

Anemometria Laser^(*)

D. F. G. DURÃO e J. C. F. PEREIRA

Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Rovisco Pais — 1096 Lisboa Codex

Anemómetros Laser são sistemas ópticos, não intrusivos, para a medição da velocidade dos escoamentos de fluidos líquidos ou gasosos. Estes instrumentos de medida devem a sua existência à invenção do Laser nos anos sessenta. Tentativas anteriores para medição da velocidade de fluidos por métodos ópticos foram realizadas; contudo só depois do aparecimento da luz Laser com suas propriedades únicas de coerência espacial e temporal, foi possível projectar e realizar um anemómetro óptico. Hoje em dia muitos dos equipamentos de anemometria Laser são comercializados mas não vai longe o tempo em que os investigadores de mecânica dos fluidos tinham que desenvolver o seu próprio equipamento. A sua aplicação constitui uma ferramenta de trabalho extremamente útil na investigação da Mecânica dos Fluidos. Neste trabalho será apresentada uma breve introdução à técnica de Anemometria Laser.

1. Introdução

A utilização de sondas para medir pressões estáticas e totais foi e continua a ser um meio para a determinação de velocidades médias. A termo-anemometria, também chamada anemometria de fio quente, veio permitir não só a determinação daquelas, mas também o conhecimento do valor instantâneo da velocidade. Apesar destas técnicas terem fornecido informação relevante para a Mecânica de Fluidos, a sua aplicação tem sido limitada a escoamentos com propriedades constantes, relativamente baixas velocidades, temperatura ambiente e fora de regiões de recirculação. Assim as limitações de ambos os processos conduziram ao aparecimento e desenvolvimento de uma técnica óptica: a Anemometria Laser. A primeira aplicação desta técnica é devida a Yeh e Cummins (1964) e foi depois generalizada a escoamentos em que a utilização de pontas de prova não é viável; por exemplo, chamas e escoamentos isotérmicos, escoamentos de pequenas dimensões ou ainda em ambientes corrosivos. Trata-se de uma técnica não intrusiva sendo também aplicável a todos os escoamentos onde as duas técnicas anteriormente mencionadas podem ser usadas.

2. Princípio de funcionamento

2.1. Descrição sumária

O princípio de funcionamento baseia-se no desvio de frequência que um feixe de luz sofre quando se provoca a sua difracção por um meio em movimento. Quando uma partícula móvel passa por um feixe de luz de intensidade e características bem definidas (Laser) provoca a difracção da luz alterando a sua frequência. Teoricamente se houvesse um instrumento que pudesse com a elevada precisão necessária medir a frequência da luz difractada, nada mais seria necessário para a determinação da velocidade das partículas suspensas no fluido em movimento. Devido à inexistência de tal instrumento desenvolveram-se sistemas ópticos para pôr em evidência o desvio de frequência. Tal foi conseguido de várias maneiras que originam diferentes configurações do anemómetro Laser. É de realçar que a velocidade medida é a das partículas em suspensão no escoamento, pelo que há que garantir que ela

(*) Apresentado nas Jornadas da Divisão de Óptica da SPF (Porto, Dezembro 1985), mas não incluído na colectânea Laser Portugal—25 anos depois (Gaz. Fis. 9, Jan. e Abr. 1986).

coincida instantaneamente com a do fluido. O arranjo óptico usualmente e historicamente mais utilizado é representado na figura 1, e foi

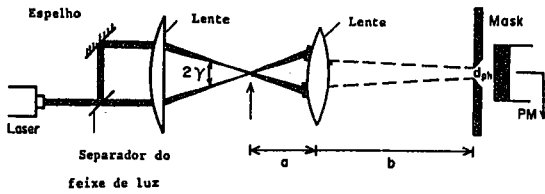


Fig. 1 — Anemômetro convencional.

convencionalmente chamado de duplo feixe ou método das franjas (dual beam or fringe mode). Este sistema (figura 1) usa uma lente para fazer intersecar dois feixes de luz igualmente intensos e coerentes. A intersecção dos dois feixes, que acabam por ser radiações electromagnéticas, forma um volume de controlo, que é a região de interferência entre as duas ondas electromagnéticas. Assim se forma um campo electromagnético que vai somar-se numa faixa e anular-se noutras de modo a formar franjas alternadamente iluminadas e escuras, como representado na figura 2.

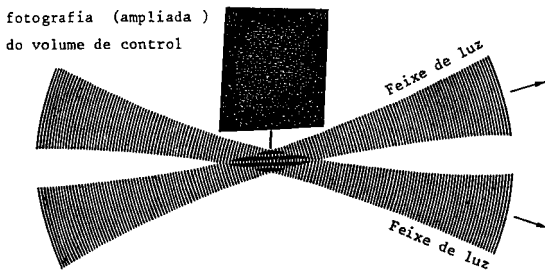


Fig. 2 — Volume de controlo.

Se uma partícula suspensa no fluido atravessa o volume de controlo constituído por essas franjas, passará sucessivamente por zonas iluminadas e escuras, apenas difundindo luz nas zonas iluminadas, causando uma variação periódica da intensidade da luz difractada pela partícula. A luz difractada é então colectada por um detector e apresenta uma variação de amplitude ao longo do tempo, isto é uma frequência; esta frequência resultante é a frequência Doppler. Posteriormente e para efeitos de

leitura o sinal óptico é convertido numa diferença de potencial eléctrico através de um fotomultiplicador.

A equação relacionando a frequência do sinal (frequência Doppler), ν_D , com a velocidade instantânea, U é dada por:

$$\nu_D = (\nu_0/c) U \sin \gamma$$

com $\lambda = c/\nu_0$ igual ao comprimento de onda da luz Laser usada, e γ metade do ângulo formado pela intersecção dos dois raios (ver figura 1).

SISTEMA ÓPTICO

O sistema de LDA representado na figura 1 não resolve o sentido da velocidade. Esta ambiguidade que pode existir nos escoamentos com recirculação ou de alta intensidade de turbulência pode ser ultrapassada incorporando dispositivos que provoquem uma variação de frequência da luz. Fazendo intersecar dois feixes com diferentes frequências transforma-se o sistema estático de franjas apresentado na figura 1 num sistema móvel. Se o sistema de franjas estiver animado de uma velocidade de translação U_s , então obter-se-á um sinal no fotodetector correspondente a $U \pm U_s$, onde o sinal $+$ ou $-$ depende de U_s ter o mesmo sentido ou o sentido oposto em relação à velocidade instantânea U . O valor da frequência correspondente à velocidade instantânea U é dado por $\nu_D = \nu_{\text{medido}} \pm \nu_s$. A realização prática deste esquema pode ser obtida através da utilização de células óptico-acústicas, em que os princípios de Debye-Sears e o efeito de reflexão de Bragg constituem a base das células óptico-acústicas e envolvem interacções de som-luz que foram investigadas por exemplo por Durão e Whitelaw (1975). O mesmo poderá ser obtido através de discos de difracção. Assim as novas unidades ópticas são constituídas não só pelas lentes para obter o cruzamento dos dois feixes e para colectar a luz reflectida mas também por células de Bragg ou alternativamente por disco de difracção. A figura 4 mostra uma unidade óptica em que a diferença de frequência entre os dois feixes ou raios incidentes é conseguida através

da passagem dos feixes de luz por células de Bragg onde um cristal propaga ondas acústicas.

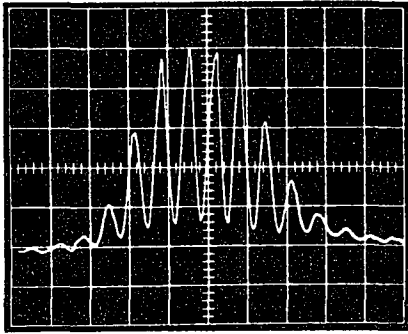


Fig. 3 — Sinal de saída do fotomultiplicador.

A informação da velocidade instantânea será assim obtida através do conhecimento da frequência ν_D do sinal. O sinal é modulado por uma distribuição Gaussiana como representado na figura 3, pois o raio laser tem na

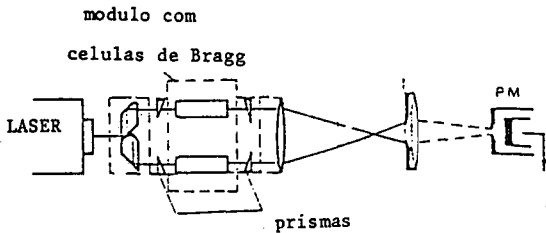


Fig. 4 — Anemómetro com unidade óptica incorporando células de Bragg.

direcção radial uma distribuição de luz Gaussiana. O valor da frequência ν_D é conhecido através de um processador de sinal.

Assim, basicamente, o sistema de anemometria laser que utiliza a frequência Doppler para medir a velocidade, denominado normalmente LDA (Laser Doppler Anemometry), é constituído por:

- Fonte (Laser)
- Sistema óptico
- Fotodetector
- Processador de sinal

2.2. Constituição de um sistema de LDA

FUNTE

A fonte produtora do feixe de luz será sempre um Laser. A escolha do Laser dependerá de vários factores. Os Lasers mais usados em aplicações de Mecânica dos Fluidos são o Laser de Hélio-Neon ($\lambda = 632.8$ nm, vermelho) e o Laser de Argon-ionizado ($\lambda = 514.5$ nm, verde). A potência do Laser varia de 5mW a 10Watt.

As unidades ópticas podem ser projectadas para em vez de colectar a luz a juzante do ponto de medida, como representado nas figuras 1 e 4, ela poder ser colectada a montante. Tal arranjo será conveniente para medidas em geometrias de grandes dimensões ou em condições difíceis de acesso óptico.

É possível medir simultaneamente duas ou três componentes do vector velocidade usando vários sistemas LDA que poderão estar integrados a partir de uma só fonte laser. A realização prática de tal anemómetro Laser é complexa devido à necessidade de identificação da luz

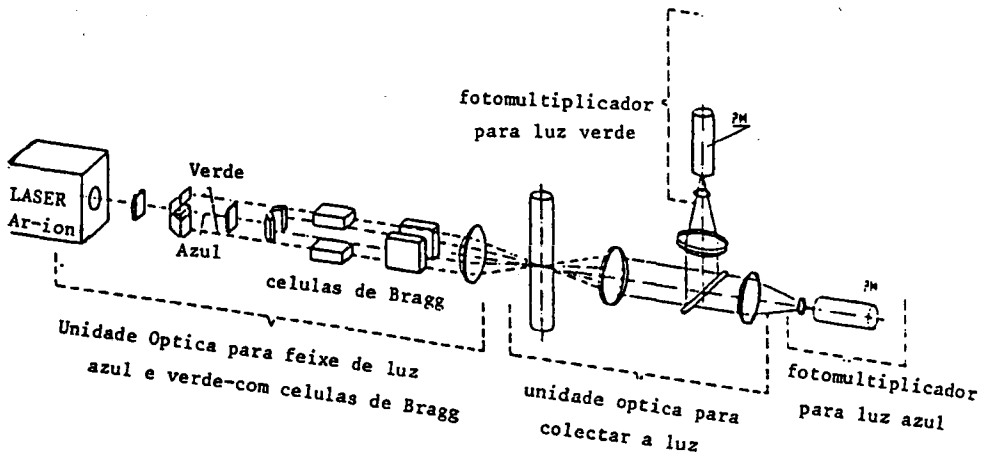


Fig. 5 — Anemómetro para medição simultânea de duas componentes do vector velocidade.

difundida pelas partículas para cada um dos conjuntos LDA. A figura 5 mostra um anemómetro Laser de duas cores (azul e verde) para a medição simultânea e instantânea de duas componentes do vector velocidade.

O recente desenvolvimento de fibras ópticas veio impulsionar a modificação da estrutura das unidades ópticas, possibilitando unidades compactas em que uma grande redução de volume pode ser conseguida. As fibras ópticas possibilitaram ainda a realização de sondas com 3 graus de liberdade espacial, como representado na figura 6.

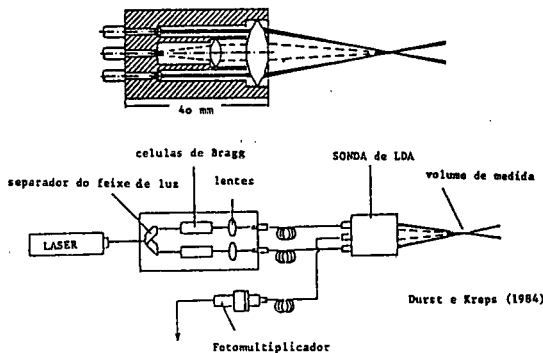


Fig. 6 — Anemómetro utilizando fibras ópticas.

FOTODETECTOR

Este constituinte do sistema LDA faz com que o fluxo de fotões do sinal óptico, recebido

do volume de controlo, origine um fluxo de electrões. O fotodetector usualmente utilizado é um fotomultiplicador.

PROCESSADOR

O sinal eléctrico que o fotomultiplicador fornece terá que ser processado para obter os valores instantâneos da velocidade (e daí as velocidades médias e as correlações das flutuações de velocidade). Diferentes tipos de instrumentos podem ser utilizados: analisadores de frequência; seguidores de frequência (frequency trackers); contadores de frequência, ver por exemplo Durão (1976); e registadores de fenómenos transitórios (transient recorders), ver por exemplo Durst e outros (1981). Estes aparelhos podem estar ligados a um sistema de aquisição de dados e controlados por um mini-computador.

3. Aplicações

A aplicação de LDA é corrente não só em centros de investigação universitária como em unidades fabris por todo o mundo. As suas aplicações são inúmeras indo desde medições do campo de velocidades no interior dos cilindros de motores reais, para optimização de disposição e geometria de válvulas, até medidas da velocidade do sangue em artérias do corpo

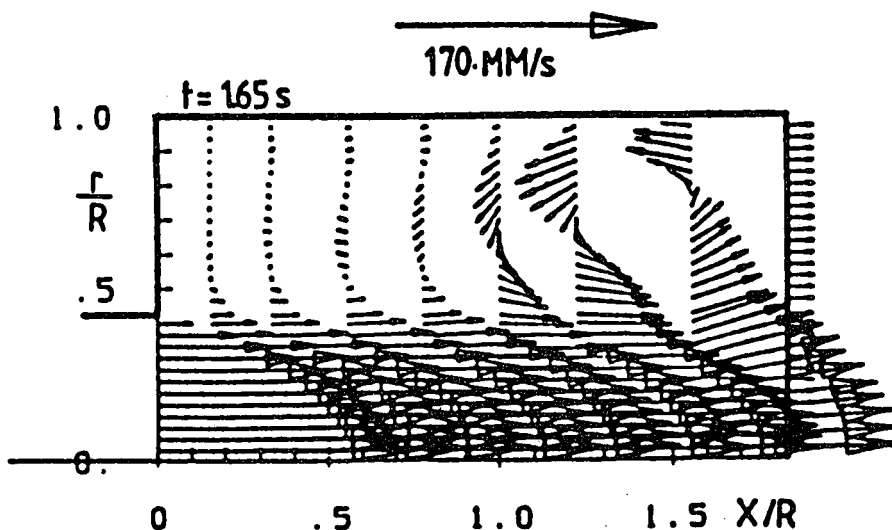


Fig. 7 — Escoamento num cilindro.

humano, ver por exemplo Go Tomonaga e outros (1983); podendo ser utilizado para medição de velocidades em escoamentos com duas fases ou ainda em escoamentos supersônicos para estudo das ondas de choque. Seguidamente dão-se, a título ilustrativo, três exemplos de medições de velocidade usando LDA em diferentes tipos de escoamento.

A figura 7 mostra vectores de velocidade num escoamento laminar não estacionário e com recirculação num tubo em que uma das paredes tem movimento não estacionário (êmbolo), Durst e Pereira (1985).

Na figura 8 está representado o campo de velocidades médias num escoamento turbulento em volta de um disco, Durão e Firmino (1983).

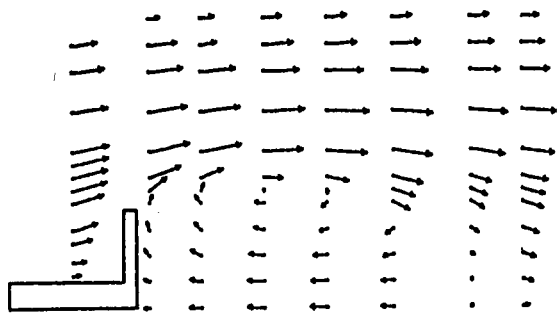


Fig. 8 — Escoamento em torno de um disco.

A figura 9 mostra os perfis de duas componentes do vector velocidade do escoamento numa turbina de gás com combustão, numa geometria real, Heitor e Whitelaw (1985).

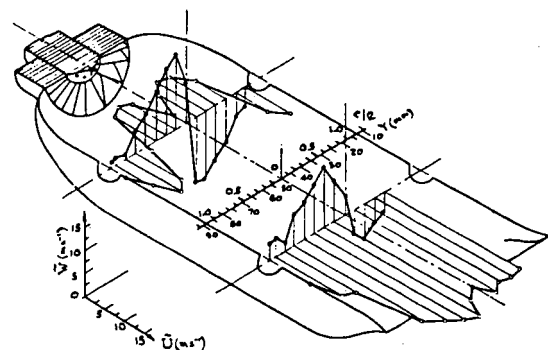


Fig. 9 — Escoamento numa turbina a gás.

4. O futuro de LDA

A técnica de LDA está em permanente desenvolvimento e o seu campo de utilização

em contínuo alargamento. A utilização de fibras ópticas em LDA simplificará o anemómetro, tornando o seu uso ainda mais simples e eficiente. A construção futura de sondas miniatura (parecidas com uma pequena lanterna de bolso) ligadas por fibras ópticas ao equipamento, tornará possível a medição das três componentes do vector velocidade em equipamentos industriais, possibilitando a caracterização precisa do campo das velocidades médias e turbulentas.

Em Portugal o factor mais restritivo ao uso e desenvolvimento de LDA é o seu custo, (o sistema LDA mais simples custa actualmente 3000 contos). Porém nas universidades portuguesas existem já centros utilizadores e difusores da técnica LDA, sendo ainda de realçar a realização sistemática em Lisboa de um importante Simpósio bi-anual sobre a aplicação de LDA à Mecânica dos Fluidos.

REFERÊNCIAS

- Y. YEH and H. Z. CUMMINS — Localized Fluid Flow Measurements with an He-Ne Laser Spectrometer, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 4, pp. 176-178, 1964.
- D. F. G. DURÃO and J. H. WHITELAW — The performance of acousto-optic cells for laser-Doppler anemometer, *J. Phys. E. Sci. Instrum.*, vol. 8, p. 776, 1975.
- D. F. G. DURÃO — The application of Laser Anemometry to free jets and flames with and without recirculation, Ph. D. Thesis, University of London, 1976.
- F. DURST, A. MELLING and J. H. WHITELAW — *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*, 2nd edition, Academic Press, 1981.
- GO TOMONAGA, F. NAJIYA, Y. OGASAWARA, K. MITO, K. TSUJIOKA, K. HIRONAGA, H. KANO and H. NISHIHARA — Analysis of Coronary Flow Dynamics by Laser Doppler, Proc. of the Osaka Symposium on Flow Measuring-Techniques, Osaka, Japan, 1983.
- F. DURST and J. C. F. PEREIRA — Piston-Drive, unsteady separation at a sudden expansion in a tube, submetido ao *Journal of Fluid Mechanics*.
- D. F. G. DURÃO and F. C. FIRMINO — Velocity field around a disk, Fourth Symposium on Turbulent Shear Flows, Karlsruhe, R. F. A., 1983.
- M. V. HEITOR and J. H. WHITELAW — Velocity temperature and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor, aceite para publicação em *Combustion and Flame*.