

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/342397961>

# Desenvolvimento de um Sistema de Controle e Automação para um Túnel de Vento

Conference Paper · August 2016

CITATIONS

0

READS

20

5 authors, including:



**Danilo Azevedo**

Universidade Federal do Piauí

6 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



**Paulo Iscold**

Federal University of Minas Gerais

24 PUBLICATIONS 243 CITATIONS

SEE PROFILE

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO PARA UM TÚNEL DE VENTO

LUIZ FELIPE A. T. SILVA\* DANILO AZEVEDO\* TAIRINE FRAZIO\* GUILHERME PAPINI\*  
PAULO ISCOLD\*

\* *Centro de Estudos Aeronáuticos, Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil*

Email: [luiz.machine@gmail.com](mailto:luiz.machine@gmail.com), [daniло.azevedo@ufpi.edu.br](mailto:daniло.azevedo@ufpi.edu.br),  
[maria@pereira.org](mailto:maria@pereira.org), [papini@demec.ufmg.br](mailto:papini@demec.ufmg.br), [iscold309@gmail.com](mailto:iscold309@gmail.com).

**Abstract**— A complete system of data acquisition and control developed to a closed-loop wind tunnel with dimensions 1,20 x 1,00m in test section and 400 km/h maximum speed. The system measure pressures using Pitot's sensor, control the velocity using frequency inverter connected to the motor, additionally control the position of the turning table used to attach the models and monitor, for safety reasons, inspections windows opening. The systems also monitor the vibration level of the motor avoiding catastrophic failure specially in high-speed uses. A HMI (human-machine interface) was designed based on web applications allowing users to access the control system wherever they are inside the lab. The hardware mounted is an industrial PLC, communicating via As-I net with analogical and digital inputs and outputs modules, pressures sensors, temperature sensors, speed of gas sensor for low speed uses, vibration sensors and vibration analysis interface. The software platform used was Codesys. The expected improvements were reliability on usage of tunnel and stability during tests.

**Keywords**— Instruments, closed loop wind tunnel, automation.

**Resumo**— Um dispositivo de controle e aquisição de dados foi construído para um túnel de vento de circuito fechado, com seção de testes de 1,20m x 1,00m, com velocidade nominal de 400km/h. O dispositivo verifica e controla a velocidade, posição da mesa de ensaios, monitora as pressões estática e total, janelas e escotilhas e os níveis de vibração do motor. Uma interface móvel de controle e visualização do túnel foi elaborado, em que é possível configurar as condições ambientais do ensaio (pressão atmosférica e massa específica) e controlar o equipamento. Foram utilizados um PLC de uso industrial com módulo de entradas e saídas comunicando via rede, sensores de pressão, temperatura, pressão, velocidade de fluidos gasosos por princípio de temperatura e para a elaboração da interface foi utilizado o software livre Codesys. As condições do ensaio e a confiabilidade dos dados colhidos, além da simplificação do algoritmo de testes foram os ganhos com esta nova instalação.

**Palavras-chave**— Instrumentação, túnel de vento de circuito fechado, automação.

## 1 Introdução

Túneis de ventos são equipamento que simulam de forma controlada as condições de escoamento de ar semelhante à uma situação que se deseja estudar. Segundo Bradshaw and Pankhurst (1964), túneis de vento tornaram-se uma alternativa para a redução de custos dos testes de novos modelos de corpos aerodinâmicos, principalmente na indústria aeronáutica, devido à redução de custos e riscos no teste de novos conceitos. Consistem em um duto em circuito aberto ou fechado, munido de rotor, controles de escoamento e sistemas de aquisição e controle que permitem observar e manipular as condições de testes e o corpo testado. Os parâmetros lidos pelo sistema de aquisição devem ter precisão coerente com o nível certeza que se deseja e a capacidade de controlar o túnel também deve respeitar os limites do ensaio.

O LAEXP, Laboratório de Aerodinâmica Experimental da Universidade Federal de Minas Gerais, dispõe de um túnel de vento com seção de testes de 1,20m x 1,00m e velocidade máxima nominal de 400km/h. Capaz de testar desde corpos simples até estruturas aeronáuticas, de energia e automóveis, o equipamento não dispunha de um sistema adequado de medição e controle de velo-

cidade, comprometendo a qualidade dos experimentos e tornando a montagem do ensaio aerodinâmico um duro serviço de tentativa e erro em busca da velocidade desejada.

Neste trabalho desenvolveu-se um sistema de automação capaz de medir as principais grandezas envolvidas para o controle de velocidade necessárias ao ensaio, bem como um sistema de controle de giro da mesa de fixação do modelo, que no caso de superfícies de voo, modificam o de ângulo de ataque. Para isso foi utilizado um PLC (Programmable Logic Controller) modelo IFM AC1421, módulo de entradas analógicas de 0 a 10 V, módulo de entradas digitais, módulo de saída analógica, módulo de saída digitais. Os módulos se comunicam com o PLC através do padrão de redes de automação tipo As-i.

### 1.1 Parâmetros a serem medidos e controlados

Diversos parâmetros influenciam em um ensaio aerodinâmico. A velocidade do vento, temperatura, pressão atmosférica e massa específica são os principais elementos avaliados (Barlow et al., 1999). Secundariamente, outros sensores como acelerômetros para capturar a vibração de elementos ou partes específicas do modelo ou do túnel e sensores de indução para detectar portas ou escotilhas

abertas também tem grande importância pois fornecem mais informações sobre as reações do modelo ao teste e o comportamento da seção na condições utilizadas, além de garantirem a segurança estrutural do equipamento. Para a construção do equipamento, portanto, os parâmetros seriam:

1. Velocidade do vento: deve ser medida e controlada através de software, evitando o trabalho repetido do operador;
2. Temperatura: deve ser medida, posto que o equipamento não dispõe de radiador de calor. Ressalta-se que a temperatura varia severamente durante os testes e a correção de massa específica através foi feita automaticamente com a temperatura medida;
3. Pressão Atmosférica: o laboratório já dispõe de estação meteorológica e os dados de pressão foram inseridos no software a partir desta;
4. Controle de giro das mesas de testes: deve haver o controle das mesas de fixação dos modelos de testes para a variação do ângulo de ataque do corpo testado, quando houver relevância;
5. Vibração do Motor: observada para a segurança estrutural do túnel, tem a intenção de manter o operador informado sobre as condições do motor, reduzindo o risco de acidente por falha dos mancais; e,
6. Abertura de janelas de inspeção: intertravamento que garante o funcionamento do túnel apenas com as janelas de inspeção fechadas garantindo a segurança do ensaio.

### 1.2 Características do sistema desejado

Para a obtenção da velocidade foram utilizados dois sistemas de medição com funcionamento concomitante. Para velocidades entre 0 e 10m/s é utilizado um sensor de velocidade com princípio térmico com incerteza de medição de 0,1m/s fabricado pela ifm electronic com código SL5201. Optou por esse sistema de medição devido às limitações dos sensores de pressão utilizados nas medições com o tubo de Pitot. As pressões medidas na tomada estática e total do Pitot em velocidades acima de 10m/s são maiores, em módulo, que 100Pa. Como a incerteza dos sensores de pressão é de 5Pa, a utilização torna-se adequada.

## 2 METODOLOGIA

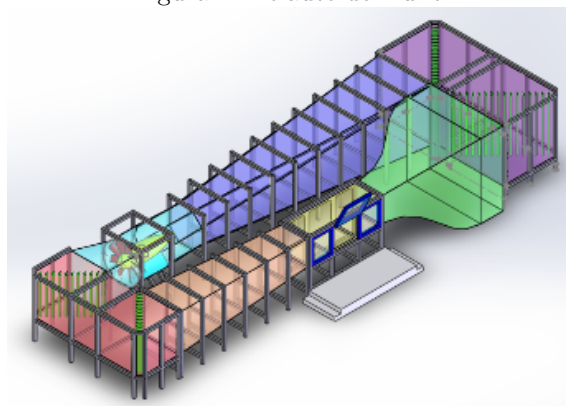
A montagem do sistema de automação foi realizada em 4 etapas: 1) Apreciação e avaliação das condições iniciais do túnel; 2) seleção dos equipamentos a serem instalados; 3) desenvolvimento da plataforma computacional de controle e aquisição de dados; e, 4) montagem e comissionamento.

### 2.1 Condições iniciais do túnel de vento

O túnel de vento do Laboratório de Aerodinâmica Experimental - LAEXP consiste em um equipamento de circuito fechado, construído em chapas de aço, com características resumidas na Tabela 1. O equipamento encontra-se num galpão, munido de estação meteorológica utilizada também para caracterização da atmosfera de ensaio. Na Figura 1 está apresentado o leiaute do equipamento.

Seção de Testes	1,00m x 1,20m
Potência Instalada	400 cv
Velocidade Nominal	400 km/h

Figura 1: Leiaute do Túnel



Em avaliação inicial das condições do equipamento, verificou-se níveis de vibração dentro da seção de testes acima do desejável. É relevante frisar que ensaios de *flutter* com presença de vibrações alheias às provocadas pela interação entre o corpo testado e o fluido, deturpam a leitura dos sensores e dificultam a filtragem de dados irrelevantes, comprometendo a qualidade dos ensaios. Para mitigar as vibrações foram avaliadas duas possíveis fontes: rigidez da base de acionamento do motor e desbalanceamento do rotor.

A investigação destes problemas tem importância secundária no tema deste trabalho, porém, a presença de vibrações na seção de testes indicam oscilações de velocidade na região dos tubos de Pitot, tornando imprecisa a leitura e o controle de velocidade do túnel.

#### 2.1.1 Balanceamento do rotor

O procedimento de balanceamento do rotor foi realizado segundo a norma ISO10816. Foram utilizados para o balanceamento os equipamentos mostrados nas Figuras 2 e 3.

**Metodologia das medições** Para que fosse possível a coleta de dados, foram instalados sen-

Figura 2: Balanceador dinâmico Teknikao NK600

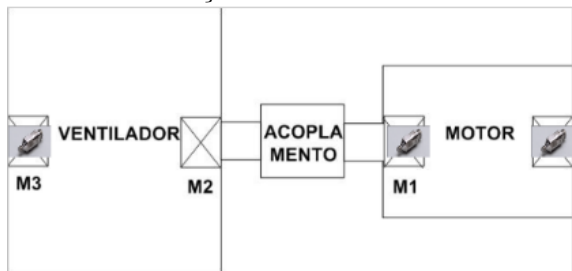


Figura 3: Módulo IFM VSE002



sores de vibração nos pontos identificados como M2 (mancal 2), M3 (mancal 3) e M4 (mancal 4) conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Croqui esquematizado da instalação dos sensores de vibração.



Foram constatados níveis altos de vibração no equipamento e, em seguida, soldados contrapesos em uma das hélices do rotor do ventilador para o trabalho de balanceamento. Realizaram-se outras coletas de dados após soldados contrapesos e, em seguida, indicou-se os locais corretos para que contrapesos definitivos de balanceamento (chapas de aço) fossem soldados, fazendo com que os níveis de vibração se adequassem aos valores aceitáveis da Norma Internacional ISO 10816. Todos os dados sobre o balanceamento estão registrados em relatório técnico, conforme LLK (2013).

### 2.1.2 Controles disponíveis inicialmente

Em avaliação preliminar, algumas características foram observadas, sendo tratadas como as demandas do túnel para a elaboração do sistema final, como descrito a seguir.

**Mesas de giro** Os ensaios realizados até então, utilizavam controles com retroalimentação no eixo de entrada. A mesa de ensaios tinha a posição controlada de maneira eficiente já que as folgas no eixo de saída do redutor levava a erros porém, o alinhamento no ângulo desejado era conferido por uma marcação na seção de testes.

**Controle de velocidade** O controle de velocidade também era feito com o uso de potenciômetro, sendo difícil a estabilização da velocidade durante os testes. A característica não linear do potenciômetro dificultava o ajuste fino, principalmente em velocidades elevadas, tornando a repetibilidade do ensaio uma tarefa cansativa.

**Temperatura do ar** A temperatura do ensaio era admitida como a ambiente, medida na estação meteorológica do laboratório. No entanto, motor de alta potência, a velocidade e a ausência de um radiador no circuito do túnel faz com que a temperatura do fluido durante o ensaio aumente rapidamente. O túnel não dispunha de sensores de temperatura, impossibilitando a correção de massa específica e viscosidade. A pressão atmosférica era medida na estação meteorológica do laboratório, sendo considerado constata durante todo o testes. Em medições posteriores foi observado a elevação de temperatura igual a 2°C/min.

**Controle de vibração** A presença do rotor acoplado na estrutura do túnel pode provocar vibrações por desbalanceamento, ressonâncias estruturais ou por efeitos aerodinâmicos nas pás. Foram detectados problemas relacionados à estrutura do motor de acionamento. Para a identificação correta do defeito e tomada de decisão para solucionar o problema foi utilizada a ferramenta de ODS (Operational Deflection Shape). Com a ferramenta supracitada, foi possível observar a deformação da estrutura durante o funcionamento. Para restringir o movimento foram feitas análise utilizando elementos finitos e observando as alterações dos modos de vibração foram adicionados reforços estruturas para aumentar a rigidez da estrutura no sentido do empuxo da hélice, transmitindo os esforços para a fixação no concreto.

**Sensores de portas e janelas** A abertura de escotilhas, portas de acesso e janelas de testes podem comprometer a qualidade do escoamento, além de trazer riscos à estrutura do túnel, laboratório e pessoas, tendo em vista que a pressão

negativa no interior do túnel quando tomada com referência a pressão atmosférica é relevante ainda destacar a possibilidade de sucção de objetos para dentro do circuito. Devido à quantidade elevada e por vezes de difícil acesso, a ausência de sensores de monitoramento de portas também foi considerada uma necessidade a ser atendida pelo sistema de controle.

## 2.2 Seleção e montagem do equipamento

Os equipamentos foram selecionados de acordo com as necessidades indicadas pelos Itens 1.2 e 2.1, disponibilidade no mercado e custos. A lista é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Equipamentos selecionados

Produto	Descrição	Qtd
AC1216	Fonte para Mestre As-i	1
DN2012	Fonte de Alimentação 24vcc	1
AC2217	Módulo de entrada analógicas AS-i 4x0...10V	1
AC2220	Módulo de entrada analógicas AS-i 4xPT100	1
AC2216	Módulo de entrada analógicas AS-i 4x0...20mA	1
AC2219	Módulo de saídas analógicas AS-i 4x0...10V	1
AC2251	Módulo de saídas digitais 4xDO / entrada digitais 4xDO	1
AC1421	Controlador As-i	1
SL5101	Sensor de velocidade para fluídos gasosos	2
E40048	Suporte para sensor de velocidade para fluídos gasosos	2
TP3237	Conversor para sensores de temperatura	4
TS2229	Sensore de temperatura	4
IFT240	Sensor indutivo	1
IFC264	Sensore indutivo	1
IFR200	Sensor indutivo	1
IFT205	Sensor indutivo	1
PN2028	Sensor de pressão	4
RVP510	Encoder programável	2
E11508	Conector cabeável	12
E12166	Cabo de cinco vias	2
CR1081	IHM com comunicação ethernet	1

A montagem dos dispositivos foi feita em painel metálico para montagem elétrica, com dimensões 600 x 400 x 200 mm, com proteção IP56 (proteção contra poeira e jatos de água). O resultado do conjunto esta apresentado na Figura 5.

Figura 5: Montagem do sistema na caixa plástica



## 2.3 Software

O sistema de controle permite a definição de controle através da utilização da velocidade verdadeira ou da velocidade real. Permite ainda a visualização das variáveis medidas e ainda a visualização de alarmes, caso ocorram. O software utilizado para a construção do sistema supervisorio foi o Codeys V3.5 SP4. As linguagens de programação utilizadas foram o texto estruturado, diagrama de blocos e linguagem Ladder. Este software está em acordo a norma IEC61131-3 permitindo multiplas linguagens incluindo rotinas em C e ainda a configuração de diversos sistemas de controle. Para a programação em conformidade com o controlador AC14121 foi utilizada biblioteca especifica fornecida pelo fabricante. Os algoritmos envolvendo expressões numéricas e lógicas foram desenvolvidos em texto estruturado e para a rotina de operação do programa foi utilizada linguagem de bloco e diagrama Ladder. Nas Figuras 6 e 7 estão apresentadas as telas de controle do software.

## 2.4 Testes realizados

Com o intuito de verificar o projeto do tubo de pitot utilizado para o controle de velocidade do túnel de vento, foi feita a calibração do mesmo utilizando um outro instrumento cuja curva de calibração era previamente conhecida. Esta curva de calibração é apresentada na Figura 8 a seguir.

Os testes de vibração utilizando a técnica de ODS mostram amplitudes elevadas de vibração na direção do empuxo do motor. A Figura 9 mostra a deformação da base do acionamento durante a operação antes da modificação:

Após a modificação da estrutura não foram detectadas amplitudes significativas.

Figura 6: Controle de velocidades

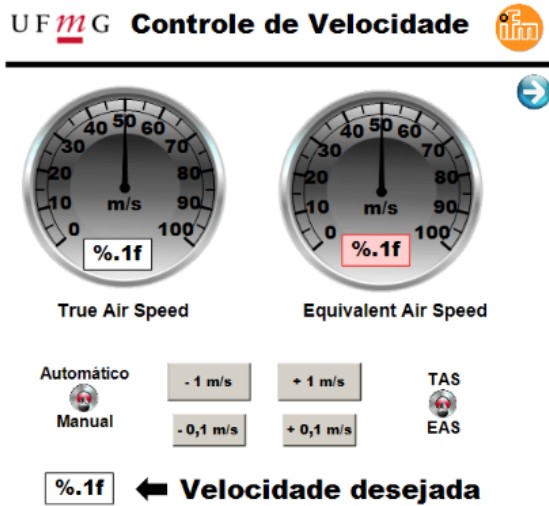


Figura 7: Condições dos sensores

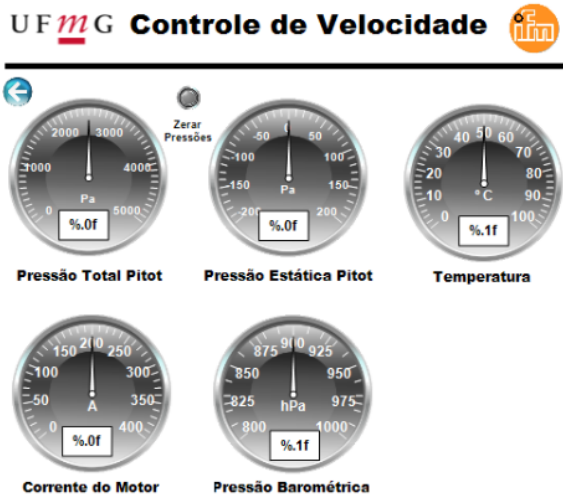
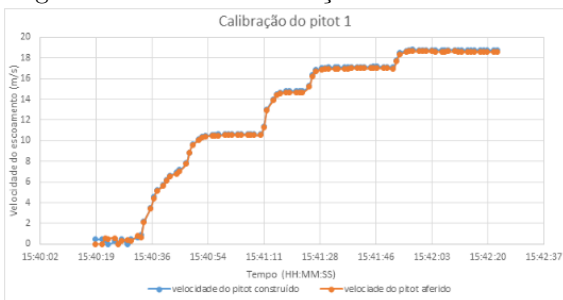


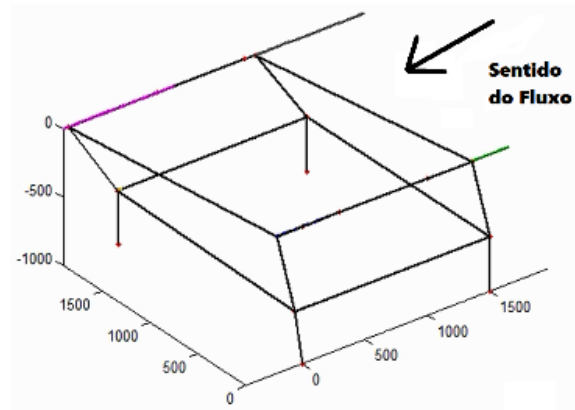
Figura 8: Curva de calibração do tudo de Pitot



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes do túnel utilizando o novo conjunto de controle e automação, de caráter qualitativo e quantitativo são apresentados nos Itens 3.1 e 3.2. Tendo em vista que as intervenções im-

Figura 9: Deformação da base do motor



plicam em ganho de tempo e conforto do operador e mitigação de erros sistemáticos e aleatórios, os resultados foram divididos respectivamente em "melhorias para o operador", apresentado no Item 3.1 e "melhorias para o túnel", Item 3.2.

#### 3.1 Melhorias para o operador

##### 3.1.1 Segurança na operação

A instalação de sensores de indução nas janelas do túnel garante ao operador segurança durante a operação, evitando a entrada de objetos no circuito além de problemas de equalização de pressão na seção de testes..

##### 3.1.2 Configuração dos ensaios

Houve uma grande redução do tempo de setup dos ensaios, tendo em vista que não é necessária iteração no ajuste do potenciômetro do motor. Ao inserir a velocidade desejada, o controle assume o comando do motor, utilizando mais ou menos potência quando necessário. A repetibilidade dos ensaios também passou a ser possível com a implantação do controle da velocidade do túnel.

##### 3.1.3 Redução dos níveis de incerteza

Os procedimentos realizados previamente em conjunto com os sensores e eletrônica instalada possibilitaram a mitigação de possíveis erros aleatórios na leitura e registro dos dados obtidos reduzindo os níveis de incerteza.

#### 3.2 Melhorias para o túnel

Melhorias na qualidade do túnel e conseqüentemente dos ensaios também foram notadas, sendo apresentadas nos Itens 3.2.1 a 3.2.5.

##### 3.2.1 Controles de velocidade

O controle direto da velocidade ao invés da rotação do motor, como era feito inicialmente, possi-

bilita testar o modelo nas condições desejadas e com boa repetibilidade. O controle eletrônico sujeita o motor às condições necessárias para obter a velocidade desejada, independentemente do fator de bloqueio do modelo.

### 3.2.2 Controle de vibração

Desbalanceamento do rotor, além do comprometimento estrutural do túnel, podem interferir em medições de fenômenos de vibração sofridos pelo modelo testado, como o flutter, já citado. O monitoramento dos níveis de vibração do motor e a percepção da alteração destes níveis possibilita filtrar o ruído referente ao rotor bem como detectar falhas de mancais, estrutura ou no conjunto das pás, possibilitando a manutenção antes da falha.

### 3.2.3 Controle de janelas de inspeção

Além da segurança para o operador do túnel, a verificação das janelas também evita que ar entre ou saia do túnel, ainda que por frestas, e haja alteração nas linhas de corrente de forma descontrolada.

### 3.2.4 Mesas de giro

A substituição do potenciômetro das mesas de giro por meio de encoder dispensa o uso de gabaritos, como se dava a aferição anteriormente. No entanto, o método é eficaz e por isso a marcação será mantida como medição redundante, aferindo o alinhamento entre o motor de passo e o encoder.

### 3.2.5 Temperatura e controle de atmosfera

O fato do ar aquecer durante o ensaio decorre do atrito inerente ao escoamento e do efeito resistivo do motor, este último com maior contribuição. Essa característica não foi alterada, porém a leitura da temperatura em conjunto com a pressão tornou possível a correção da massa específica e viscosidade.

## 3.3 Limites do sistema

Em contraponto às vantagens encontradas no novo sistema, alguns limites foram percebidos devido à potência instalada e infraestrutura.

1. A potência do motor e a inércia envolvida na construção do rotor, em conjunto com os tubos de Pitot utilizados, faz com que o controle de velocidade tenha erros de aproximadamente 1,0%, dificultando ajustes de velocidade decimal;
2. A variação da temperatura pelo efeito resistivo do motor e atrito do fluido em movimento é significativa; e,

3. Nenhum trabalho acústico no túnel foi realizado, tendo sido verificado em Canaverde (2014) a presença de uma onda estacionária na seção linear próxima ao acionamento do rotor, com frequência igual à BPF (Blade Pass Frequency).

## 4 CONCLUSÃO

Um sistema de controle de um túnel de vento de circuito fechado foi montado e instalado, utilizando o sistema de controle da ifm electronic modelo AC1421, como módulos de entrada e saída comunicando através de rede As-i. Possui ainda sensores de pressão, temperatura, sensores indutivos, encoders e sensor de velocidades para fluidos gasosos em condição de baixa vazão.

Uma investigação das condições iniciais do túnel foi realizada e as características necessárias para a implantação apropriada do conjunto eletrônico foram avaliadas. Para melhorar o funcionamento do dispositivo desenvolvido, o balanceamento do rotor foi feito, além da correção de vazamentos e infiltrações ao longo do circuito do túnel.

Um software de monitoramento e configuração dos experimentos foi desenvolvido de que seja possível o controlar remotamente, característica importante considerando as dimensões do túnel e a necessidade de avaliação das condições operacionais em toda a sua extensão durante o funcionamento.

Foram verificadas limitações do túnel e do sistema instalado. A potência e inércia instalada no sistema motor-hélice e os tubos de Pitot usados no sistema de controle dificultam o controle decimal de velocidade; há uma variação significativa de temperatura no fluido devido ao efeito de dissipação de calor do motor, que está imerso no fluido, e do atrito do fluido em movimento. Esse efeito foi mitigado pela variação da massa específica e da viscosidade pelo sistema, mas esta condição permanece; e, não houve intervenção acústica no túnel, ainda que se tenha conhecimento de efeitos de onda estacionária com frequência igual à BPF (Blade Pass Frequency) em algumas faixas de operação na trecho retilíneo próximo ao acionamento do rotor.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a ifm electronic do Brasil, representado pelo engenheiro Cavou Martinelli e seu diretor Osmir Ribeiro pela doação dos instrumentos utilizados nesses trabalho e pela disponibilidade durante a seleção dos sensores.

É importante ressaltar a participação da LLK Engenharia representada pelo Engenheiro Henrique Canaverde, durante o balanceamento do rotor.

## Referências

- Barlow, J., Rae, W. and Pope, A. (1999). *Low-speed Wind Tunnel Testing*, John Wiley & Sons, Inc.
- Bradshaw, P. and Pankhurst, R. (1964). The design of low-speed wind tunnels, *Progress in Aerospace Sciences* **5**: 1–69.
- Canaverde, H. S. (2014). *Análise de vibração e ruído no difusor de um túnel de vento em circuito fechado*, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- LLK, E. (2013). Relatório de balanceamento de campo, *Technical Report LLK-RT-2012-0084-0001-0A*, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.