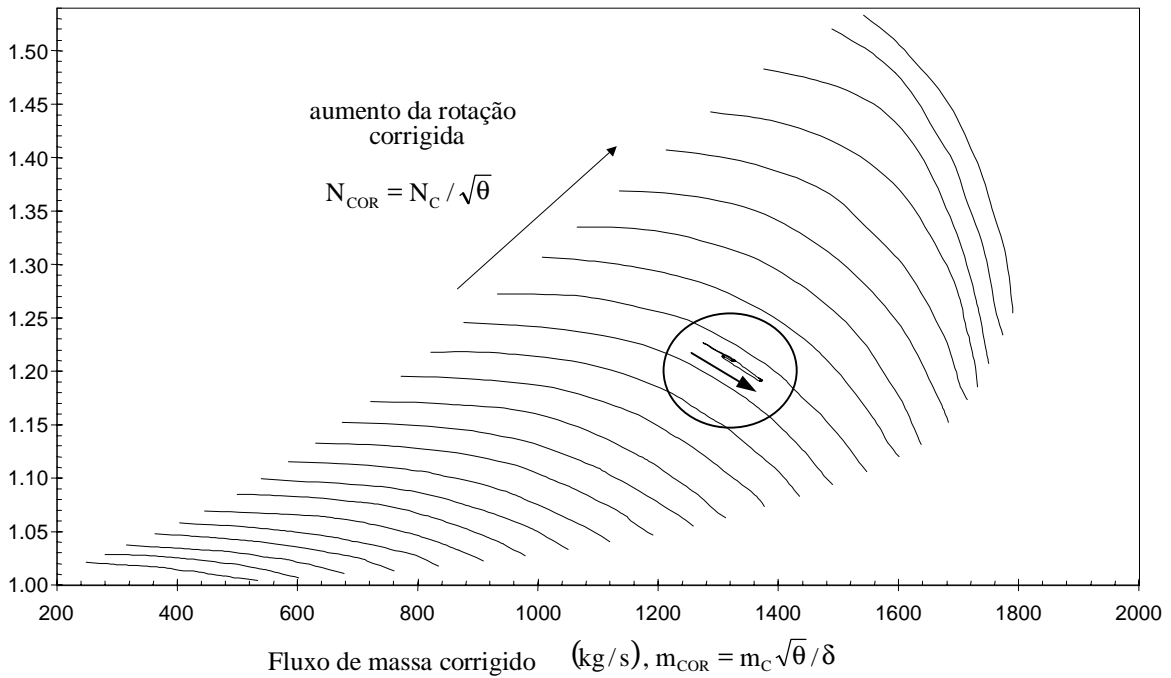


Figura 5. Influência da injeção sobre o envelope operacional do compressor.

As Figuras 6 a 8 mostram o resultado dos parâmetros principais da seção de testes quando a injeção é feita com os demais controles ativos. A Figura 6 mostra a resposta do número de Mach, donde conclui-se ser imprópria essa utilização, por não ser possível obter um patamar com número de Mach constante na seção de testes, impossibilitando uma adequada aquisição de dados. Mais evidente ainda é a Figura 7, onde vê-se que o sistema de controle da pressão do túnel age de forma a instabilizar a operação durante a injeção. Na Figura 8 observa-se também uma variação grande no valor da temperatura durante a injeção, entretanto, como o sistema de controle de temperatura é de grande inércia, a variação da temperatura advém das bruscas variações da pressão e da oscilação no ponto de operação do compressor principal.

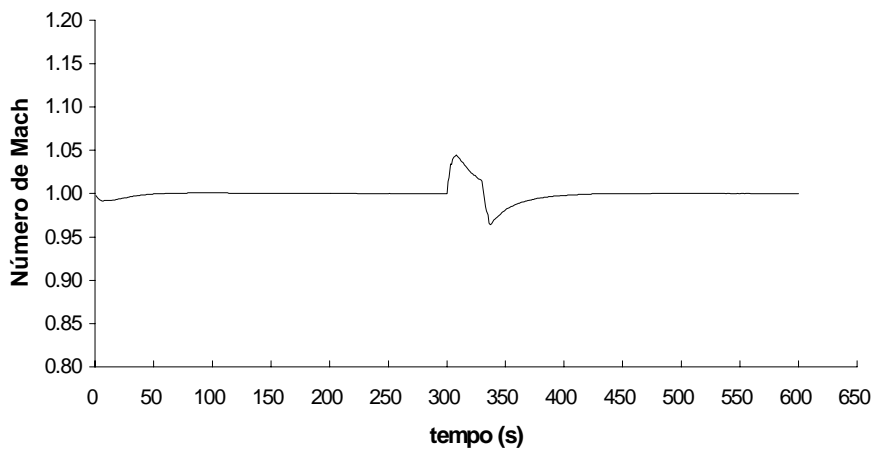


Figura 6. Influência da injeção sobre o número de Mach na seção de testes.

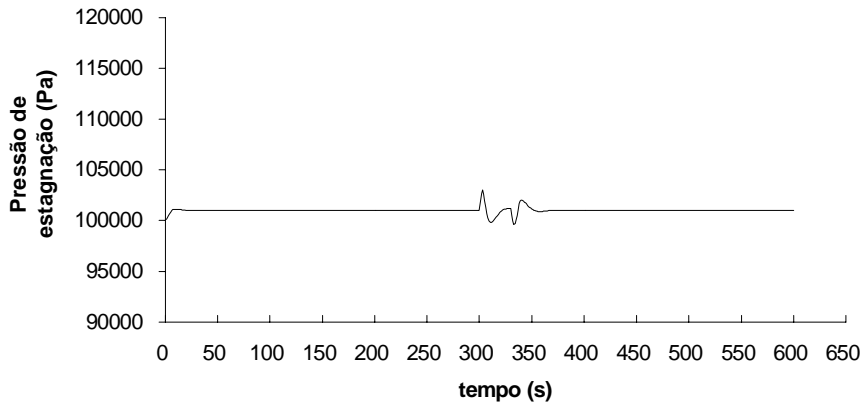


Figura 7. Influência da injeção sobre a pressão de estagnação na seção de testes.

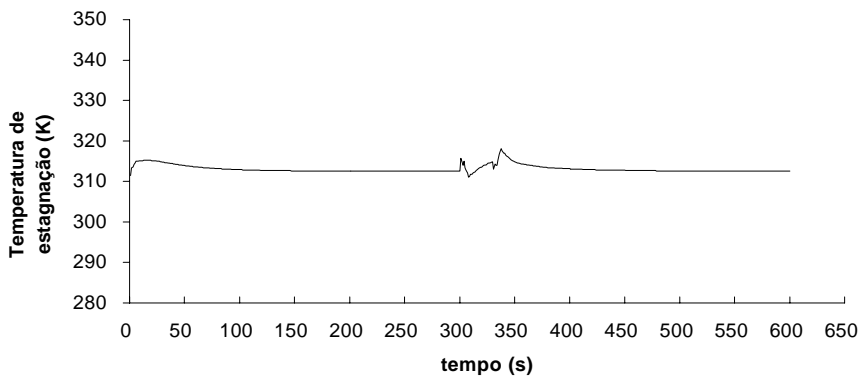


Figura 8. Influência da injeção sobre a temperatura de estagnação na seção de testes.

CONCLUSÕES

A boa concordância com os resultados obtidos no túnel do AWT (*Altitude Wind Tunnel*), permitiu que o modelo desenvolvido fosse empregado com certa confiança para o Túnel Transônico do CTA e os resultados foram bastante consistentes. Pode-se constatar que ações rápidas, estáveis e efetivas, foram obtidas a partir dos parâmetros determinados para os diversos sistemas de controle. Foi também possível levantar as características dinâmicas do túnel e seus subsistemas e, principalmente, estabelecer um procedimento de operação adequado para o uso da injeção combinada no túnel. Constatou-se que, neste caso, é necessário que os demais sistemas de controle automáticos estejam inativos para obtenção de condições satisfatórias para a aquisição de dados – os sistemas ativos reagem de forma a instabilizar o processo de injeção, não sendo possível estabelecer um intervalo de tempo suficiente em regime permanente para a aquisição de dados.

REFERÊNCIAS

- Buckley, P. S, 1964, *Techniques of Process Control*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- ETW – European Transonic WindTunnel, 1980, “Simplified Model of ETW,” ADERSA-GERBIOS/SVERDRUP, Internal Publication.

- Falcão, J.B.P., 1996, “Modelo Transiente do Circuito Aerodinâmico de Túnel de Vento Transônico,” Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- Fico, N.G.R.C., Jr., 1991, “Simulação do escoamento na Região do Flape de Reentrada de um Túnel de Vento Transônico,” (Tese de Doutorado – ITA).
- Jackson, F.M., 1976, “A Methodology for Evaluating Ducting Pressure Losses in Aerospace Test Facilities,” AEDC-CW-01-6-76.
- Krosel, S. M., Cole, G. L., Bruton, W. M. and Szuch, J. R., 1986, “A Lumped Parameter Mathematical Model for Simulation of Subsonic Wind Tunnels,” NASA TM-87324.
- Long, D. F. and Gladen, K. S., 1984, “Development of a Control System for An Injector Powered Transonic Wind Tunnel,” AIAA.
- NTF Reference Notebook, 1982, Collection of papers, unpublished.
- Ogata, K., 1987, *Discrete Modern Control*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Shapiro, A.H., 1953, *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol I, The Ronald Press Company, New York.
- Stich, P.B., 1985, “Mathematical Modeling of the AEDC Propulsion Wind Tunnel (16T),” AEDC-TR-84-32.
- SVERDRUP Technology Inc., 1989, “Brazilian Transonic Wind Tunnel Concept Definition Study,” (Relatório Final do Projeto Conceptual do Túnel Transônico do CTA).
- Zucker, R. D., 1977, *Fundamentals of Gas Dynamics*, Matrix Publishers, Inc., Beaverton, Oregon - USA.

Abstract

This work describes a lumped parameter mathematical model and its application in an aerodynamic circuit of a transonic wind tunnel used to analyze its transient behavior, allowing the implementation of control actions for the tunnel. It was conceived in such a way to allow representation of the main automatic control systems which perform the setting of the stagnation pressure, stagnation temperature and Mach number related to the test section conditions. The lumped parameter model was successfully used in the investigation of the transient behavior of the transonic wind tunnel being designed by CTA (Center of Technology of Aeronautics – São José dos Campos – SP), when the tunnel is subjected to various disturbances from its automatic control systems. Stability was checked, specially during injection system operations.