

MEDIÇÃO DE FLUTUAÇÕES DE VELOCIDADE EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS USANDO DADOS DE TERMOPARES

Aurimar Moreira Reis

Jurandir Itizo Yanagihara

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica,
Cx. P. 8174 - CEP 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil

E-mail: amreis@usp.br - jiy@usp.br

Resumo. *Este trabalho consistiu no desenvolvimento de uma nova técnica de medição de velocidade em escoamentos turbulentos com a utilização de medidas de temperatura de termopares. Essa técnica se baseia na comparação das equações diferenciais relacionadas a dois termopares separados por uma pequena distância ao longo do escoamento. Ao fazer essa comparação chega-se a uma equação para a velocidade na direção do escoamento. Essa velocidade é proveniente da constante de tempo dos termopares e pode ser calculada em cada instante de tempo somente com base nos dados de termopares. A técnica foi testada em um escoamento de gases de combustão, produzidos por uma chama turbulenta de GLP-ar, e mostrou resultados realistas ao ser comparada com a velocidade obtida diretamente da equação da constante de tempo relacionada a cada termopar.*

Palavras chaves: *Termopar, Constante de tempo, Velocidade, Gases de combustão.*

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma técnica nova de medição de velocidade em escoamentos turbulentos de baixa frequência. Nessa técnica a velocidade é deduzida a partir das medidas de temperatura de termopares em escoamentos de gases de combustão. Inicialmente, a técnica pretendia apenas fazer a compensação dos atrasos da inércia térmica de termopares, mas foi estendida para obtenção da velocidade instantânea do escoamento. Para realizar as medições foi montado um sistema de medidas que produz uma chama turbulenta pré-misturada de GLP-ar.

Os grandes avanços ocorridos nas últimas décadas em eletrônica, tecnologia material e computadores permitiram o surgimento de várias técnicas modernas de medidas em escoamentos. Chamadas de diagnósticos óticos ou técnicas laser, esses processos de medidas vieram complementar as técnicas de sondas existentes. Atualmente, algumas destas técnicas, tais como a espectroscopia Raman (CARS), Rayleigh, e Fluorescência Laser (LIF), podem medir temperatura, densidade e concentração das espécies em escoamentos. A técnica mais usual para medição da velocidade instantânea de escoamentos é o anemômetro laser Doppler (LDA).

Essas técnicas laser apresentam algumas vantagens como o caráter não intrusivo e são geralmente mais exatas que outras técnicas que utilizam sondas, como o anemômetro de fio quente, que foi por muito tempo a única técnica disponível para obter a velocidade instantânea em escoamentos. Porém, elas apresentam alguns inconvenientes como

dificuldades de operação e, principalmente, exigências de utilização de equipamentos sofisticados e de alto custo e fotodetetores altamente sensíveis. Além disso, elas não são adequadas para utilização em certos ambientes industriais. Um levantamento dessas técnicas laser é dado por Lederman e Sacks (1984).

Por outro lado, o termopar é um instrumento que foi e continua sendo bastante utilizado para medidas de temperatura. A grande vantagem do termopar é que ele é um instrumento de baixo custo, apresenta respostas rápidas de variações de temperatura no escoamento. É um instrumento bem simples, de fácil manuseio e instalação, e cobre um amplo intervalo de temperaturas. Além disso, o termopar não está sujeito a problemas de auto-aquecimento e é utilizado até mesmo para comparar e calibrar as medidas de temperatura das técnicas laser (Chandran et al. (1985) e Lückcrath et al. (1995)). Praticamente, a única desvantagem do termopar é o atraso em sua resposta às mudanças de temperatura do meio, devido a inércia térmica do sensor do termopar.

Para corrigir, ou compensar, esses efeitos da inércia térmica do termopar, geralmente, é determinada a constante de tempo do termopar. A constante de tempo é praticamente uma medida do tempo de atraso da resposta do sensor e está diretamente relacionada a transferência de calor que ocorre entre o sensor (ou junção do termopar) e o gás envolvente. Então para determiná-la, e fazer a compensação dos efeitos da inércia térmica, é necessário considerar os vários fenômenos de transferência de calor que ocorrem entre o termopar e o gás envolvente. Alguns métodos para determinação da constante de tempo são dados nos trabalhos de Paranthoën e Lecordier (1995), Boutrif e Thelliez (1995), Tagawa e Ohta (1997) e Reis (1999).

Há apenas alguns trabalhos conhecidos em que o termopar foi usado para obter a velocidade do escoamento. No trabalho de Motevalli et al. (1992), a velocidade média é deduzida a partir dos sinais de dois termopares introduzidos no escoamento. Cox (1977) propõe uma técnica de correlação cruzada para medidas dos perfis de temperatura e velocidade média simultâneas usando uma única sonda. Praticamente, não há nenhum trabalho conhecido em que o termopar foi usado para obter a velocidade instantânea do escoamento.

No trabalho de Motevalli et al. (1992) a velocidade média é obtida dividindo a distância entre dois termopares, separados ao longo do escoamento, pelo tempo necessário para o escoamento ir de um termopar ao outro, tempo esse conseguido da máxima correlação entre os dois sinais. A técnica é chamada de CCV (“Cross-Correlation Velocimetry”), que se baseia no conceito de “vórtice congelado” no qual as estruturas vorticais retêm suas formas e características em um curto período de espaço e de tempo em escoamentos de baixa turbulência.

2. ARRANJO EXPERIMENTAL

Os principais constituintes do sistema de medidas deste trabalho são mostrados na Figura 2.1, o qual é basicamente constituído de um queimador que produz uma chama turbulenta, um sistema de aquisição de dados de temperatura dos termopares, e um computador para análise e tratamento dos dados. Na Figura 2.1 os componentes de 1 a 6 formam o sistema do queimador e os números de 7 a 11, juntamente com a placa de aquisição de dados instalada no microcomputador (11), constituem o sistema de aquisição de dados.

O queimador foi projetado e construído de acordo com a Figura 2.2. A cuba por onde passa o combustível, vindo através do sistema de alimentação da chama, constitui a base do queimador. Nessa cuba, uma borracha rígida, mostrada na Figura 2.2, permite a vedação necessária e serve de suporte para uma agulha farmacêutica. O gás sob pressão, proveniente

do tanque de combustível, é controlado por uma válvula na saída do tanque e por uma válvula de controle de vazão próximo à entrada do rotâmetro. O gás penetra no interior da cuba e sai através da agulha sendo introduzido no interior do tubo interno do queimador (bocal), onde é feita a ignição.

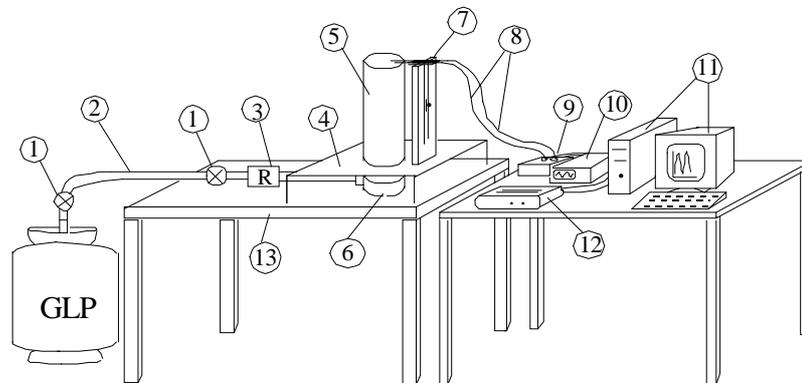


Figura 2.1. Sistema de medidas. 1-válvulas, 2-mangueira, 3-rotâmetro, 4-suporte p/tubo externo do queimador, 5-tubo externo, 6-cuba, 7-suporte p/termopares, 8-termopares, 9-banho de gelo, 10-osciloscópio, 11-computador, 12-impressora, 13-bancada.

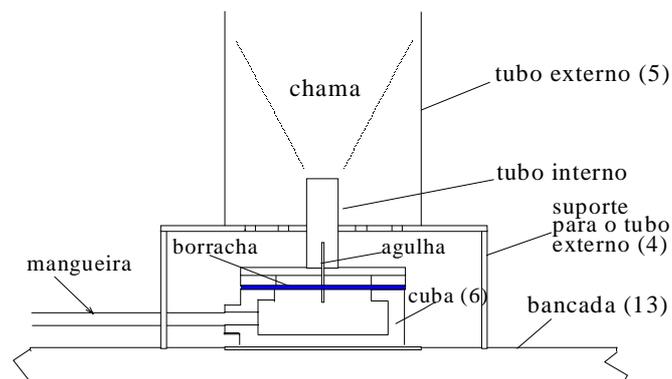


Figura 2.2 - Projeto do queimador

Os termopares eram apoiados em suportes constituídos por posicionadores que permitiam o movimento da junção livre nos gases de combustão na direção do eixo do bocal do queimador. A interligação entre posicionadores permitia uma aproximação de até 4,0 mm entre dois termopares ao longo do eixo da chama e também o movimento transversal (horizontal) em relação a esse eixo de até 25,0 mm.

3. MÉTODOS DE OBTENÇÃO DA VELOCIDADE

Considerando, principalmente, a transferência de calor por convecção na junção do termopar, uma vez que os outros fenômenos como a radiação, por exemplo, influenciam muito pouco nas flutuações de temperatura, a conservação da energia aplicada à junção (sensor) do termopar, torna-se:

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} = T_g(t) - T(t), \quad (3.1)$$

onde $T_g(t)$ e $T(t)$ são as temperaturas do gás e da junção do termopar no instante de tempo t . A constante de tempo, τ , é dada pela relação abaixo, onde C_P , M e A são o calor específico, a massa e a área superficial do termopar, respectivamente, e h é o coeficiente de transferência de calor.

$$\tau = \frac{MC_P}{hA}. \quad (3.2)$$

A constante de tempo τ , praticamente, é o inverso do coeficiente de troca de calor h e representa uma medida do tempo de resposta do sensor às mudanças do meio.

Alguns fabricantes (Omega Tech. Co., 1992) procuram fazer as junções de termopares num formato bem próximo de uma esfera. Então foi feito um levantamento das várias relações para a transferência de calor no escoamento em torno de uma esfera (Incropera e de Witt, 1990, Paranthoën e Lecordier, 1996). A grande maioria destas relações apresenta uma forma geral, dada pela relação de Nusselt, Nu_D , que é semelhante a Equação 3.3, onde c_1 é uma constante envolvendo o número de Prandtl, que para a maioria dos gases é praticamente constante com a temperatura e igual a 0,7. E m é a potência do número de Reynolds, Re_D , baseado no diâmetro da esfera D , geralmente igual a 0,5.

$$Nu_D = 2.0 + c_1 Re_D^m. \quad (3.3)$$

Então, substituindo essa relação de Nusselt na expressão da constante de tempo, sabendo que $Nu_D = hD/k$, sendo k a condutividade térmica do gás, e que $Re_D = \rho v D / \mu$, onde ρ e μ são a densidade e a viscosidade do gás, respectivamente, e v a velocidade, obtém-se a Equação 3.4 para o inverso da constante de tempo,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{c_2}{D^2} + \frac{c_3 v^m}{D^{2-m}}, \quad (3.4)$$

onde $c_2 = 12k/\rho_T C_P$ e $c_3 = (6kc_1/\rho_T C_P)(\rho/\mu)^m$.

Levando a relação acima na equação diferencial do termopar (Equação 3.1) e aplicando a equação resultante para dois termopares separados por uma pequena distância e de diâmetros diferentes, e comparando as duas equações admitindo que a temperatura do gás correspondente ao primeiro termopar é aproximadamente igual a temperatura no segundo, à jusante no escoamento; e também a velocidade, chega-se a essa equação algébrica simples para a velocidade do gás:

$$\alpha u^2 + \beta u + \gamma = 0, \quad (3.5)$$

sendo os coeficientes α , β e γ dados por

$$\alpha = (T_1 - T_3) \frac{c_3^2}{(D_1 D_3)^{2-m}},$$

$$\beta = (T_1 - T_3) \left(\frac{c_2 c_3}{D_1^2 D_3^{2-m}} + \frac{c_2 c_3}{D_1^{2-m} D_3^2} \right) + \frac{\dot{T}_1 c_3}{D_3^{2-m}} - \frac{\dot{T}_3 c_3}{D_1^{2-m}},$$

$$\gamma = (T_1 - T_3) \left(\frac{c_2}{D_1 D_3} \right)^2 + \frac{\dot{T}_1 c_2}{D_3^2} - \frac{\dot{T}_3 c_2}{D_1^2}.$$

Nas equações acima, os índices 1 e 3, exceto em c_3 , correspondem ao primeiro e segundo termopares, respectivamente. O ponto sobre T indica derivada temporal. A velocidade do gás é então obtida resolvendo a Equação 3.5 e calculando $v = u^{1/m}$. A velocidade neste caso é independente do conhecimento da temperatura do gás; os coeficientes são funções apenas das constantes e das medidas dos termopares.

No entanto, essa equação é uma equação mal condicionada, ou seja, mesmo um erro pequeno no cálculo desses coeficientes provoca um grande desvio na solução u . Esses erros podem surgir no cálculo das derivadas, nas constantes adotadas e, principalmente, na diferença de fase que existe devido a distância entre os termopares. Então para eliminar essa diferença de fase entre os termopares foi adotado o seguinte procedimento. Como as curvas de dois termopares iguais apresentam, praticamente, o mesmo comportamento, a temperatura do primeiro foi calculada em função do segundo termopar de mesmo diâmetro, e a seguir foi comparada a equação diferencial desse primeiro com a equação correspondente a um terceiro termopar de diâmetro diferente que é colocado na mesma posição do primeiro (daí o índice 3 nas equações acima).

A equação para a temperatura do gás segue esse mesmo procedimento usado para a obter a velocidade. Juntando as Equações 3.1 e 3.4 e igualando as equações resultantes, relacionadas a cada termopar, e admitindo que a velocidade do gás é a mesma entre os dois, chega-se a uma equação similar para a temperatura. Com essa temperatura do gás obtida, a velocidade pode ser também diretamente deduzida das Equações 3.1 e 3.4.

Como a temperatura do gás pode ser calculada com base nos dados dos termopares 1 e 3, a velocidade pode ser obtida tanto com os dados do termopar 1 quanto com os dados do termopar 3. Desse modo, chega-se a duas equações para a velocidade. Uma envolvendo a temperatura do gás e do termopar 1:

$$v_1 = \left[\frac{\dot{T}_1 D_1^{2-m} c_3^{-1}}{T_g - T_1} - \frac{c_2 c_3^{-1}}{D_1^m} \right]^{1/m}, \quad (3.6)$$

e a outra envolvendo os dados do termopar 3:

$$v_3 = \left[\frac{\dot{T}_3 D_3^{2-m} c_3^{-1}}{T_g - T_3} - \frac{c_2 c_3^{-1}}{D_3^m} \right]^{1/m}. \quad (3.7)$$

Para se chegar a bons resultados usando as equações acima alguns procedimentos são necessários devido aos sérios problemas de condicionamento que surgem na solução dessas equações. As expressões para a velocidade acima podem ser calculadas em cada ponto do conjunto de dados de termopares e, portanto, a velocidade instantânea pode ser obtida.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram usados termopares tipo K (cromel - alumel) de diâmetros de aprox. 76 e 127 μ m. A distância entre os termopares foi colocada em 7,0 mm, bem acima da chama, nos gases produzidos pela combustão. A altura do primeiro termopar foi de aprox. 500mm em relação ao bocal interno do queimador. A frequência de amostragem foi colocada em 200 Hz para os dados típicos de temperatura mostrados a seguir. Para as curvas mostradas na Figura 4.1 há 1000 pontos de temperatura versus tempo. Esses dados são as respostas diretas de temperaturas de dois termopares de diâmetros diferentes após uma filtragem digital dos sinais de temperatura. O objetivo da filtragem digital era de eliminar ruídos de alta frequência contidos nos sinais e suavizar as curvas para serem utilizadas pelos métodos.

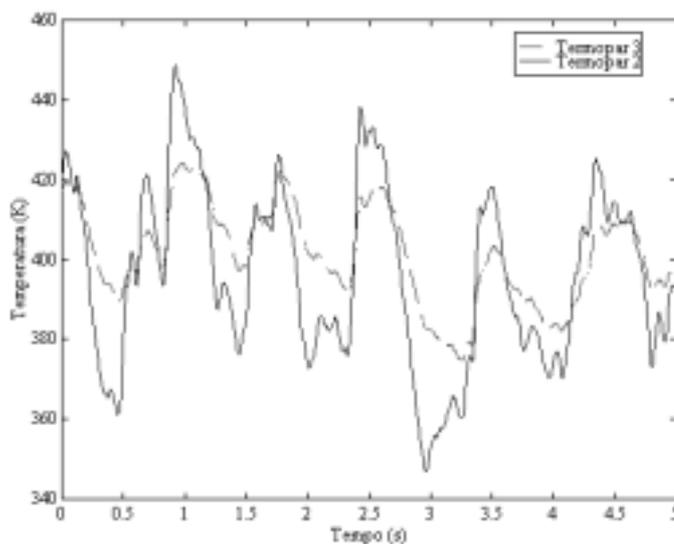


Figura 4.1 - Temperaturas de dois termopares sem ruídos

A temperatura do termopar 2 foi usada para calcular a temperatura T_1 que ocupou, inicialmente, a mesma posição do termopar 3. As derivadas das temperaturas T_1 e T_3 foram calculadas através do esquema de diferenças centradas, ou seja, a derivada em um ponto do conjunto de dados é a diferença entre a temperatura no ponto seguinte e no ponto anterior dividida pelo espaço de tempo correspondente ($2\Delta t$, Δt = taxa de amostragem). Com todos esses valores foram calculados os coeficientes α , β e γ , da Equação 3.5 e obtida a velocidade do gás.

Como não foi possível conseguir um bom instrumento para obter a velocidade instantânea dos gases de combustão, uma comparação foi feita entre as três equações para a velocidade relacionadas na seção 3 (Equações 3.5, 3.6 e 3.7). A velocidade foi obtida em diferentes alturas acima da chama. Nas figuras seguintes são mostradas as comparações dos resultados da três equações em uma altura de 405 mm acima do bocal do queimador.

Na Tabela 4.1, também é mostrada uma comparação entre as Equações 3.5, 3.6 e 3.7 da velocidade média e RMS (“Root Mean Square”) de flutuações de velocidade (V_g') nas várias alturas. Nota-se, que os resultados das Equações 3.5, 3.6 e 3.7 dão valores muito próximos entre si e com relação à velocidade média obtida das correlações (técnica CCV) do trabalho de Motevalli et al. (1992). Nota-se, na Tabela 4.1, que as velocidades médias do gás e as flutuações diminuem a medida que os gases se afastam da chama e são misturados com o ar aquiescente.

Tabela 4.1 - Velocidades médias e flutuações em diferentes alturas

Altura (mm)	Correlação	Eq. 3.5	Eq. 3.6	Eq. 3.7	
360	1,2	1,21	1,01	0,97	\bar{V}_g (m/s)
	-	0,56	0,55	0,55	$\text{RMS}(V_g')$
490	1,2	0,91	0,72	0,79	\bar{V}_g (m/s)
	-	0,47	0,45	0,44	$\text{RMS}(V_g')$
600	0,6	0,51	0,34	0,32	\bar{V}_g (m/s)
	-	0,24	0,15	0,15	$\text{RMS}(V_g')$
790	0,6	0,45	0,39	0,36	\bar{V}_g (m/s)
	-	0,25	0,23	0,24	$\text{RMS}(V_g')$

Nas Figuras 4.2 e 4.3 estão as comparações dos resultados das Equações 3.5, 3.6 e 3.7 numa altura de 405 mm acima do bocal do queimador. Há uma boa concordância nos resultados, as flutuações não são exageradas ou muito baixas e as velocidades médias são próximas da velocidade média das correlações, conforme a Tabela 4.1. Para obter estes resultados alguns procedimentos foram necessários devido ao mal condicionamento das respectivas equações.

Nas Equações 3.5, 3.6 e 3.7, em alguns pontos do conjunto de dados, os resultados para a velocidade divergiam bastante, ou seja, resultavam em valores absolutos muito grandes. Por causa destes pontos o gráfico da velocidade mostrava picos tipo funções delta e escondia os valores mais realistas de velocidade. Como havia poucos pontos onde isto acontecia, estes pontos poderiam ser simplesmente descartados mas, em vez disso, algumas considerações foram implementadas. Para dar uma ideia de continuidade, a velocidade nestes pontos foi colocada igual a velocidade no ponto anterior quando os valores ultrapassavam aprox. 3 vezes a velocidade média das correlações. Além disso, uma filtragem dos resultados foi necessária para eliminar as variações muito rápidas na velocidade, eliminar essas tendências de divergência e também para uma melhor visualização dos resultados.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 estão as PDFs (“Probability Density Functions”) de velocidade do gás, calculada pela Equação 3.6, as quais mostram comportamentos semelhantes às PDFs de temperatura do gás. A medida que os gases se distanciam da chama os picos das PDFs aumentam e tornam-se mais estreitas. As velocidades médias, correspondentes praticamente aos máximos das PDFs, diminuem. As flutuações de velocidade também diminuem e por isto os picos tornam-se mais estreitos implicando em uma maior concentração de valores de velocidade em torno da média.

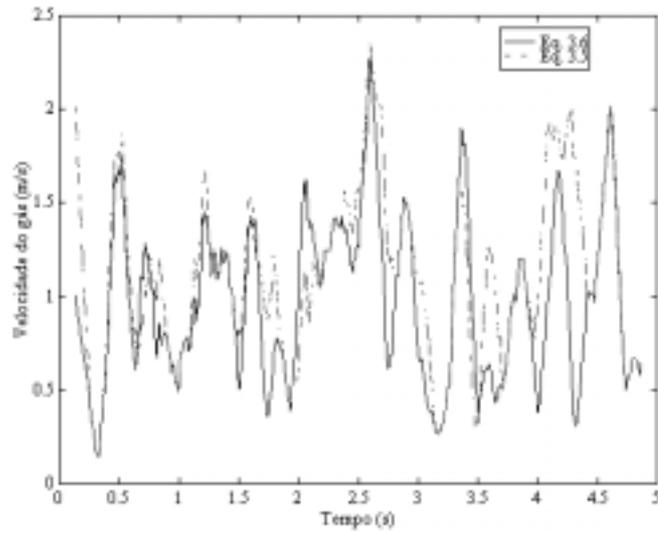


Figura 4.2 - Velocidade das Equações 3.5 e 3.6 - $L = 405$ mm

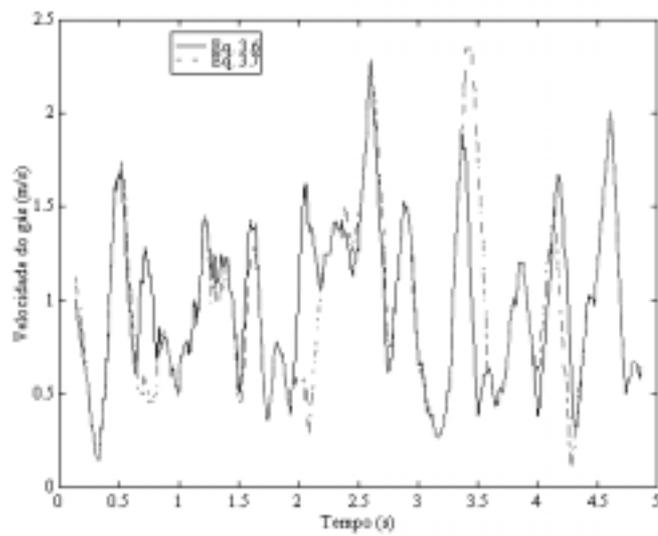


Figura 4.3 - Velocidade das Equações 3.6 e 3.7 - $L = 405$ mm.

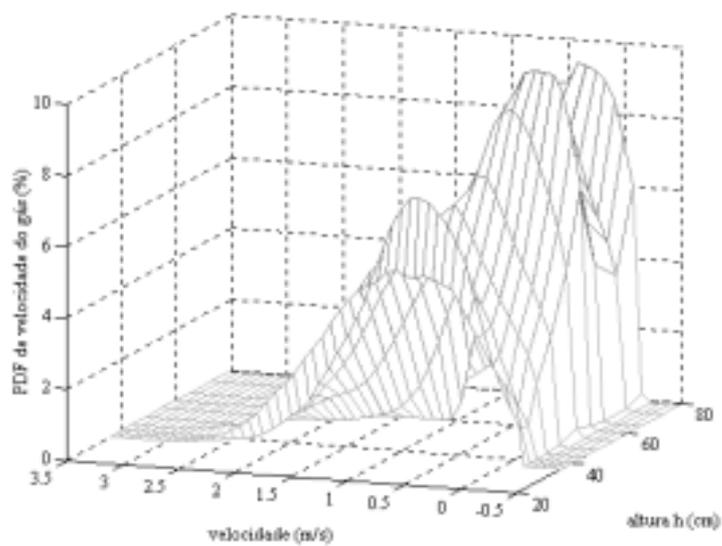


Figura 4.4 - PDFs de velocidade do gás em várias alturas

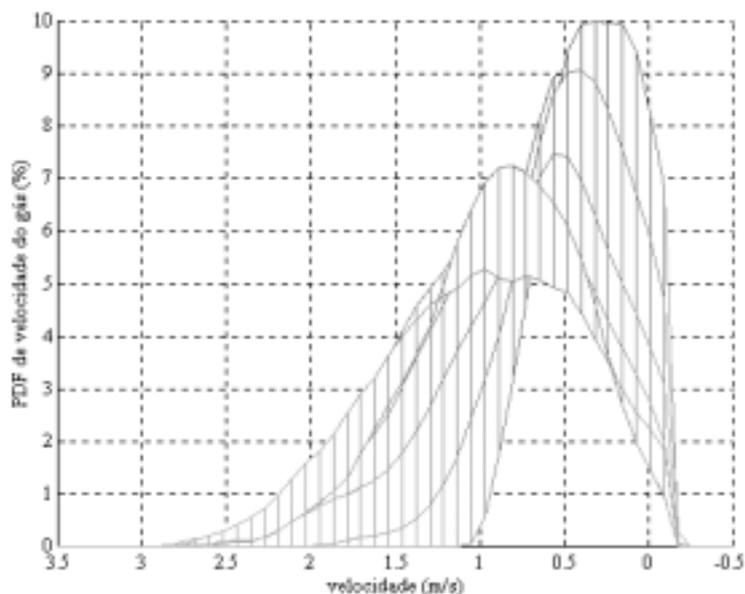


Figura 4.5 - Projeção das PDFs da Figura 4.4.

Estes comportamentos mostrados pelas PDFs de velocidade, similares as de temperatura do gás, são bem realistas, pois a medida que os pacotes de gases se afastam da chama eles vão diminuindo a temperatura e a velocidade. Isto mostra que a velocidade calculada pela Equação 3.6, e também pelas Equações 3.5 e 3.7, as quais dão valores bem próximos, estão dentro da realidade.

5. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho consistiu na obtenção da velocidade instantânea do escoamento apenas com base nos sinais de termopares. Os resultados mostrados anteriormente indicam que este objetivo foi alcançado. Apesar dos problemas de condicionamento das Equações 3.5, 3.6 e 3.7, os resultados obtidos foram satisfatórios com os procedimentos adotados, os quais consistiram nas limitações dos pontos de divergências e nas filtragens das soluções para a velocidade. Os resultados da temperatura e da velocidade dos gases de combustão apresentaram comportamentos esperados como mostrados pelas PDFs e, portanto, mostrando que são realistas.

Embora não se possa saber com certeza se as velocidades obtidas estão com uma boa exatidão, pelos menos pode-se dizer que os resultados estão dentro do esperado. Os resultados mostrados pelas figuras e pelas PDFs indicam que a velocidade média está compatível com o estudo de outros autores e que as flutuações de velocidade não são exageradas ou muito baixas. Isto mostra que, se os resultados não estão com uma boa exatidão, pelo menos eles estão dentro de limites esperados e portanto são resultados satisfatórios.

As temperaturas compensadas obtidas através de termopares são bem fundamentadas e largamente comprovadas, até mesmo com técnicas lasers, como pode ser visto nas referências bibliográficas. Se essas temperaturas compensadas se ajustam bem com os resultados das técnicas laser, até mesmo com erros razoáveis nas constantes de tempo, e se não houve praticamente nenhuma hipótese comprometedor para obtenção da velocidade, pode-se dizer que os resultados obtidos são muito bons, não só da temperatura como também

da velocidade, uma vez que as flutuações de temperatura e de velocidade estão diretamente relacionadas, de acordo com o estudo de alguns autores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boutrif, M.S. & Thelliez, M., 1995, Détermination de la température d'un écoulement en utilisant la technique expérimentale de deux couples thermoélectriques - application à l'écoulement des gaz d'échappement d'un moteur, **Revue Générale de Thermique**, vol. 34, n. 400-401, pp. 263-271.
- Chandran, S.B.S. et al., 1985, Time resolved thermometry by simultaneous thermocouple and Rayleigh scattering measurements in a turbulent flame, **Combustion Science and Technology**, vol. 44, pp. 47-60.
- Cox, G., 1977, Gas velocity measurement in fires by the cross-correlation of random thermal fluctuations - a comparison with conventional techniques, **Combustion and Flame**, vol. 28, pp. 155-163.
- Incropera, F.P. & de Witt, D.P., 1990, **Introduction to Heat Transfer**, 2.ed., John Wiley & Sons, Singapore.
- Lückerath, R. et al., 1995, Comparison of coherent anti-Stokes Raman-scattering thermometry with thermocouple measurements and model predictions in both natural-gas and coal-dust flames, **Applied Optics**, vol. 34, n. 18, pp. 3303-3312.
- Motevalli, V., Marks, C. H. and McCaffrey, B. J., 1992, Cross-correlation velocimetry for measurement of velocity and temperature profiles in low-speed, turbulent, nonisothermal flows, **ASME Journal of Heat Transfer**, vol. 114, pp. 331-337.
- Omega Technology Company, 1992, **The temperature handbook**, vol. 28, Stamford.
- Paranthoën, P. & Lecordier, J.C., 1996, Mesures de température dans les écoulements turbulents, **Revue Générale de Thermique**, vol. 35, pp. 283-308.
- Reis, A.M., 1999, **Desenvolvimento de técnica de medição de temperatura e velocidade com termopares em escoamentos turbulentos de baixa frequência**, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Tagawa, M. & Ohta, Y., 1997, Two thermocouple probe for fluctuating temperature measurement in combustion - rational estimation of mean and fluctuating time constants, **Combustion and Flame**, vol. 109, pp.549-560.

MEASUREMENTS OF VELOCITY FLUCTUATIONS IN TURBULENT FLOWS BY USING THERMOCOUPLE DATA

Abstract. *This work is related to the development of a new experimental technique to measure the mean and fluctuating components of velocity in turbulent flows through the use of thermocouples. This technique was based on the comparison of the differential equations of two thermocouples close to each other along the gas flow. This comparison yields one equation to the velocity in the direction of the flow. This velocity comes from the time constant of thermocouples and can be calculated in each instant only with the thermocouple data. This technique was tested in a combustion gas flow produced by a pre-mixed LPG-air turbulent flame, and shown realistic results when compared to the velocity obtained from the time constant equation related to each thermocouple.*

Keywords: *Thermocouple, Time constant, Velocity, Combustion gas.*