

DESCRIÇÃO TÉCNICA DO TÚNEL TRANSÔNICO PILOTO DO CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL

João Batista Pessoa Falcão Filho

Centro Técnico Aeroespacial (CTA)
Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Sistemas Aeronáuticos (ASA-L)
Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50
CEP: 12228-904, São José dos Campos, São Paulo
e-mail: falcao@directnet.com.br

Olympio Achilles de Faria Mello

Centro Técnico Aeroespacial (CTA)
Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Sistemas Aeronáuticos (ASA-L)
Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50
CEP: 12228-904, São José dos Campos, São Paulo
e-mail: oamello@directnet.com.br

Resumo. *O Túnel Transônico Piloto do CTA (TTP) é uma versão em escala reduzida 1:8, do projeto de um túnel transônico industrial. Procurou-se manter ao máximo as mesmas soluções técnicas adotadas para o túnel grande. O TTP foi instalado fundamentalmente para estudar as soluções inovadoras empregadas no projeto do túnel grande e servir como uma ferramenta de pesquisa básica, atendendo a ensaios de geometrias simples e de perfis bidimensionais. O TTP tem o circuito convencional, com acionamento contínuo por compressor axial de dois estágios e um sistema de acionamento intermitente combinado com uso de injeção de massa a alta velocidade (número de Mach 1,9), que recupera parte da perda de carga ao longo do circuito, resultando num projeto mais barato para o compressor principal. O projeto do TTP é moderno e sua operação é baseada em sistemas automáticos para controle da pressão de estagnação, temperatura de estagnação, número de Mach e umidade, relativos à seção de testes. O artigo apresenta uma descrição do túnel, ressaltando suas principais características operacionais, seus sistemas e componentes e a filosofia de projeto adotada.*

Palavras chave: *Túnel de Vento Transônico, Aerodinâmica Experimental, Ensaios Aerodinâmicos, Projeto Mecânico*

1. Introdução

Desde 1985 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 Aerodinâmico n.º 2 (TA-2), subsônico, construído na década de 1950, com seção de testes de 2,1 x 3,0 m, atingindo velocidades até número de Mach 0,4. Embora o TA-2 esteja em plena operação e venha sendo empregado em diversos projetos aeroespaciais, sua faixa de velocidade está, há muito tempo, aquém das necessidades dos projetos brasileiros na área aeronáutica e espacial.

Desta forma, 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, uma solução inovadora de otimização energética que combina o uso do sistema convencional de potência por compressor principal (acionamento contínuo) com a injeção de ar comprimido a alta velocidade através de bicos injetores (acionamento intermitente) foi adotada com o propósito de ampliar o envelope de operação, sem aumentar a potência instalada do compressor principal.

Neste sentido, o grupo de trabalho criado no CTA desenvolveu, em conjunto com a empresa Sverdrup Technology Inc., de Tullahoma, Tennessee, EUA, especializada em projetos de túneis de vento, o projeto básico do Túnel Transônico Industrial em 1989, com seção de testes de 2,0 x 2,4 m, faixa de número de Mach de 0,3 a 1,4, com circuito fechado pressurizado de 0,5 a 3,0 bar e potência total instalada de 70 MW, visando dotar o país com uma instalação de ensaios de alta velocidade que atenda aos requisitos para as décadas futuras.

Para dar prosseguimento ao projeto, no estudo de suas soluções inovadoras adotadas, o grupo de trabalho do CTA adotou várias linhas de pesquisa que culminaram na elaboração de teses acadêmicas para obtenção de curvas de carga na região dos flapes de reentrada da seção de testes e estudo dos trasientes e controles associados à operação do túnel (Fico, 1991; Falcão Filho, 1996), além de muitos outros trabalhos apresentados em congressos e revistas especializadas (e.g. Escosteguy, 1988, 1990; Falcão Filho e Nogueira, 1988; Falcão Filho, 1990; Falcão Filho et al., 1998; Nogueira et al., 1988; Ortega et al., 2000a, 2000b).

Pelo fato da instalação do Túnel Transônico Industrial representar um desembolso alto, da ordem de 100 milhões de dólares, e de incorporar idéias inovadoras, o grupo de projeto do CTA decidiu desenvolver o projeto e a instalação do TTP – Túnel Transônico Piloto do CTA em escala 1/8 do túnel industrial para simular em escala menor, na prática, os fenômenos envolvidos para dar confiança nas soluções inovadoras adotadas para o projeto do túnel industrial.

Além disso, o TTP, por si só, mesmo com uma seção de testes pequena (25x30 cm), permite atender a necessidade de ensaios aeronáuticos de alta velocidade para geometrias simplificadas, ensaios de perfis, pesquisa básica e realização de testes qualitativos em modelos pequenos, prevendo configurações e economizando etapas no desenvolvimento de um modelo novo de uma aeronave.

2. Principais Características de Projeto do TTP

O TTP tem as mesmas características do túnel industrial, apenas incorporando algumas simplificações que resultaram numa maior economia, sem prejuízo de sua capacidade de simulação das condições de operação do túnel industrial. Suas principais características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características Principais do TTP.

Dimensões da seção de testes	0,25 x 0,30 x 0,81 m
Faixa de número de Mach	0,2 a 1,3
Pressurização do circuito	0,5 a 1,2 bar

- Circuito fechado;
- Operação contínua por compressor axial de 830 kW de potência;
- Operação intermitente com uso de injeção por 30 segundos (mínimo);
- Seção de testes com paredes fendidas com até 11% de área aberta e sistema de evacuação da câmara Plena;
- Controles automáticos de velocidade, pressão e temperatura e umidade na seção de teste;
- Ensaios de forças e momentos estáticos, distribuição de pressões e sistema de visualização por Schlieren;
- Controle e aquisição de dados via plataforma LabView.

A Figura 1 mostra o envelope de operação em relação às condições de pressão de estagnação e número de Mach na seção de testes. Destaca-se nela a região da injeção, que é atingida a partir do compressor principal do túnel operando em sua condição de regime permanente e, nessas circunstâncias, se aciona o sistema de injeção, que introduz massa a alta entalpia de estagnação. Há um aumento da energia total do fluxo que se reflete num aumento da pressão e do número de Mach, resultando num aumento do número de Reynolds na seção de testes.

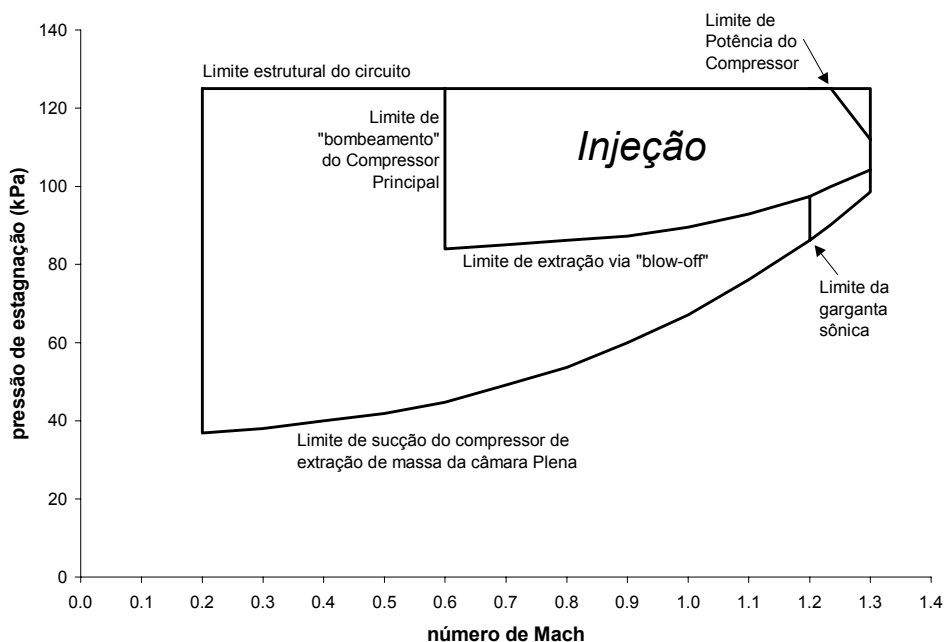


Figura 1. Envelope de Operação do TTP relativo às condições na seção de testes.

O uso de 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 existência do TTP. No túnel industrial a região de injeção é praticamente uma extensão do envelope de

operação com acionamento só com o compressor principal. No caso do TTP, entretanto, a injeção não oferece um ganho significativo, uma vez que o envelope pode ser atingido quase totalmente só com o uso do compressor principal. Entretanto, a importância do uso da injeção no TTP está justamente em permitir testar o funcionamento da injeção, a estabilidade da operação e comparar-se com as condições obtidas somente do compressor principal. No caso particular do TTP apenas a região além da curva de limite de potência do compressor é que representa um ganho real em termos do envelope de operação do túnel.

As demais regiões características do envelope, que envolvem os limites de diversos equipamentos relacionados ao circuito aerodinâmico do túnel, serão comentadas à medida que seus sistemas relacionados forem sendo apresentados.

O túnel, como um sistema global, age de forma integrada para atingir as condições desejadas na seção de testes: pressão de estagnação, temperatura de estagnação e número de Mach, para se poder, assim, reproduzir da melhor forma possível as condições de voo, refletidas fundamentalmente pelo número de Reynolds. Para isto, o TTP incorpora ainda 4 sistemas principais de controle automático em malha fechada que são: o sistema de controle da rotação do compressor principal, o sistema de controle da pressão de estagnação na seção de testes (que inclui ainda os controles de taxa de extração forçada de massa pelas paredes da seção de testes e da umidade do ar no circuito), o sistema de controle da temperatura de estagnação na seção de testes e o sistema de controle da injeção e exaustão (“blow-off”). A Tabela 2 mostra os parâmetros e as ações de controle para cada um dos sistemas.

Tabela 2. Parâmetros de controle do TTP.

Parâmetro de controle na seção de testes	Ações
Pressão de estagnação	→ Fluxo de massa do sistema de pressurização
Taxa de extração forçada da câmara plena	→ Fluxo de massa de extração
Umidade de ar do circuito	→ Fluxo de massa pelos secadores
Temperatura de estagnação	→ Fluxo de água de refrigeração
Número de Mach	→ Rotação do compressor principal e posição das pás de entrada do compressor (IGV)
Número de Mach com uso da injeção	→ Pressão de estagnação nos injetores/na exaustão

O controle do número de Mach é o de maior complexidade e o objetivo primordial no projeto de um túnel, pois é o primeiro parâmetro representativo do ensaio a ser reproduzido. Há inúmeras maneiras de o implementar e, para se atingir uma região extensa de número de Mach, é preciso usar mais de um tipo de controle para cada faixa de velocidades. As ações para o controle do número de Mach descritas na Tab. 2 devem ser combinadas com as condições de tipo da primeira garganta, porcentagem de abertura dos flapes de reentrada, taxa de extração forçada de massa pela câmara plena, contorno da segunda garganta para atingir o completo controle e uniformidade do número de Mach ao longo da seção de testes. Todas as características de funcionamento deste sistema, como também dos demais serão determinados através de inúmeros ensaios pelo levantamento de parâmetros de operação do TTP durante a fase de calibração do túnel, ora em andamento.

3 Descrição da instalação do TTP

A Figura 2 apresenta um esquema da instalação real do TTP, com seus principais componentes e sistemas de controle, como distribuídos nas áreas de instalação indicadas por: A – sala de controle do túnel; B – galpão de instalação do circuito aerodinâmico; C – sala das máquinas; D – sala dos transformadores; E – ar livre. Estão também indicadas as tubulações de água e de ar comprimido que ligam os principais equipamentos. Seu circuito aerodinâmico é uma estrutura metálica tubular fechada, em forma de anéis retangulares. Na perna de teste estão instalados o trocador de calor (8), a câmara de tranquilização (9), a contração (10), a câmara Plena (1), que abriga a primeira garganta, a seção de testes, os flapes, a segunda garganta e a injeção, e o difusor de alta velocidade (3). Na perna de retorno estão instalados o compressor principal (5), a seção de reinjeção (6) e o difusor de baixa velocidade. Essas duas pernas são interligadas por quatro peças em forma de esquinas, equipadas com aletas direcionadoras de fluxo. Entre as esquinas, após a região da injeção, está instalada a seção de exaustão da injeção (“blow-off”) (4). Entre as outras duas, estão instaladas a tomada de ar do controle de pressão do túnel e a válvula de segurança do circuito (7).

Todas as ações de gerenciamento e contratação de firmas ficaram a cargo da equipe de projeto do TTP, como também a execução do projeto detalhado, principalmente no que concerne aos componentes de maior complexidade de projeto, como a seção de testes, a seção de contração, as geometrias dos injetores, difusores, telas, colmeias etc. Para o detalhamento de instalação e o projeto de diversos dispositivos mecânicos auxiliares, a firma ABLE Consultoria Ltda. foi contratada, a qual gerou os desenhos para a fabricação. Algumas partes do túnel são de fabricação do CTA através da Divisão de Mecânica do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), enquanto para as demais foram contratadas, entre outras, as firmas EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica), INNOBRA, KMS, ABB (“Asea Brown Boveri”). A Tabela 3 mostra, para os principais componentes numerados na Fig. 2, sua nomenclatura, sua função e características e o fabricante e/ou a firma responsável pelo projeto. Para a instalação do circuito do túnel e seus sistemas mecânicos, a firma MCROCHA foi contratada e para o desenvolvimento do sistema de controle, com a instalação de sensores e placas de controle e de aquisição de dados a firma NAVCON – Navegação e Controle.

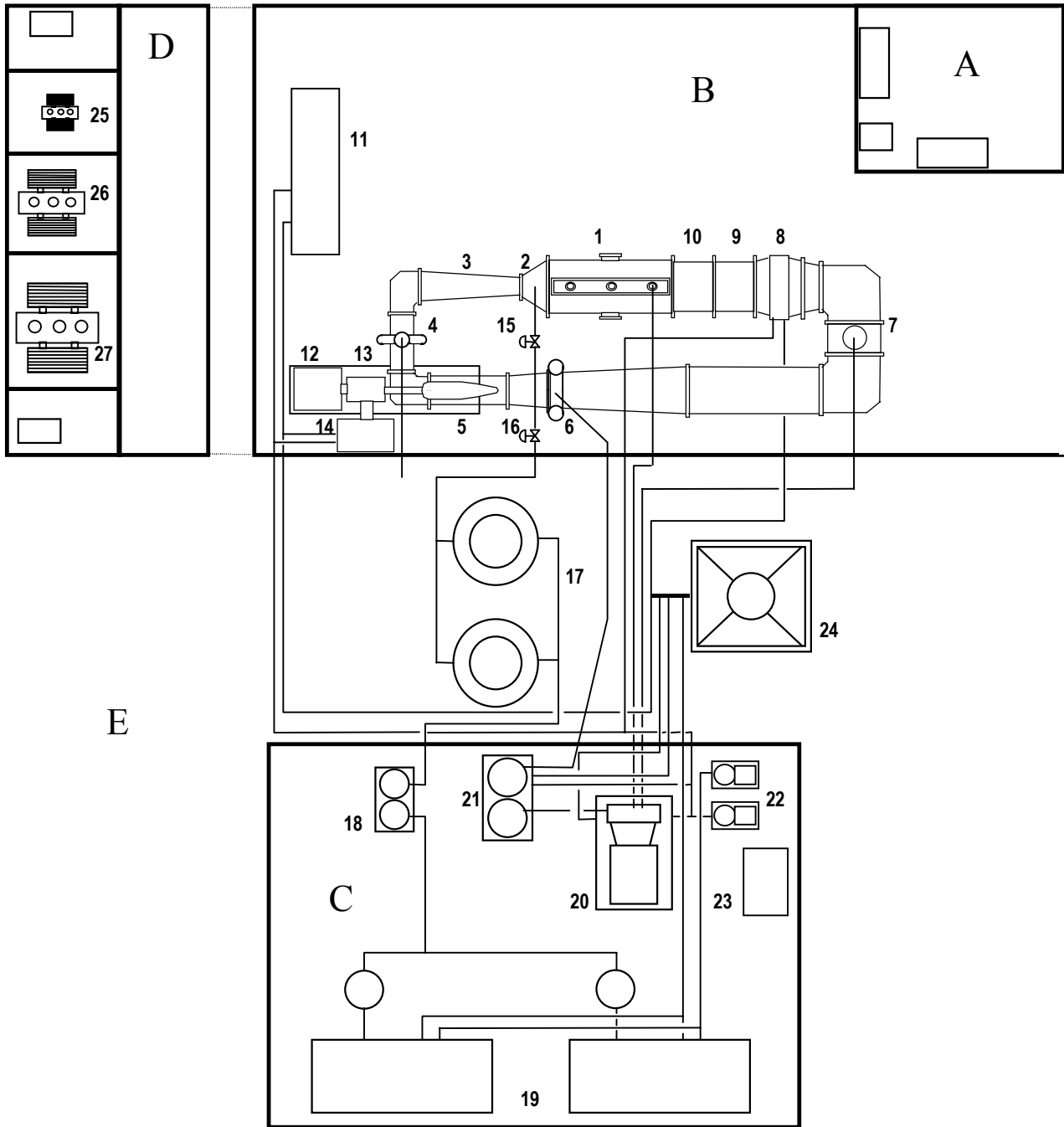


Figura 2. Circuito Aerodinâmico do TTP.

4 Características de projeto e descrição funcional dos principais componentes do TTP

Para o projeto do TTP foram adotados critérios de projeto que simulem o melhor possível a instalação industrial, validando os dados de perda de carga gerados a partir de cálculos teóricos, avaliando o desempenho da segunda garganta, verificando as especificações de qualidade de fluxo, avaliando a injeção quando à interação com o uso do compressor principal, ao controle do nível de pressão e do número de Mach e os efeitos da localização da exaustão da injeção (“blow-off”).

4.1 Estrutura da casca do circuito aerodinâmico e fixações no solo

A casca do TTP é uma escala 1/8 do túnel industrial, e projetado de acordo com os requisitos da norma “ASME Boiler and Pressure Vessel code.” A faixa de pressão a que a casca poderá estar sujeita é de 0 a 1,25 bar absolutos. A casca tem um projeto similar ao empregado em tubulações flangeadas e é suportada por bases estruturais sobre sapatas

de concreto, deixando o circuito apoiado 0,5 metros acima do piso de concreto, na sua região mais baixa. Todo o circuito é definido a partir do posicionamento do compressor principal que, por sua vez, está instalado sobre uma base inercial de concreto. O circuito do túnel está ligado à tubulação do compressor principal através de acoplamento com vedação tipo “O-ring” de forma a evitar que qualquer dilatação ou perturbação no circuito venha a ser transmitido para o compressor. O circuito do túnel tem forma retangular com 17 metros de comprimento e 3 metros de largura.

Tabela 3. Principais componentes do circuito aerodinâmico e suas funções.

	Nomenclatura	Função/Características	Fabricante
1	Câmara Plena e perna de testes	Abriga a seção de testes e estabelece condições controláveis de pressão para controle da taxa de extração pelas paredes semi-abertas da seção de testes	Innobra, CTA, Embraer
2	Seção de Injetores	Abriga 10 bicos injetores para admissão de massa para recuperação de parte da perda de carga no circuito	CTA
3	Difusor de Alta Velocidade	Desacelera o escoamento para mudar sua direção e acondicioná-lo à entrada do compressor principal	Innobra
4	Região de “blow-off”	Extraí o ar admitido pelo sistema de injeção	Innobra
5	Compressor principal	Compressor axial de 2 estágios da VOITH com ajustes de RPM e IGV (“inlet Guide Vane”), recupera as perdas de carga do circuito	Voith (ABB)
6	Seção de readmissão	Readmite ar no túnel pelo sistema de controle de pressão	Innobra
7	Válvula de segurança	De projeto ABLE, protege o circuito contra sobrepressão	Innobra
8	Trocador de calor	Ar/Água, retira o calor gerado pelas irreversibilidades para estabilização da temperatura na seção de testes	
9	Câmara de tranquilização	Acondiciona o escoamento através de telas e colmeia para se atingir condições mais estáveis no escoamento	Innobra
10	Seção da contração	Acelera o escoamento para entrada na seção de testes	Embraer
11	Conversor de frequência	De fabricação SAMI Megastar, altera a frequência para controlar a rotação do motor de indução	ABB
12	Motor principal	De indução (828 kW, 3585 RPM) aciona a caixa de transmissão	ABB
13	Caixa de transmissão	Amplia de 3585 RPM para 9900 RPM a rotação para acionamento do compressor principal	BHS ABB
14	Sistema hidráulico	Lubrifica e refrigera a caixa de transmissão	Hydac, ABB
15	Válvula de controle da injeção	Controla a pressão de estagnação nos injetores que, trabalhando entupidos, mantém fluxo de massa constante	Masoneilan
16	Válvula de corte da injeção	Dispara o sistema de injeção	
17	Reservatórios de ar da injeção	Com 10 m ³ cada e 40 bar, alimenta o sistema de injeção	KMS
18	Secador de alta pressão	Seca por sílica-gel o ar para o sistema de injeção	Ingersol Rand
19	Compressores da injeção	A pistão, tipo PHE, com 92 kW de potência cada, carregam os reservatórios do sistema de injeção em 45 minutos	Ingersol Rand
20	Compressor do sistema de controle de pressão	Centrífugo, tipo CENTAC, com 180 kW de potência, aciona o sistema de controle de pressão	Ingersol Rand
21	Secador de baixa pressão	Seca por sílica-gel o ar para o sistema de controle de pressão para readmissão no circuito do túnel	Ingersol Rand
22	Bombas d’água	Distribuem a água para resfriamento dos diversos componentes do túnel, circulando pela torre de resfriamento	Mark
23	Compressor de ar de serviço	Fornecer ar comprimido de serviço para acionamento de todas as válvulas de controle e mancal do compressor CENTAC	Schulz
24	Torre de resfriamento	Com 2000 litros na base, troca 1,3 MW de calor proveniente de todos os sistemas do túnel, por ventilação forçada	Alpina
25	Transformador para os prédios	Com 50 kW de potência, fornece energia para os prédios, iluminação etc.	
26	Transformador para a casa das máquinas	Com 750 kW de potência, fornece energia para os compressores da casa de máquinas, bombas e secadores	
27	Transformador para o motor principal	Com 1250 kW de potência, é acionado pelo conversor de frequência e fornece energia para o motor principal	Itaipu

4.2 Estruturas internas do circuito aerodinâmico

As estruturas internas do túnel condicionam o escoamento interno ao circuito. Nas 4 esquinas há pás direcionadoras em seções elípticas para permitir a mudança suave de orientação do escoamento. Na região do compressor o fabricante

já o forneceu com a parte do circuito que o envolve, incluindo as pás direcionadoras na esquina. Na entrada do compressor há uma tela grossa de aço para impedir a entrada de objetos que possam causar dano às suas pás. Na câmara de tranquilização há uma tela na entrada, uma colmeia e depois duas telas. As telas são feitas a partir de fio de aço inoxidável de 0,381 mm de diâmetro por 1,21 mm de distância da malha, instaladas sob tensão para eliminação de rugas e cumprem a função de diminuir as perturbações na direção longitudinal do escoamento. A colmeia consiste de estruturas tipo casulo sextavado de diâmetro 9,53 mm com paredes de 0,102 mm e comprimento de 152 mm em alumínio para garantir um amortecimento nas perturbações na direção transversal ao escoamento. A seção de contração converte a geometria circular com diâmetro de 1,275 m da saída da câmara de tranquilização, para a geometria retangular da entrada da primeira garganta, de dimensões 0,550 m de largura e 0,250 m de altura. Portanto, uma razão de contração 17 num comprimento total de 1,139 m, com contorno em fibra de vidro e enchimento em poliuretano para dar sustentação à superfície de contorno. O projeto da contração foi desenvolvido de forma específica para garantir os requisitos de aceleração de fluxo com baixo índice de atrito.

4.3 Primeira Garganta

Enquanto no túnel industrial a primeira garganta tem geometria ajustável remotamente, através de atuadores que conformam sua geometria, para o TTP optou-se por uma simplificação no projeto, construindo-se 2 primeiras gargantas com geometrias fixas e intercambiáveis. Uma sônica, capaz de atingir até número de Mach 1,2 (conforme vê-se na curva limite na Fig. 1), a partir de atuação em outros dispositivos associados ao controle do número de Mach (ver item sobre o controle do número de Mach) e outra com projeto específico para número de Mach 1,3. O comprimento da primeira garganta é de 0,9125 m, partindo de uma geometria retangular de $0,25 \times 0,55 \text{ m}^2$ para a geometria da entrada da seção de testes. As paredes superior e inferior são planas e as mesmas para as três geometrias, enquanto as paredes laterais incorporam a curvatura necessária para a contração até a entrada na seção de testes. Todas as paredes são de liga de Alumínio 6061 T-6 usinadas.

4.4 Seção de testes e seção de flapes de reentrada

A seção de testes do TTP tem área de entrada de $0,25 \times 0,30 \text{ m}^2$ com comprimento de 0,8125 m com paredes laterais ajustáveis em ângulos de divergência/convergência de 0,5 graus. As paredes laterais têm 2 fendas longitudinais e as paredes de topo e piso têm 4 fendas longitudinais com geometrias especificamente projetadas para se obter uma distribuição ótima do número de Mach na seção de testes. As fendas são de até 11% de abertura. As paredes são fabricadas a partir de ligas de Alumínio 6061-T6 e as laterais incorporam duas janelas retangulares na posição do modelo para fins de visualização. Os flapes estão instalados nas laterais na seção seguinte à seção de testes, com altura de 0,25 m e comprimento de 0,60 m. O ajuste do ângulo de abertura é manual através de manoplas que acionam um parafuso sem fim. O que distingue o túnel transônico é a presença de paredes semi-abertas que permitam o estabelecimento do escoamento transônico, evitando-se o fenômeno do entupimento aerodinâmico, além de reduzir as interferências de parede e reflexões de ondas de choque, na região de ensaios transônicos (número de Mach de 0,85 a 1,2). A presença de fendas nas paredes da seção de testes com condições equalizadas de pressão no seu entorno (câmara Plena) resulta em saída de massa pelas fendas que pode ser readmitida através dos flapes, por sucção do escoamento principal por efeito "Venturi." Alterando-se a abertura dos flapes de reentrada obtém-se variação na quantidade de massa extraída pelas paredes da seção de testes. A Tabela 4 traz a porcentagem de extração de massa obtida a partir de modelos teóricos como relatado por Goethert, 1961. Assim, o uso de primeira garganta sônica para obter escoamento supersônico é bastante limitado. Sem a extração forçada, a abertura dos flapes logo se tornará ineficaz. Por sua vez, a extração forçada no caso do TTP é de 2% do fluxo principal, o que permitirá atingir aproximadamente número de Mach 1,2 com o uso combinado dos flapes e da extração forçada via compressor. Além disso, o TTP faz uso dessa idéia para possibilitar ensaios de modelos com razão de bloqueio maiores.

Tabela 4. Taxa de fluxo de massa extraída através das paredes semi-abertas de uma seção de testes com primeira garganta sônica (condição isentrópica).

Número de Mach na seção de testes	Porcentagem de fluxo de massa extraído pelas paredes da seção de testes
1,0	0,0
1,1	0,8
1,2	3,0
1,3	6,6
1,4	11,5
1,5	17,6

A Figura 3 mostra a câmara Plena aberta, na qual pode-se ver, na seqüência, a primeira garganta (em Alumínio polido), a seção de testes (com estruturas em vermelho), a seção de flapes (em Alumínio polido e com manoplas de ajuste de abertura), a segunda garganta (com manoplas de ajuste do corpo central) e no canto da figura a tubulação

toroidal na qual se acham instalados os bicos injetores. Pode-se ver também o mecanismo de variação do ângulo de ataque do modelo no piso da câmara Plena. A Figura 4 mostra uma vista geral do circuito aerodinâmico do túnel, na qual pode-se observar as bases de concreto que suportam o circuito do túnel.

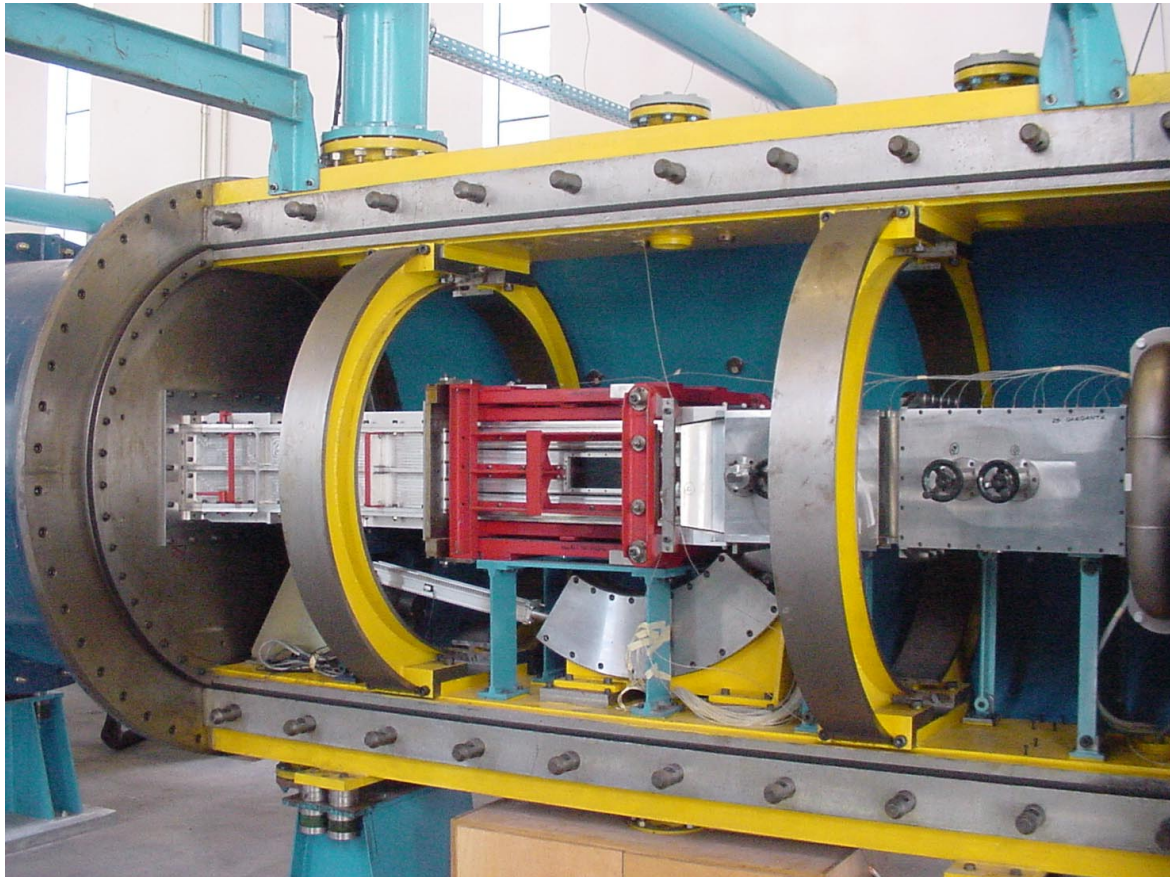


Figura 3. Câmara Plena aberta, mostrando a primeira garganta, a seção de testes, os flapes, a segunda garganta e região dos injetores.

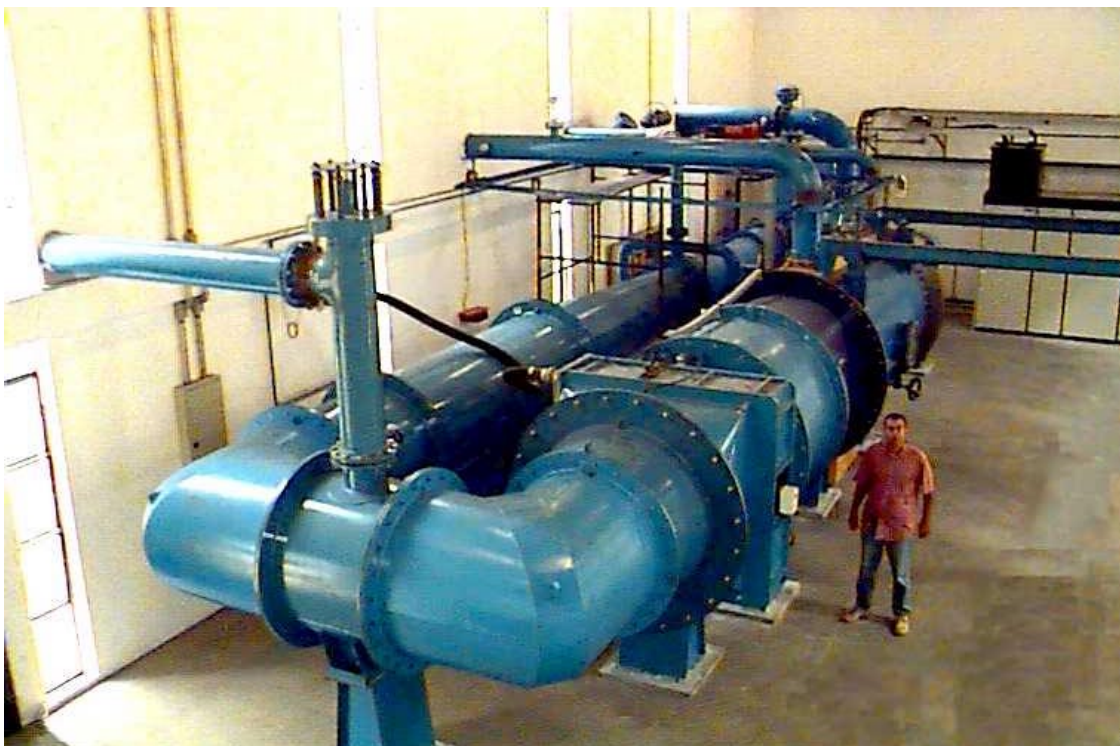


Figura 4. Vista geral do circuito aerodinâmico do TTP.

4.5 Suporte de modelo

O suporte do modelo consiste em um setor montado num bloco estrutural e acionado por um atuador elétrico independente, controlado por micro-computador. Este setor permite ângulos de ataque de +30 a -10 graus. O setor construído a partir de aço inox 304, foi projetado para suportar cargas normais de 0,88 kN, axiais de 0,22 kN e laterais de 0,28 kN, relativas ao centro de rotação do modelo.

4.6 Segunda garganta

A segunda garganta tem uma geometria composta por 3 superfícies móveis com 2 pinos de interligação e com flapetes em um corpo central. A geometria é modificada por regulagem na posição dos pinos de interligação das superfícies. Sua principal função é criar uma condição de choque, quando em regime supersônico, para evitar transientes no estabelecimento do escoamento.

4.7 Injetores

O sistema de injeção é baseado no controle das válvulas de injeção e de exaustão (“blow-off”) (itens 15 e 4 da Fig. 2, respectivamente). A válvula de injeção monitora a pressão requerida na estagnação (de 4 a 12 bars), a partir da pressão disponível nos reservatórios de ar comprimido, que expandem politropicamente a partir de 40 bar. Essa pressão regulada impõe uma condição de entupimento aerodinâmico nos bicos injetores com geometria supersônica (número de Mach 1,9 na saída), estabelecendo regime de fluxo constante. A área total da seção crítica dos injetores é de 0,00228 m², que resulta num fluxo de massa máximo de 6,37 kg/s a 12 bar. O tempo mínimo de operação do sistema é de 30 segundos. O sistema de controle central modula a abertura da válvula de exaustão (“blow-off”) deixando que ar do circuito do túnel seja expulso para atmosfera, de forma a manter uma pressão estável no circuito do túnel – devido à característica de escoamento não forçado as condições de operação vão impor um limite mínimo para a pressão de estagnação na seção de testes, que é a curva de limite de “blow-off,” (ver Fig. 1).

4.8 Grupo de acionamento principal

O acionamento contínuo do TTP é obtido a partir do conjunto: compressor, caixa de transmissão, motor elétrico e conversor de frequência que são especificados para recuperar as perdas de carga aerodinâmicas previstas. A Tabela 5 mostra os dados da curva de desempenho do circuito aerodinâmico. Esses valores previstos teoricamente deverão ser verificados para o túnel real durante a fase de calibração do túnel, ora em curso.

Tabela 5. Pontos de operação do compressor principal do TTP para as condições de pressão de estagnação 101 kPa e temperatura de estagnação 313 K na seção de testes.

número de Mach	pressão total (*)	fluxo de massa	densidade (*)	Fluxo volumétrico (*)	taxa de compressão	ganho entálpico específico	eficiência	potência de eixo	número de Reynolds p/metro
	(kPa)	(kg/s)	(kg/m ³)	(m ³ /s)		(J/kg)		(kW)	÷ 10 ⁶
0,3	100,0	8,36	1,114	7,51	1,019	1729	0,740	19,5	6.01
0,4	99,0	10,70	1,102	9,71	1,034	2995	0,750	42,7	7.77
0,5	97,7	12,70	1,087	11,68	1,052	4577	0,775	75,4	9.35
0,6	96,0	14,32	1,069	13,40	1,074	6517	0,800	116,7	10.72
0,7	93,8	15,54	1,044	14,88	1,103	8900	0,825	167,7	11.86
0,8	91,3	16,38	1,016	16,13	1,136	11700	0,850	225,5	12.77
0,9	88,7	16,86	0,987	17,08	1,171	14485	0,865	282,3	13.46
1,0	86,9	17,01	0,967	17,59	1,196	16503	0,873	321,6	13.94
1,1	85,0	16,88	0,946	17,84	1,222	18577	0,880	356,2	14.22
1,2	80,9	16,51	0,900	18,34	1,284	23251	0,885	433,7	14.34
1,3	74,9	15,95	0,833	19,14	1,385	30679	0,882	554,9	14.30

(*) – relativos à entrada do compressor

O compressor principal foi projetado para representar o mais fielmente possível o projeto do compressor do túnel grande, do tipo axial com 2 estágios e velocidades de rotação de 167 a 9600 RPM. O rotor tem 0,562 m e 0,549 m de diâmetro nos estágios 1 e 2, respectivamente. A velocidade circunferencial máxima é de 282,5 m/s. A Figura 5 mostra o envelope de operação do compressor, indicando os pontos sobre a curva de carga do circuito aerodinâmico do túnel, como mostrados na Tab. 5.

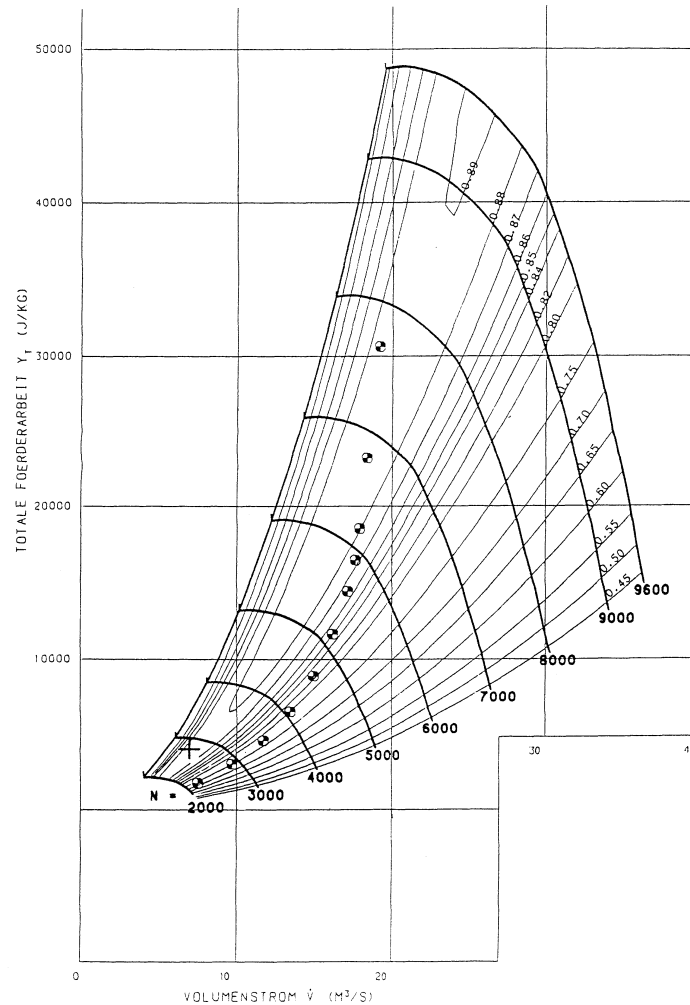


Figura 5. Mapa de operação do compressor principal, com indicação dos pontos da curva de carga do circuito aerodinâmico.

4.9 Trocador de calor e torre de resfriamento

O trocador de calor é requerido para remover todo o calor gerado pelo compressor principal e manter controlada a temperatura de estagnação na câmara de tranquilização do túnel. O posicionamento do trocador de calor será definido após ensaios na fase de calibração. A Figura 1 mostra sua primeira opção de instalação, como se acha hoje – ele também será testado na perna de retorno do túnel, para a qual se faz uso de partes sobressalentes do circuito, já preparadas para a instalação. A perda de carga máxima esperada é de 430 Pa, com fluxo máximo de $14,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

O fluxo máximo de água é de 25 kg/s , com temperaturas máximas de entrada e saída da água de 346 K e 313 K , respectivamente. Para atuar, uma válvula de controle automático controla a passagem de água e é assistida pelo computador principal. A torre de resfriamento com dimensões $2,17 \times 2,57 \times 3,57 \text{ m}$ é do tipo induzida, com enchimento por colmeias, com capacidade total de refrigeração de $1,3 \text{ MW}$ e vazão total de água de $1000 \text{ litros por minuto}$. Além de assistir o trocador de calor do túnel, a torre trata água do motor principal, da unidade hidráulica de refrigeração da caixa de ampliação, do conversor de frequência e dos compressores da casa de máquinas (ver Fig. 2).

4.10 Sistemas de controle e aquisição de dados

O funcionamento do TTP envolve a implementação de várias malhas de controle que levam às condições desejadas na seção de testes em termos de pressão de estagnação, temperatura de estagnação, umidade e número de Mach. Essas grandezas são variáveis controláveis do TTP cujos valores serão obtidos a partir de medidas diretas (as três primeiras a partir de sensores na câmara de tranquilização) ou por relações algébricas da dinâmica dos gases, no caso do número de Mach, a partir da relação entre as pressões estática na parede da seção de testes e de estagnação por tomada de pressão total. A implementação das malhas de controle será feita através de grandezas (variáveis manipuladas) acionadas pelos seguintes subsistemas: unidade de processamento central, controle da rotação do motor/compressor axial, controle da evacuação da câmara Plena, controle da injeção e exaustão (“blow-off”), controle de temperatura, controle de umidade e de segurança geral do túnel.

A unidade de processamento central é o cérebro do sistema, elaborando comandos para os subsistemas de forma a garantir o funcionamento do TTP como um todo. Ela consiste em um micro-computador, programa LabView, placas de interfaces para leitura e tratamento de sinais digitais e analógicos, placas de comunicação serial, “scanner” para medidas de pressão da National Instruments tipo PSI9000 com 96 canais para aquisição de dados, sensores de pressão, temperatura, umidade e as diversas cablagens.

Além disso, o TTP tem um sistema de visualização de escoamento tipo Schlieren e 3 balanças internas de 6 componentes.

4.11 Sistemas auxiliares

O primeiro sistema auxiliar é o de controle da pressão de estagnação, da extração da câmara Plena e da umidade, que consiste, basicamente, do compressor centrífugo (item 20 da Fig. 2) com diversas válvulas associadas. O compressor extrai massa da câmara Plena, quando a extração de massa é requerida (até um valor de 0,35 kg/s que corresponde a 2% do fluxo de massa total ao número de Mach 1,0 e pressão de estagnação de 1 bar na seção de testes). Dessa forma o sistema também permite um método adicional de controle do número de Mach (ver Tab. 4), como também de redução do efeito de bloqueio devido à presença de modelo na seção de testes. O compressor também pode extrair massa da região da válvula de alívio (item 7 da Fig. 2), quando somente a função do controle de pressão deve ser usada. Para cumprir essas funções o sistema pode admitir ou devolver massa a partir da atmosfera ou readmiti-la na seção de readmissão (item 6 da Fig. 2), de acordo com a lógica de controle das diversas válvulas, assistida pelo computador principal.

O controle da umidade é realizada a partir do desvio controlado de parte da massa a ser reinjetada por secadores de ar com sílica-gel com capacidade de secagem até -45°C (ver Fig. 2). O compressor tem taxa de compressão de 1:4, suficiente para executar todas essas funções numa faixa de controle de pressão de estagnação do túnel de 0,5 a 1,2 bar.

5. Calibração do TTP

Cada túnel de vento é uma instalação única, com características intrínsecas. Isto é ainda mais evidente para o TTP, que incorpora soluções inovadoras e que procuram reproduzir a concepção de um projeto de um túnel maior. Por isso, um conhecimento profundo de sua operação é mandatório. O TTP, com todos os seus subsistemas e componentes instalados e operacionais, acha-se, hoje, pronto para o início da fase de calibração, que consiste no levantamento de todas as suas características para cada modo de operação, com a finalidade de se obter um banco de dados exaustivo que permita uma correta análise dos ensaios a serem realizados no futuro. Nesta fase, o TTP já tem instalado em sua seção de testes uma sonda de pressão, tipo cilindro com ogiva com 6mm de diâmetro, com 96 canais para medidas de pressão estática, para se obter a distribuição do número de Mach na seção de testes. Além disso, o túnel dispõe de sensores para uma investigação da perda de carga ao longo do circuito para determinação do posicionamento ótimo do trocador de calor e comparação com os dados teóricos visando a uma otimização no circuito do túnel grande, identificando possíveis discrepâncias.

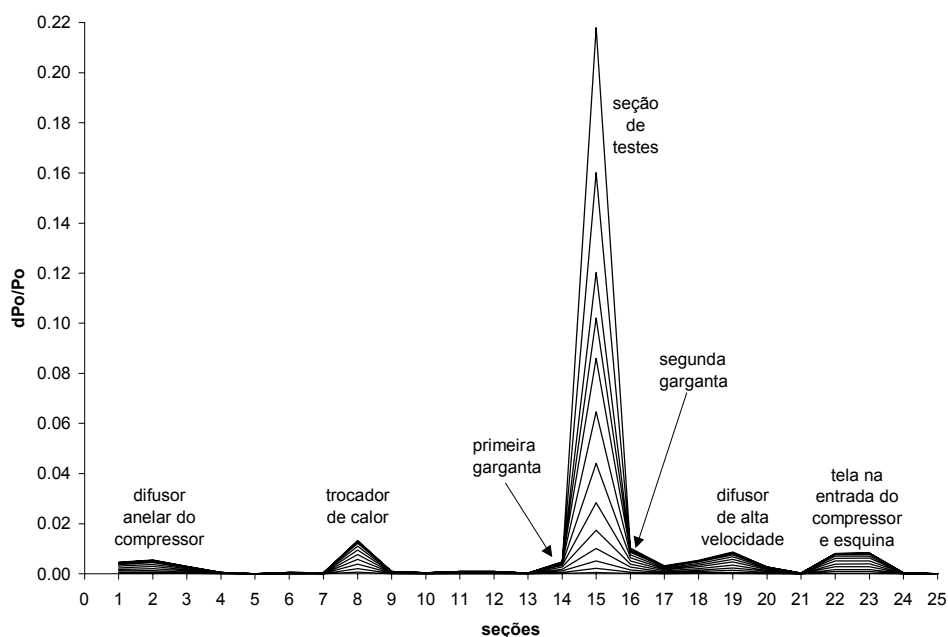


Figura 6. Perda de carga ao longo dos elementos do circuito aerodinâmico do TTP para condições crescentes de número de Mach na seção de testes.

A Figura 6 mostra a distribuição da perda de carga relativa à pressão de estagnação para cada componente do circuito, começando com saída do compressor principal (difusor anelar), até chegar à entrada do mesmo, itens de 1 a 25, para várias curvas relativas a números de Mach na seção de testes de 0,1 a 1,3 (as curvas crescem com o aumento do número de Mach). A figura ressalta os componentes que foram responsáveis pelas maiores perdas de carga. Observa-se que, principalmente num túnel transônico, a perda de carga é muito importante na região da seção de testes com o número de Mach aumenta.

Ao final da fase de calibração, a sonda de pressão instalada na seção de testes será substituída por um modelo AGARD padrão, para o qual a literatura apresenta um extenso banco de dados, para a completa validação da instalação do túnel para ensaios aerodinâmicos.

6. Conclusões e comentários

O TTP acha-se completamente instalado, com seus sistemas operantes em na fase final de ajustes de parâmetros dos subsistemas de controle. O TTP consiste em um projeto moderno e embora seja uma escala 1/8 de um túnel transônico industrial, ele representa o primeiro túnel desse porte para ensaios transônicos da América Latina. Suas características de projeto garantem controles estáveis de número de Mach, pressão de estagnação e temperatura de estagnação, relativos à seção de testes, e ensaios com qualidade de geometrias básicas acadêmicas, de perfis, de modelos simplificados de aeronaves etc.

7. Referências

- Davis, M. W., Gunn, J. A., Herron, R. D. and Kraft, E. M., 1986, "Optimum Transonic Wind Tunnel," AIAA 14th Aerodynamic Testing Conference, West Palm Beach, Florida, March.
- Escosteguy, J. P. C., 1988, "Simplified Analysis of The Flow in a Transonic Wind Tunnel Test Section With Ventilated Walls", ENCIT - Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Águas de Lindóia-SP, Brasil.
- Escosteguy, J. P. C., 1990, "Projeto de Uma Seção de Teste Transônica", 1.º BSAT - Simposio Brasileiro de Tecnologia Aeroespacial, São José dos Campos-SP, Brasil.
- Falcão Filho, J. B. P., Nogueira, S. L., 1988, "Otimização no Projeto Conceitual dos Reservatórios para o Túnel Supersônico tipo 'Blowdown'", Encontro de Ciências Térmicas - (ENCIT-88), Anais, p.154 - 156
- Falcão Filho, J. B. P., 1990, "Avaliação Funcional do Sistema de Evacuação Forçada da Seção de Testes de Túneis Transônicos", Encontro de Ciências Térmicas (ENCIT-90), Anais, p.223 - 226.
- Falcão Filho, J. B. P., 1996, "Modelo Transiente do Circuito Aerodinâmico de Túnel de Vento Transônico," (Tese de Mestrado), ITA.
- Falcão Filho, J. B. P., Góes, L. C. S., Ortega, M. A., 1998, "Modelo Transiente do Circuito Aerodinâmico de Túnel de Vento Transônico", Encontro de Ciências Térmicas - (ENCIT-98), Anais, v.1. p.7 - 12.
- 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.
- Goethert, B. H., 1961, *Transonic Wind Tunnel Testing*, Pergamon Press, N. Y.
- NAVCON, 2001, "Projeto Sistemico do Sistema de Controle do TTP – Túnel Transônico Piloto," (relatório interno do IAE).
- Nogueira, S. L., Falcão Filho, J. B. P., Fico Júnior, N. G. R. C., Ortega, M. A., 1988, "Otimização de processo de injeção e sua aplicação em Túneis de Vento", Encontro de Ciências Térmicas - (ENCIT-88), Anais, p.151 - 153
- Ortega, M. A., Falcão Filho, J. B. P., Góes, L. C. S., 2000a, "Prediction of Transients and Control Reactions in a Transonic Wind Tunnel", *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*. Rio de Janeiro-RJ.
- Ortega, M. A., Falcão Filho, J. B. P., Góes, L. C. S., 2000b, "Study of the Transient in a Transonic Wind Tunnel as a Result of the Conjugate Effect of the Main Compressor and High-Speed Injection", I Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Natal-RN.
- Shapiro, A. H., 1953, *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol I, The Ronald Press Company, N. Y.
- Sverdrup Technology Inc., 1989, "Brazilian Transonic Wind Tunnel Concept Definition Study," (Relatório Final do TTP – relatório interno do IAE).

TECHNICAL DESCRIPTION OF THE CTA'S PILOT TRANSONIC WIND TUNNEL

João Batista Pessoa Falcão Filho

Centro Técnico Aeroespacial (CTA)

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Sistemas Aeronáuticos (ASA-L)

Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50

CEP: 12228-904, São José dos Campos, São Paulo

e-mail: falcao@directnet.com.br

Olympio Achilles de Faria Mello

Centro Técnico Aeroespacial (CTA)

Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), Divisão de Sistemas Aeronáuticos (ASA-L)

Pça. Marechal Eduardo Gomes, 50

CEP: 12228-904, São José dos Campos, São Paulo

e-mail: oamello@directnet.com.br

Abstract. *CTA's Pilot Transonic Tunnel (TTP) is a 1:8 reduced-scale version of an industrial transonic tunnel design. To the maximum extent possible, the technical solutions adopted in the large tunnel design have been reproduced. The TTP has been installed fundamentally in order to investigate the innovative technical solutions that have been employed in the large tunnel design and to serve as basic research tool, in allowing tests with simple geometric shapes and two-dimensional airfoils. The TTP has a conventional circuit, being continuously driven by a two-stage axial compressor and intermittently driven also by a high-speed (Mach 1.9) mass ejection system, which recovers part of the losses along the circuit and results in a less expensive design for the main compressor. The TTP has a modern design and its operation is based on automated systems for the control of stagnation pressure, stagnation temperature, Mach number and humidity in the test section. This paper presents a description of the tunnel, with emphasis on its main operational characteristics, its systems and its design philosophy.*

Keywords. *Transonic Wind Tunnel, Experimental Aerodynamics, Aerodynamic Testing, Mechanical Design*