

## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO PARA UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO DE DOIS ESTÁGIOS**

**Samantha González Tessele, [samysgt@ita.br](mailto:samysgt@ita.br)**  
**Giuliano Gardolinski Venson, [venson@ita.br](mailto:venson@ita.br)**  
**Dener Silva de Almeida, [denner@ita.br](mailto:denner@ita.br)**  
**Pedro Teixeira Lacava, [placava@ita.br](mailto:placava@ita.br)**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica.  
Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias.  
São José dos Campos, SP, Brasil. 12228-900

**Resumo:** *Este trabalho apresenta o desenvolvimento do sistema de medição de vazão mássica do banco de ensaios de uma câmara de combustão de dois estágios. O objetivo do trabalho é descrever o sistema de medição de vazão, o qual opera em tempo real. O sistema de medição de vazão mássica é composto de placas de orifício concêntrico, sensores de pressão resistivos, termopares tipo J e um sistema de aquisição de dados. São utilizados dois sistemas de placa de orifício, um para medição da vazão de ar na câmara e outra para medição de vazão de combustível. As placas de orifício foram fabricadas de acordo com a norma ISO 5167, dispensando assim calibração prévia. Os sensores de pressão utilizados são da série MPX, da Freescale Semiconductor e foram calibrados utilizando manômetros de tubos em U. O sistema de aquisição de dados é baseado no software LabVIEW 7.1 e uma placa de aquisição PCI-6251, ambos da National Instruments. O sistema foi dimensionado para permitir medições de vazão de ar e combustível nas faixas de 20 a 80g/s e 0.2 a 2g/s, respectivamente. Os resultados apresentam a interface computacional desenvolvida para aquisição e tratamento dos dados experimentais. São mostradas também, as curvas de incerteza das vazões mássicas de ar e combustível em função das respectivas vazões nominais. As incertezas das vazões nas faixas de medição variam de 0.5 a 1.5g/s e 0.03 a 0.05g/s para o ar e o combustível, respectivamente.*

**Palavras-chave:** *câmara de combustão, aquisição de dados, vazão mássica, placa de orifício.*

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1. Câmaras de Combustão de Dois Estágios**

O desenvolvimento de sistemas de combustão visando à redução de emissões poluentes, sobretudo o NO<sub>x</sub>, apresenta-se como o objetivo principal no projeto de turbinas a gás, seja para aplicação aeronáutica ou para uso industrial (geração de energia). Isto pode ser obtido através de mudanças na geometria do combustor ou processo de combustão propriamente dito. Uma maneira bastante utilizada atualmente para se alcançar níveis de emissões poluentes aceitáveis, é fazer uso de combustores que operem em um regime pobre de combustão. Desta forma, é possível obter temperaturas de combustão mais baixas, e conseqüentemente a redução do NO<sub>x</sub>.

Dentro deste contexto, uma maneira bastante difundida para redução do NO<sub>x</sub> é a utilização de chamas pré-misturadas em vez de chamas difusivas, já que estas produzem grande quantidade do referido poluente. Um exemplo é o sistema LP (“Lean-Premixed” na língua inglesa), no qual os reagentes são misturados anteriormente à zona de combustão, evitando assim a formação de regiões estequiométricas. Isto possibilita a operação da região de combustão com excesso de ar, o que por sua vez promove a redução da temperatura e do NO<sub>x</sub>.

Outra tecnologia comumente utilizada é o sistema de combustão RQL (“Rich-Quench-Lean” na língua inglesa). Neste sistema o ar é injetado de maneira estagiada ao longo das diferentes regiões existentes em câmara de combustão de turbinas a gás, permitindo que a reação de combustão ocorra simultaneamente em ambiente pobre e rico, sendo a alternância de regimes cuidadosamente controlada. Esta alternância possibilita a redução não só do NO<sub>x</sub>, mas também de outros poluentes, tais como o CO e o UHC. Segundo Rizk e Mongia (1991) o sucesso deste modelo depende do efetivo e rápido esfriamento (efeito “quench”) que é exigida para o transporte da mistura rica (quente) para a zona pobre do combustor onde o restante de combustível é oxidado. Entretanto o desenvolvimento destes novos conceitos está associado com problemas operacionais.

No caso do sistema LP, a inerente redução de emissões de  $\text{NO}_x$  pode ser compensada pelos elevados níveis de hidrocarbonetos não queimados e emissões de CO, devido à extinção local de produtos de combustão parcial. Além disso, a probabilidade de ocorrência de auto-ignição nestas chamas é maior. O sistema RQL exige sistema de refrigeração especial, o que é agravado pela grande quantidade de fuligem gerada, já que esta aumenta a transferência de calor para as paredes da câmara.

## 1.2. O Banco de Ensaios de uma Câmara de Combustão Dois Estágios

Visando à minimização dos problemas citados acima, este trabalho apresenta um novo conceito de câmara de combustão para aplicação em turbinas a gás. Trata-se de uma configuração híbrida entre os modelos LP e RQL, entretanto sem pré-mistura dos combustores LP e sem a adição estagiada inerente aos combustores RQL. Nesta montagem, a dinâmica do escoamento dos reagentes e dos gases queimados evitará a ocorrência de regiões favoráveis à formação de  $\text{NO}_x$ . A combustão acontece em duas câmaras (dois estágios). Na primeira o combustível é injetado através de uma lança central e todo ar que participa do processo global de combustão é forçado a atravessar um “swirler”, onde adquire componente tangencial de velocidade. Assim o ar, que devido a esta componente de velocidade escoado concentrado próximo à parede da câmara, funciona como um “film cooling” (sistema de refrigeração) natural. Ao término dessa zona primária, zona de transição, há um aumento repentino do diâmetro da câmara e o escoamento rotativo de ar perde o efeito parede expandindo-se radialmente. Isto ocasiona a diminuição da pressão na região central, o que por sua vez permite a reversão do escoamento de ar e conseqüentemente a criação de uma intensa zona de recirculação misturando o ar remanescente com os produtos de combustão da zona rica (efeito “quençh”). Somente na segunda etapa (câmara secundária) uma chama pobre pré-misturada é estabelecida e desta forma ocorre a redução de  $\text{NO}_x$  (Almeida, 2007).

Três parâmetros operacionais e adimensionais controlam a dinâmica do escoamento: número de Reynolds do jato de combustível, o número de *swirl* do escoamento de ar e a razão comprimento-diâmetro ( $L/D$ ) da câmara primária. Esse último parâmetro é totalmente geométrico e constante ao longo da operação, sendo fácil sua obtenção através de técnicas de medição convencionais. Entretanto, os números de Reynolds e de *swirl* são parâmetros fluidodinâmicos, os quais dependem principalmente das vazões mássicas de ar e combustível na seção de entrada da câmara de combustão.

## 1.2. O Uso do Banco de Ensaios em Ensino em Engenharia

Para permitir o estudo do comportamento operacional da câmara em regimes pré-definidos de combustão, é necessário conhecer os valores de vazão mássica em tempo real, controlando assim o desempenho da câmara do ponto de vista de instabilidades de combustão e emissões de poluentes. Este trabalho apresenta uma metodologia de desenvolvimento de um sistema de medição de vazão em tempo real por meio de sensores eletrônicos e um programa computacional de monitoramento e aquisição de dados. Este sistema foi elaborado para ser utilizado em aulas de laboratório, de disciplinas de combustão, do curso de graduação e pós-graduação em Engenharia Mecânica e Engenharia Aeronáutica, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

A utilização desse banco de ensaios para ensino nas engenharias é de grande importância, pois permite aos alunos e pesquisadores um primeiro contato com processos de combustão em câmaras de combustão de dois estágios. Além disso, o sistema desenvolvido permite avaliar a influência de algumas variáveis nos parâmetros de desempenho da câmara.

## 2. MEDIÇÃO DE VAZÃO ATRAVÉS DE PLACAS DE ORIFÍCIO

Para determinar a quantidade de massa que atravessa uma dada seção geométrica característica em dado intervalo de tempo, diversos elementos de medição podem ser empregados. Comumente são empregados elementos do tipo deprimogênitos. Nesses elementos é possível correlacionar a queda de pressão do escoamento com a vazão mássica que atravessa uma dada seção através de um coeficiente de correlação, chamado coeficiente de descarga. Outros sistemas podem ser empregados, como por exemplo, medidores térmicos ou medidores dinâmicos de turbinas. Dentre os medidores baseados em elementos deprimogênitos, o mais usual são as placas de orifício concêntricas (Delmeé, 1983).

A principal vantagem das placas de orifício é que essas dispensam calibração para obtenção do valor do coeficiente de descarga, caso a fabricação respeite normas padronizadas. Nesse caso, o valor do coeficiente pode ser obtido de tabelas ou equações semi-empíricas. A desvantagem é que a queda de pressão do escoamento gerada na placa é grande em relação à pressão estática, ocasionando perda de pressão, e conseqüentemente perda de energia.

Para um escoamento incompressível, adiabático e ausente de variação na energia potencial, conhecendo o valor do coeficiente de descarga, as propriedades do escoamento e a queda de pressão na placa de orifício, é possível calcular a vazão mássica através da equação da continuidade de Bernoulli (Delmeé, 1983):

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot (P_2 - P_1) \cdot \rho} \quad (1)$$

Onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica do escoamento em kg/s,  $A$  é a área do orifício em  $\text{m}^2$ ,  $P_2$  e  $P_1$  são respectivamente a pressão a montante e jusante da placa de orifício em Pa e  $\rho$  a massa específica do fluido em  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

A massa específica é calculada através da equação de estado apresentada na Eq. (2):

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (2)$$

Onde  $P$  é a pressão estática na tubulação em kPa,  $R$  é a constante do gás em kJ/kg.K e  $T$  é a temperatura em K.

### 2.1. Cálculo do Coeficiente de Descarga de Placas de Orifício com Tomadas de Pressão na Tubulação

O valor do coeficiente de descarga é calculado, para cada tipo e geometria de placa de orifício, com base no número de Reynolds em uma dada seção e da razão de diâmetros  $\beta$ , da placa de orifício com o da tubulação.

Para placas de orifício com tomadas de pressão na tubulação, com diâmetros variando de 25 a 50mm e razão de diâmetros  $\beta$  variando de 0.2 a 0.8, pode-se calcular o coeficiente de descarga da placa de orifício através da Eqs. (3), (4) e (5), as quais foram obtidas empiricamente (Delmée, 1983):

$$C_D = K1 + K2 \sqrt{\frac{10^6}{Re}} \quad (3)$$

$$K1 = 0,6014 - 0,03052D^{-14} + (0,3760 + 0,1692D^{-14}) \left[ \left( \frac{0,16129}{D^2 \beta^2 + 0,0635D} \right) + \beta^4 + 1,5\beta^{16} \right] \quad (4)$$

$$K2 = 0,0002 + \frac{0,02794}{D} + \left( 0,0038 + \frac{0,01016}{D} \right) (\beta^2 + 16,79\beta^{16}) \quad (5)$$

Onde  $K1$  e  $K2$  são constantes da equação empírica do coeficiente de descarga,  $Re$  é o número de Reynolds do escoamento,  $D$  é o diâmetro da tubulação em mm e  $\beta$  é razão entre o diâmetro da placa e o diâmetro da tubulação.

### 2.1. Cálculo do Coeficiente de Descarga de Placas de Orifício com Tomadas de Pressão nos Flanges

Para placas de orifício com tomadas de pressão nos flanges, com diâmetros variando de 10 a 25mm e razão de diâmetros  $\beta$  variando de 0.3 a 0.8, pode-se estimar a coeficiente de descarga da placa de orifício através das Eq. (3), (6) e (7), as quais foram obtidas empiricamente (Delmée, 1983):

$$C_D = K1 + K2 \sqrt{\frac{10^6}{Re}} \quad (3)$$

$$K1 = 0,5991 + \left( \frac{0,118}{D} \right) + \left( 0,3155 + \frac{0,445}{D} \right) (\beta^4 + 2\beta^{16}) \quad (6)$$

$$K2 = \frac{0,0132}{D} - 0,000192 + \left( 0,01648 - \frac{0,02946}{D} \right) (\beta^4 + 4\beta^{16}) \quad (7)$$

Onde  $K1$  e  $K2$  são constantes da equação empírica do coeficiente de descarga,  $Re$  é o número de Reynolds do escoamento,  $D$  é o diâmetro da tubulação em mm e  $\beta$  é razão entre o diâmetro da placa e o diâmetro da tubulação.

## 3. APARATO EXPERIMENTAL

O banco de ensaios da câmara de combustão de dois estágios é mostrado nas Figs. (1) e (2). O sistema de alimentação de ar e combustível do banco de ensaios é dividido em duas linhas de fluxo separadas. Para a medição da vazão mássica de ar é utilizado uma placa de orifício concêntrica com tomadas de pressão na tubulação, mostrada na Fig. (3). Para a medição de vazão mássica de combustível é utilizada uma placa de orifício concêntrica com tomadas de pressão nos flanges, mostrada na Fig. (4). As construções das placas de orifício seguem a norma ISO 5167, dispensando assim calibração prévia. As especificações geométricas e operacionais das respectivas placas são mostradas na Tab. (1).

Como nos cálculos das vazões mássicas de ar e combustível é necessário conhecer as propriedades do escoamento, são adicionadas nas linhas de ar e combustível tomadas de pressão estática e temperatura. Para as medições da queda de pressão nas placas e pressões estáticas nas linhas são utilizados sensores de pressão resistivos diferenciais da série MPX, da "Freescale Semiconductor". A pressão atmosférica é obtida através do sensor pressão absoluta MPX-5100A, calibrado com um barômetro de mercúrio. Para as medições de temperatura são utilizados termopares do tipo J. As faixas de medição dos sensores são apresentadas na Tab. (2)



Figura 1. Banco de Ensaios da Câmara RQL

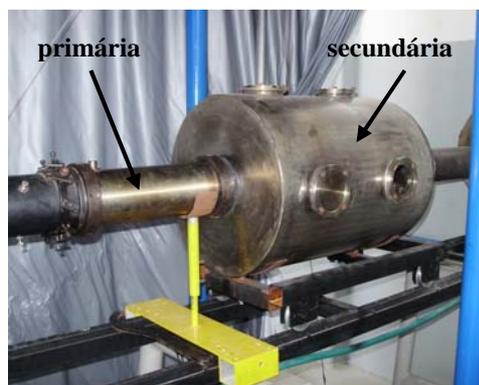


Figura 2. Câmara de Combustão de Dois Estágios

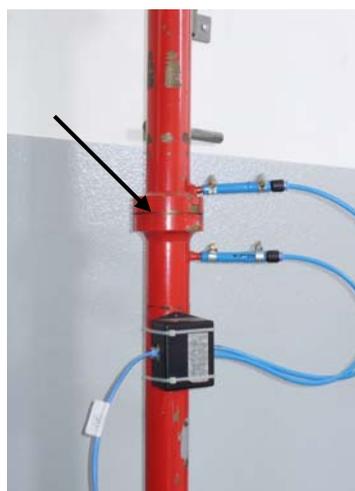


Figura 3. Placa de Orifício de Ar

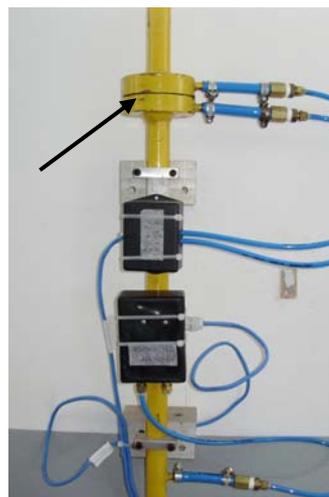


Figura 4. Placa de Orifício de Combustível

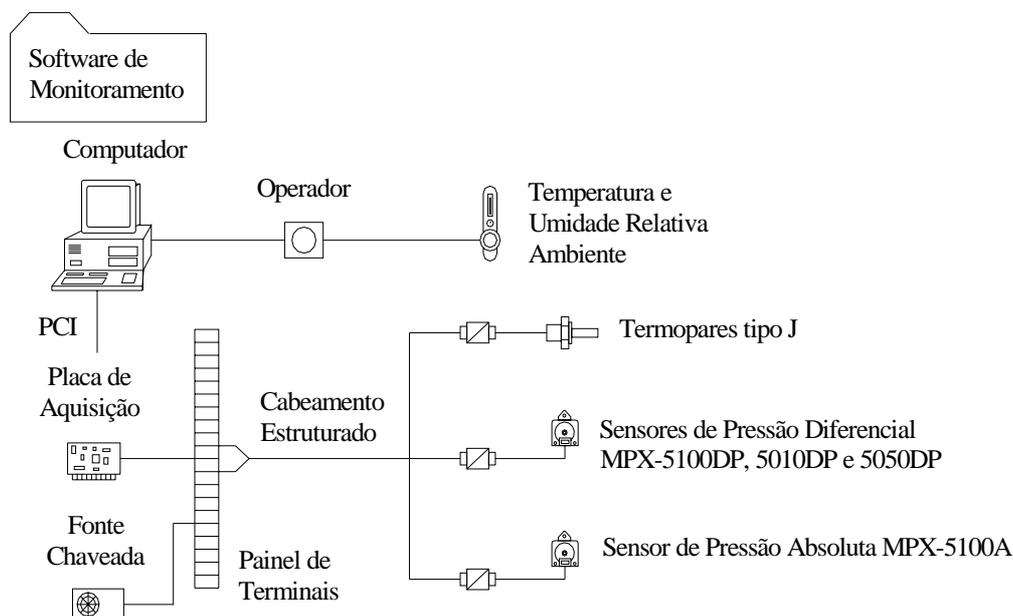
Tabela 1. Especificações para as Placas de Orifício e Coeficiente de Descarga

parâmetro	ar	combustível
tipo de placa de orifício	tomadas na tubulação	tomadas nos flanges
diâmetro da tubulação (mm)	47	22
diâmetro da placa de orifício (mm)	35,7	7,1
razão de diâmetros $\beta$	0,75	0,32
faixa de vazão mássica (g/s)	20 a 80	0,1 a 2,0
faixa de número de Reynolds	$5 \cdot 10^7$ a $1,2 \cdot 10^8$	15000 a 50000
coeficiente de descarga	0,6552	0,7318

Tabela 2. Descrição dos Sensores e Faixas de Medição

sensor	modelo	faixa de medição
pressão atmosférica	MPX-5100A	0 a 100 kPa (absoluta)
queda de pressão na placa de ar	MPX-5100DP	0 a 100 kPa (diferencial)
pressão estática na linha de ar	MPX-5100DP	0 a 100 kPa (diferencial)
temperatura na linha de ar	termopar tipo J	0 a 150°C
queda de pressão na placa de combustível	MPX-5010DP	0 a 10 kPa (diferencial)
pressão estática na linha de combustível	MPX-5050DP	0 a 50 kPa (diferencial)
temperatura na linha de combustível	termopar tipo J	0 a 150°C

As respectivas incertezas de cada sensor empregado no banco de ensaios serão apresentadas no item 4, de acordo com o processo e o padrão de calibração utilizado. Todos os sensores empregados no banco de ensaios são do tipo analógico, os quais transmitem um sinal elétrico referente à grandeza física em forma de tensão em nível contínuo, variando de 0 a 5V. O esquema da instrumentação é mostrado na Fig. (5).



**Figura 5. Esquema da Instrumentação do Banco de Ensaios**

O sistema de aquisição de dados é composto do cabeamento estruturado, de um painel de terminais, de uma fonte de alimentação chaveada e da placa de aquisição. Os sensores são alimentados eletricamente pela fonte chaveada através do cabeamento estruturado. O cabeamento é utilizado também para transmitir o sinal analógico de saída dos sensores até a placa de aquisição. Os sensores são conectados a um painel de terminais, o qual distribui os sensores em cada canal de aquisição da placa de aquisição. A placa de aquisição utilizada no sistema é a modelo PCI-6251, da National Instruments. O programa de monitoramento e aquisição das vazões mássica foi desenvolvido utilizando o software comercial LabVIEW 7.1, da National Instruments. A taxa de aquisição utilizada é 1000Hz para cada sensor.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Calibração dos Sensores de Medição

Para correlacionar a pressão aplicada nos sensores de pressão com o nível de tensão gerado pelos sensores é realizado um procedimento de calibração utilizando tubos em U. Aplicando uma dada pressão sobre uma das colunas de do tubo em U é possível calcular a diferença de pressão gerada, através da variação da altura da coluna de líquido. Os sensores de pressão foram montados em paralelo a coluna pressurizada dos tubos, assim a pressão gerada sobre a coluna é a mesma gerada sobre o sensor de pressão. Para os sensores de pressão de 0 a 10kPa é utilizado um tubo em U com água como líquido. Para os sensores de pressão de 0 a 100kPa é utilizando um tubo em U com mercúrio como líquido. Ambos os tubos em U possuem altura máxima de coluna de 1000mm, possibilitando pressões equivalentes de 10kPa e 130kPa, permitindo calibrar todos os sensores em toda a faixa de medição.

O procedimento de calibração consiste em pressurizar e despressurizar uma das colunas dos tubos em U com ar comprimido, correlacionando as alturas de líquido com as pressões, registrando os níveis de tensão gerados pelos sensores. Ao final do processo de calibração é obtida a função de transferência do sensor utilizando um ajuste linear dos pontos registrados. O ajuste linear apresenta como resultado os coeficientes angulares e lineares da equação da reta. O coeficiente angular corresponde ao ganho do sensor em kPa/V e o coeficiente linear ao ajuste de zero sensor em kPa. As Figuras (6), (7), (8) e (9) apresentam as curvas de calibração obtidas para os sensores empregados.

As incertezas de medição para cada sensor de pressão são obtidas a partir da combinação das incertezas referentes ao padrão e aos pontos de calibração, utilizando o método dos mínimos quadráticos, e são mostradas na Tab. (3).

Para os termopares tipo J foram utilizados condicionadores de sinal comerciais pré-calibrados. Os condicionadores foram configurados para gerarem um nível de tensão analógico de saída de 0,88V a 0°C e 4,4V a 150°C. De acordo com as especificações do fabricante, nessa faixa de medição o valor da incerteza relativa à leitura é 0,75°C. A partir dos dois pontos configurados no condicionador de sinal é realizado o ajuste linear, para obtenção da função de transferência dos sensores de temperatura.

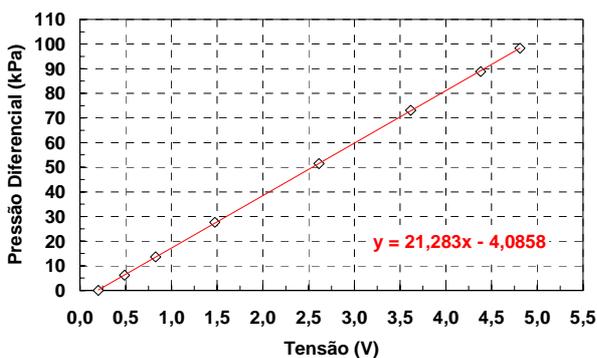


Figura 6. Curva de Calibração do Sensor de Pressão da Queda de Pressão na Placa de Orifício de Ar

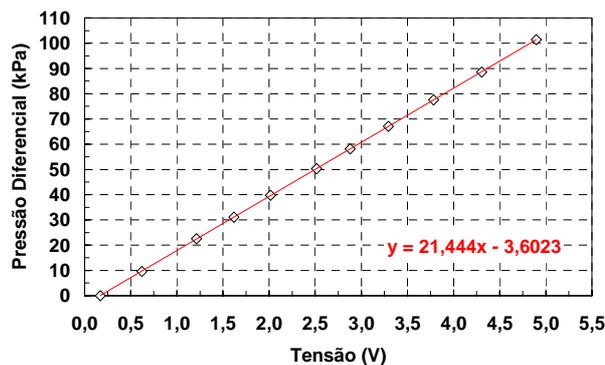


Figura 7. Curva de Calibração do Sensor de Pressão da Pressão Estática na Linha de Ar

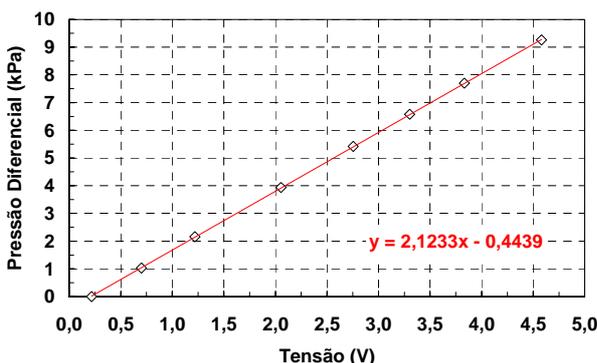


Figura 8. Curva de Calibração do Sensor de Pressão da Queda de Pressão na Placa de Orifício de Combustível

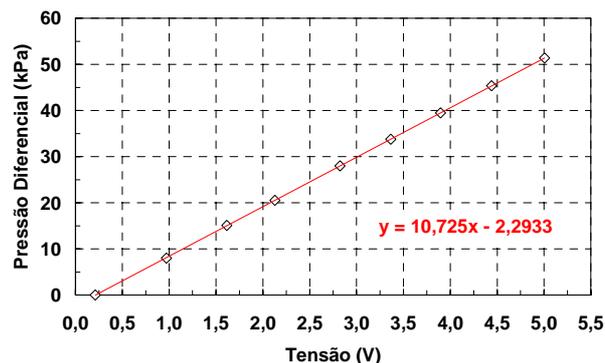


Figura 9. Curva de Calibração do Sensor de Pressão da Pressão Estática na Linha de Combustível

Tabela 3. Incertezas de Medição Referentes aos Sensores de Medição

sensor	faixa de medição	incerteza absoluta	incerteza relativa ao FS
pressão atmosférica	0 a 100 kPa (absoluta)	0,521 kPa	0,5%
queda de pressão na placa de ar	0 a 100 kPa (diferencial)	0,413 kPa	0,41%
pressão estática na linha de ar	0 a 100 kPa (diferencial)	0,345 kPa	0,34%
temperatura na linha de ar	0 a 150°C	0,75°C	0,5%
queda de pressão na placa de combustível	0 a 10 kPa (diferencial)	0,037 kPa	0,37%
pressão estática na linha de combustível	0 a 50 kPa (diferencial)	0,173 kPa	0,35%
temperatura na linha de combustível	0 a 150°C	0,75°C	0,5%

#### 4.2. Desenvolvimento do Programa de Monitoramento e Aquisição

O programa de monitoramento e controle é utilizado para processar os sinais analógicos provenientes dos sensores, direcionando os valores de medição dentro de um fluxo de informação, para diferentes blocos de cálculo. Cada bloco de cálculo, identificado na estrutura do programa principal como um subprograma, executa uma rotina de cálculo específica com dados de entrada pré-definidos. Foram desenvolvidos subprogramas específicos, dedicados a cada etapa do processo de cálculo. Os principais subprogramas utilizados no programa, mostrados no diagrama de blocos da Fig. (10), são identificados: [1] subprograma para cálculo da vazão mássica e número de Reynolds do escoamento de ar; [2] subprograma para cálculo da vazão mássica e número de Reynolds do combustível; [3] cálculo da razão de equivalência da mistura ar-combustível; [4] subprograma para cálculo do número de swirl; [5] cálculo da incerteza do valor de vazão mássica de ar.

Os subprogramas identificados por [P] no diagrama de blocos executam a transformação das grandezas elétricas, referentes a cada sensor de medição, na grandeza física de medição (pressões e temperaturas) com base nos coeficientes de calibração dos sensores. Os valores de entrada dos demais subprogramas são as grandezas físicas medidas através dos sensores e os parâmetros geométricos da câmara de combustão.

Como exemplo, o subprograma de vazão mássica de ar recebe os valores da razão de diâmetros da placa de orifício  $\beta$ , da queda de pressão na placa ( $P_1 - P_2$ ) e das propriedades do escoamento para calcular o coeficiente de descarga, através das Eqs. (3), (4) e (5), e conseqüentemente a vazão mássica através da Eq. (1).

As incertezas dos parâmetros de desempenho, os quais são calculados com base nas variáveis de medição, são obtidas através do método de propagação de incertezas baseado nas derivadas parciais da equação correspondente, em relação às incertezas das variáveis de medição, conforme método apresentado em Doebelin (2004). As incertezas das variáveis de medição são obtidas durante a calibração dos sensores, conforme mostrado anteriormente na Tab. (3).

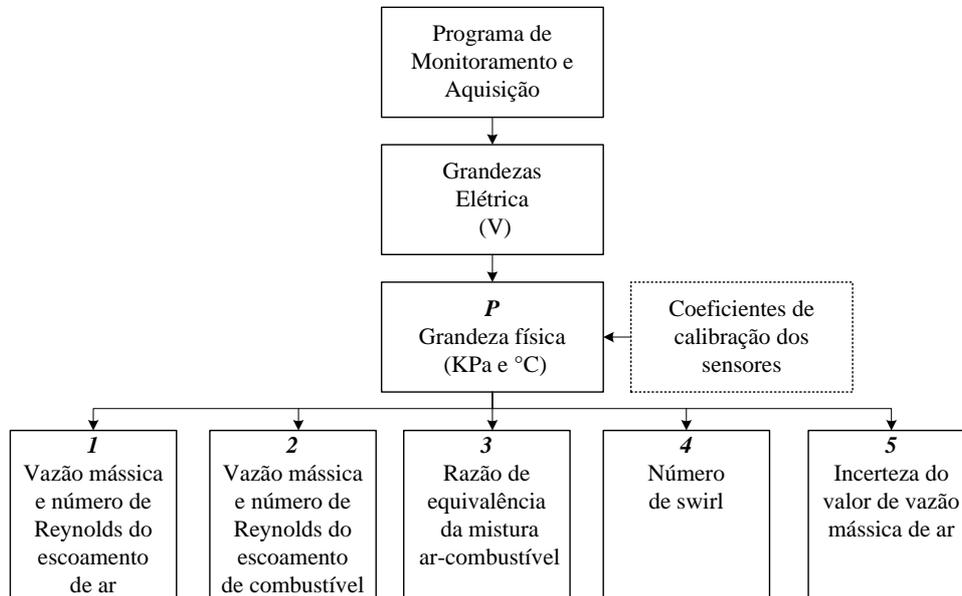


Figura 10. Diagrama de Blocos Parcial do Programa de Monitoramento e Aquisição

A interface gráfica do programa de aquisição, na qual o operador visualiza os principais parâmetros de desempenho é mostrada na Fig. (11). O programa desenvolvido permite ainda que os parâmetros de desempenho, mostrados na tela, sejam gravados em um arquivo de formato texto .txt, para tratamento dos dados experimentais posterior aos ensaios.

Através dos comandos de entrada do programa de aquisição é possível alterar os parâmetros geométricos principais da câmara de combustão, como por exemplo, diâmetro do bico injetor, o qual interfere no cálculo do número de Reynolds do jato de combustível. Os ganhos e ajustes de zero dos sensores também podem ser alterados na interface, permitindo a rápida substituição de um sensor por outro com faixa de medição diferente.

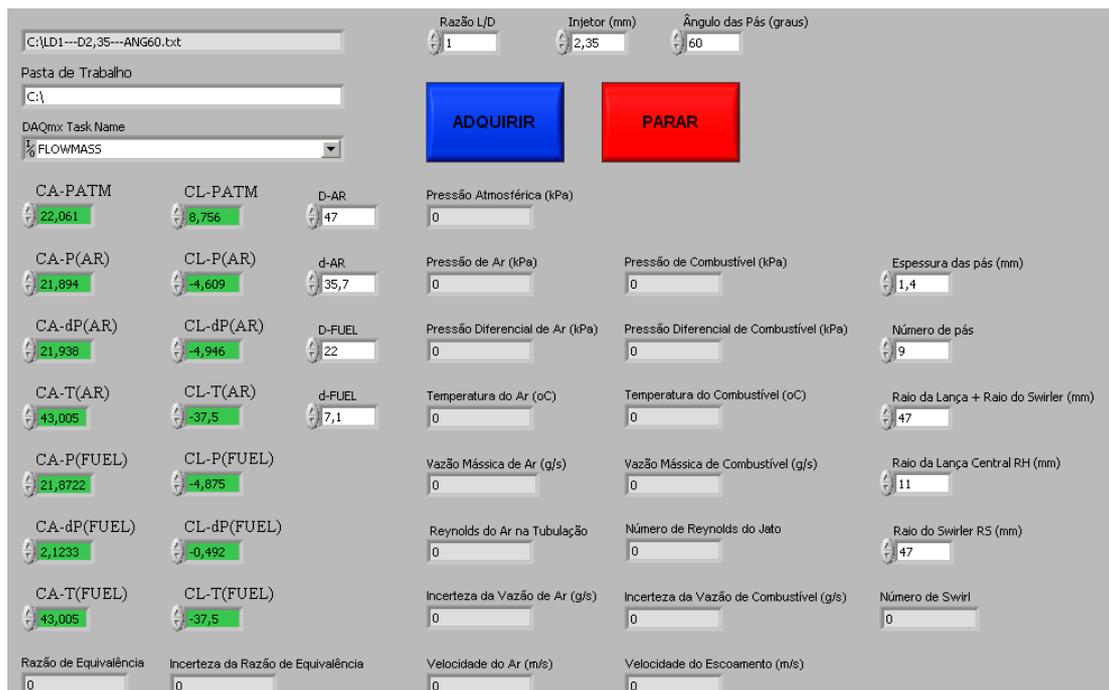


Figura 11. Interface Gráfica do Programa de Monitoramento e Aquisição

## 5. RESULTADOS

Os resultados a seguir apresentam ensaios preliminares em diferentes condições de operação da câmara de combustão. Os ensaios foram realizados para avaliar o desempenho do sistema de aquisição como um todo, verificando e corrigindo possíveis falhas de programação dentro do programa. Como resultados são apresentados as curvas típicas de incerteza absoluta da vazão mássica de ar em função da vazão mássica de ar e incerteza absoluta da vazão de combustível em função da vazão mássica de combustível. São apresentadas também as curvas de incerteza relativas, para avaliar o comportamento percentual das incertezas em relação às medidas instantâneas de vazão mássica

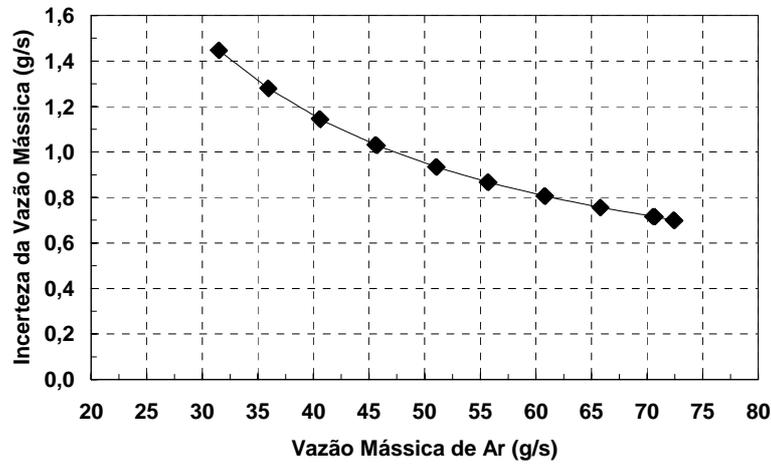


Figura 12. Incerteza Absoluta da Vazão Mássica de Combustível em função da Vazão Mássica

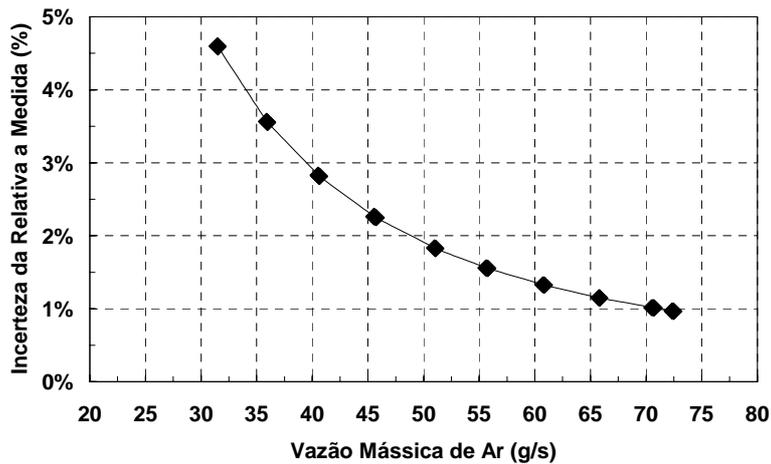


Figura 13. Incerteza Percentual da Vazão Mássica de Combustível em função da Vazão Mássica

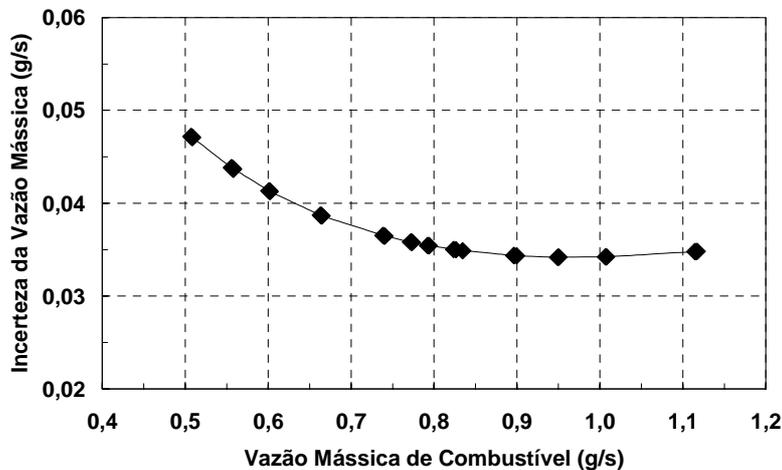
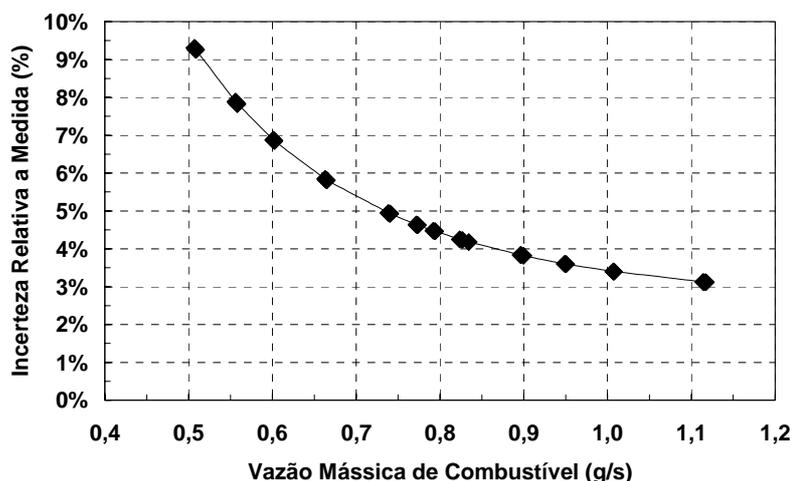


Figura 14. Incerteza Absoluta da Vazão Mássica de Combustível em função da Vazão Mássica



**Figura 15. Incerteza Percentual da Vazão Mássica de Combustível em função da Vazão Mássica**

As Figuras (13) e (15) mostram que as incertezas relativas aos valores de vazões mássicas de ar e combustível correspondem a um pequeno percentual das medidas. O sistema de medição, baseado nas placas de orifício consideradas, possui boa precisão, com incertezas máximas da ordem dos 5% para a vazão de ar e 10% para a vazão de combustível. Em ambos os casos a incerteza tende a diminuir com o aumento da vazão pelo fato de que na medida em que se aumenta a vazão, aumenta-se a queda de pressão do escoamento nas placas, diminuindo a influência da incerteza dos sensores sobre o valor final de incerteza calculada.

## 6. CONCLUSÕES

A estrutura do programa de monitoramento e aquisição se mostra eficiente e robusta para aplicação em ensaios de desempenho da câmara de combustão de dois estágios. A utilização da interface baseada em sensores eletrônicos permite que os ensaios sejam realizados de forma mais segura, reduzindo o tempo total de ensaio. A utilização de sensores eletrônicos para medição das pressões e temperatura permite que os valores de desempenho como vazões mássicas e números de Reynolds sejam calculados e apresentados visualmente na tela do computador em tempo real.

Com isso, pode-se avaliar o desempenho instantâneo da câmara de combustão a cada instante do ensaio, evitando erros de medição causados por uso de sensores analógicos.

Os valores de incertezas associadas aos valores de vazões mássicas de ar e combustível possuem pequeno valor percentual em relação às medidas, introduzindo confiabilidade nos resultados. As incertezas relativas às variáveis de medição obtidas durante os processos de calibração também possuem pequeno valor percentual em relação às faixas de medição, comprovando a escolha adequada dos padrões de calibração.

O uso de subprogramas dedicados, dentro de um programa principal de monitoramento e controle, permite uma grande flexibilidade para introdução ou modificação da estrutura atual do programa. Novos subprogramas podem ser inseridos sem que seja necessária uma alteração de grande porte na estrutura já implementada.

## 7. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia da Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pela disponibilização da estrutura laboratorial.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pelos auxílios financeiros aos alunos envolvidos.

## 8. REFERÊNCIAS

- Almeida, D. S. 2007. “Detecção de Instabilidades Termoacústicas em Câmaras de Combustão do Tipo RQL para Aplicação em Turbinas a Gás”. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Aeronáutica. 123p.
- Delmeé G. J. 1983. “Manual de Medição de Vazão”. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 474p.
- Doebelin E. O. 2004. “Measurement Systems: Application and Design”, 5th Edition. New York: McGraw-Hill.
- Rizk, N.K.; Mongia, H.C. 1991. “Low NO<sub>x</sub> Rich-Lean Combustion Concept Application”. In 27<sup>th</sup>: AIAA, SAE, ASME and ASEE Joint Propulsion Conference, jun. 24-26, Sacramento, CA, United States.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

## DEVELOPMENT OF A MASS FLOW METERING SYSTEM FOR A DOUBLE-STAGE COMBUSTION CHAMBER

Samantha González Tessele, [samysgt@ita.br](mailto:samysgt@ita.br)

Giuliano Gardolinski Venson, [venson@ita.br](mailto:venson@ita.br)

Dener Silva de Almeida, [dener@ita.br](mailto:dener@ita.br)

Pedro Teixeira Lacava, [placava@ita.br](mailto:placava@ita.br)

Technological Institute of Aeronautics, Aeronautical Engineering Division  
Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias.  
São José dos Campos, SP, Brasil. 12228-900

**Abstract:** *This paper presents the development of a mass flow measurement the system for a double-stage combustion chamber test stand. The objective is to describe the mass flow measurement system, which operates in real time. The measurement system is composed of concentric orifice plates, resistive pressure sensors, thermocouples type J and a data acquisition system. They used two orifice plate systems, one for measuring the air mass flow rate and another for measuring the fuel flow rate. The orifice plates are manufactured according to ISO 5167. The pressure sensors used are the Freescale Semiconductor MPX series and they were calibrated using U-tubes. The data acquisition system is based on the LabVIEW 7.1 software and PCI-6251 data acquisition devices, both from National Instruments. The system has designed to allow air flow measurements ranging from 20 to 80g/s and fuel measurements ranging from 0.2 to 2g/s. The results show the computational interface developed for data recording. The results also show the curves of air and fuel mass flow rate uncertainty in function of nominal flows. The mass flow uncertainties ranges from 0.5 to 1.5g/s and 0.03 to 0.05g/s, for air flow rate and fuel flow rate, respectively.*

**Keywords:** *combustion chamber, data acquisition, mass flow rate, orifice plate meter.*