

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DE UM FLUIDO PELA ANÁLISE ESPECTRAL DAS FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA.



MICHEL JEAN FOUCRIER and ARTUR J. G. FAYA  
 Depto. Tecnologia de Reatores - IPEN  
 Div. Termodinâmica e Termohidráulica  
 Caixa Postal 11049 - São Paulo

RESUMO

As velocidades locais de um escoamento turbulento em canal fechado foram medidas aplicando-se a técnica de análise de ruídos para os sinais vindos de dois sensores de temperatura separados por uma distância conhecida. Bons resultados foram encontrados quando comparou-se os dados experimentais com medidas precisas. Faixas para o número de Reynolds, separação entre sensores e constante de tempo dos mesmos são recomendados.

INTRODUÇÃO

A análise de ruídos é reconhecida como uma poderosa ferramenta analítica com uma grande faixa de aplicações. O sinal de ruído produzido por detectores de nêutrons em um reator nuclear fornece informações sobre os modos de vibração dos internos, da dinâmica e da função transferência do reator, vida média do nêutron térmico, coeficiente global de transferência de calor entre o combustível e o refrigerante, etc. [1,2]. O tempo de resposta de sensores como termistores pode ser estimado através da análise de funções como a autocorrelação [3].

O propósito deste trabalho é aplicar a técnica de análise de ruídos para a medida de velocidade local em fluidos monofásicos em regime turbulento. Os sinais obtidos por sensores de temperatura são correlacionados no tempo e na frequência e a velocidade é estimada do diagrama fase versus frequência da densidade espectral de potência cruzada.

CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O arranjo experimental é mostrado na figura 1. Este consiste de uma tubulação de acrílico com 2500 mm de comprimento e 92 mm de diâmetro interno no qual o ar é conduzido por um ventilador axial em uma das extremidades. O ar é aquecido por uma resistência elétrica (22 ohms) com 8 mm de diâmetro externo concêntrica à tubulação.

A vazão de ar foi variada colocando-se uma restrição na entrada do ventilador. A máxima vazão de ar (sem restrição) foi de 0,042 m<sup>3</sup>/s a pressão ambiente e 21°C. O número de Reynolds nesta condição é da ordem de 33.000.

Dois níveis de potência foram usados para aquecer o ar: 550 W e 225 W.

Algumas perfurações foram feitas ao longo da tubulação para permitir o posicionamento dos dois sensores no fluxo de ar, de modo que a distância entre eles pudesse ser variada.

Medidas precisas necessitam de sensores com constante de tempo na faixa de milissegundos. É recomendável que os sensores de temperatura sejam do mesmo tipo e dimensões, mas não necessário. Neste trabalho foram usados termopares de 0,95 mm de junção exposta do tipo K, de 0,32 mm de junção exposta do tipo T e termoresistências de platina do tipo miniatura.

Em resumo, os quatro parâmetros abaixo foram variáveis para executar a análise: potência, número de Reynolds (Re), distância entre sensores e constante de tempo.

Sendo pequenas, as flutuações foram inicialmente amplificadas e então enviadas a um Analisador Dinâmico de Sinais HP-3562A o qual executou todos os cálculos necessários.

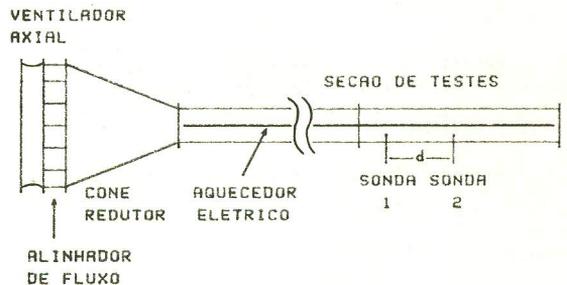


Figura 1. Arranjo Experimental.

TEORIA

Supondo que  $x(t)$  representa as flutuações de voltagem produzidas por um sensor e  $y(t)$  a segunda. Idealmente, para um regime plenamente desenvolvido, se as sondas estão separadas por uma distância  $d$ ,  $y(t)$  reproduz  $x(t)$  a menos de uma mudança na fase e na amplitude, isto é,

$$y(t) = ax(t-\tau), \quad (1)$$

onde  $\tau$  é o tempo de atraso entre os dois sinais dos sensores e pode ser obtido por

$$\tau = d/u(r), \quad (2)$$

com  $u(r)$  a velocidade local na posição radial  $r$  que se procura. Portanto se um método é disponível para estimar  $\tau$ ,  $u(r)$  pode ser facilmente calculado pois  $d$  é um parâmetro fixado experimental.

A equação (1) pode ser reescrita no domínio da frequência como

$$Y(f) = a \exp(-j2\pi f\tau) X(f) \quad (3)$$

ou

$$G(f) = Y(f)/X(f) = a \exp(-j2\pi f\tau) \quad (4)$$

onde  $G(f)$  é a função transferência que relaciona  $Y(f)$  a  $X(f)$ .

A função densidade espectral de potência  $S_{xx}(f)$  do sinal  $x(t)$  é relacionada à função auto-correlação  $R_{xx}(t)$ . Para sinais estacionários as duas funções são relacionadas pela transformada de Fourier,

$$S_{XX}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) dt \quad (5)$$

com

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau) dt \quad (6)$$

Similarmente, a função densidade espectral de potência cruzada  $S_{XY}(f)$  de um par de sinais aleatórios  $x(t)$  e  $y(t)$  pode ser relacionado à função correlação cruzada  $R_{XY}(\tau)$ ,

$$S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) dt \quad (7)$$

com

$$R_{XY}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau) dt \quad (8)$$

Pode-se mostrar que ao se aplicar um sinal aleatório  $x(t)$  com uma função densidade espectral de potência  $S_{XX}(f)$  na entrada de um sistema, a função densidade espectral de potência cruzada da entrada  $x(t)$  e da saída  $y(t)$  é dada por,

$$S_{XY}(f) = G(f) S_{XX}(f) \quad (9)$$

Entretanto, no experimento em questão, supõe-se que o primeiro sinal seja, por exemplo, ruído branco. Portanto,  $S_{XX}(f) = \text{constante} = C$ . Substituindo  $S_{XX}(f)$  e  $G(f)$  de (4), obtemos

$$S_{XY}(f) = a' \exp(-j2\pi f\tau) = a' \cos(2\pi f\tau) - a' j \sin(2\pi f\tau), \quad (10)$$

como a fase é definida por

$$\phi(f) = \arctan(\text{Im}|S_{XY}| / \text{Re}|S_{XY}|) = -2\pi f\tau, \quad (11)$$

obtem-se deste modo uma relação linear entre a fase e a frequência, cuja inclinação é  $\tau$ . Portanto, o tempo de atraso  $\tau$  pode ser obtido graficamente num diagrama fase versus frequência.

#### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As figuras 2, 3 e 4 apresentam os resultados experimentais na forma de dois diagramas: coerência média (abaixo de 10 Hz) e erro relativo em função do número de Reynolds, para o termopar tipo K a 550 W e 225 W e pa

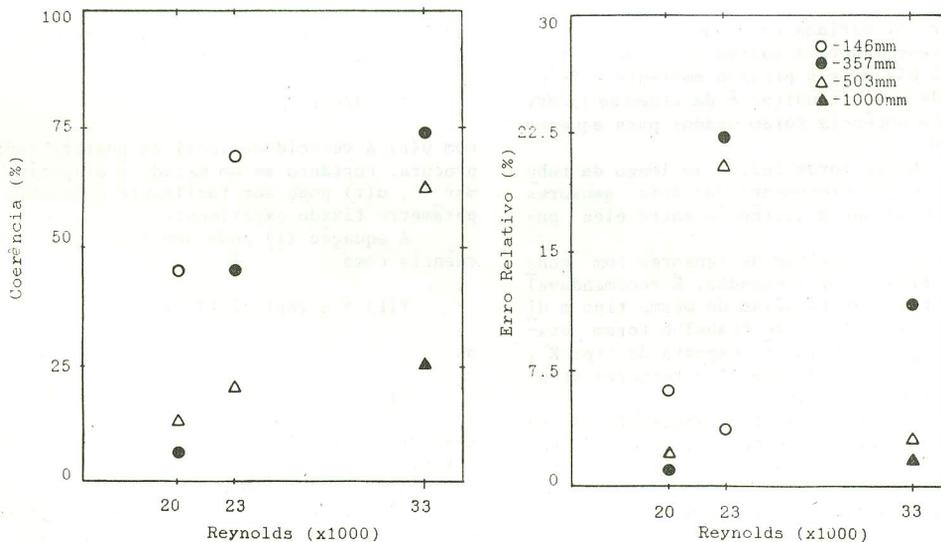


Figura 2. Termopar tipo K para 550W.

ra o termopar tipo T a 550 W. O erro relativo foi definido como sendo a diferença entre a velocidade local obtida pelo método proposto e a velocidade local medida com um tubo de PITOT calibrado associado a um manômetro com 0,1 mm H<sub>2</sub>O de precisão.

Para pequenos valores de Reynolds (<23.000) as flutuações de baixa frequência detectadas pelo primeiro sensor tendem a dispersar antes de alcançar o segundo sensor, produzindo baixos valores de coerência, isto é, sinais pouco correlacionados. Altos números de Reynolds e curtas distâncias entre sondas aumentam a coerência e diminuem o erro relativo fornecendo melhores estimativas para a velocidade local. Os resultados não mostraram dependência sensível para a potência utilizada.

A figura 5 apresenta os resultados em dois diagramas: a coerência média e o erro relativo em função da constante de tempo para a potência de 550 W.

Obtêm-se melhores resultados para valores pequenos de constante de tempo. Pequena constante de tempo significa uma faixa maior de frequência no sinal, portanto maior quantidade de informações para a análise.

A figura 6 mostra o desvio padrão da velocidade local obtida pelo diagrama de fase (média de três medidas) em função do Reynolds. A tendência dos desvios confirma os melhores resultados para altos Reynolds.

É importante notar que 70% dos dados coletados forneceram um erro relativo inferior a 10%.

#### CONCLUSÃO

A aplicação da técnica de análise de ruídos para a medida da velocidade local de um fluido com a componente flutuante da temperatura num escoamento em regime turbulento em tubulações foi de simples utilização e forneceu resultados satisfatórios quando comparados com medidas precisas. Para tanto recomenda-se altos Reynolds, distâncias pequenas entre sensores e pequenos valores de constante de tempo. No caso, Reynolds da ordem de 30.000, distâncias menores que 500 mm e constante de tempo da ordem de 100 ms.

Estudos futuros irão aplicar a mesma técnica em outros circuitos com água como fluido e altas pressões e temperaturas de operação.

É importante notar que o método pouco perturba o escoamento e portanto pode ser aplicado "on-line" numa planta onde existam sensores de temperatura e transferência de calor esteja ocorrendo.

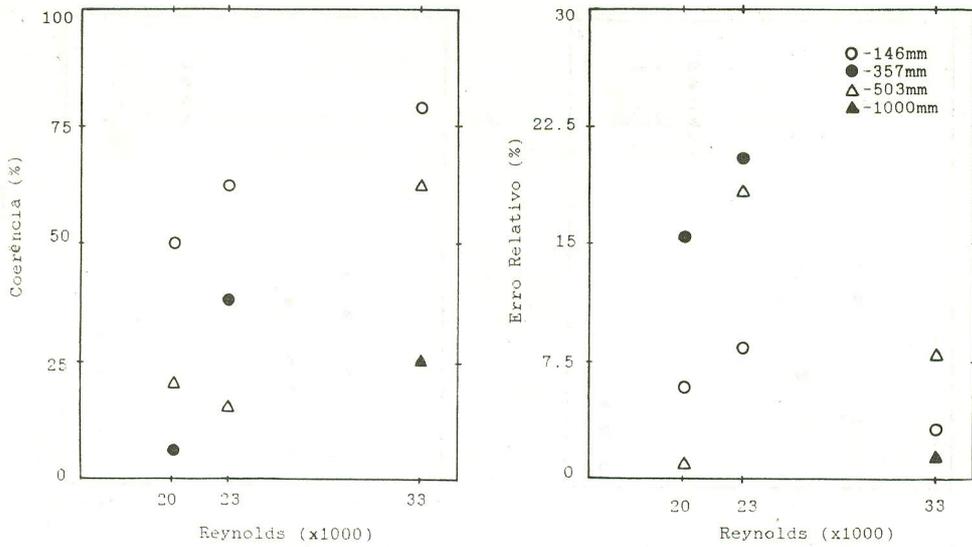


Figura 3. Termopar tipo K 225W.

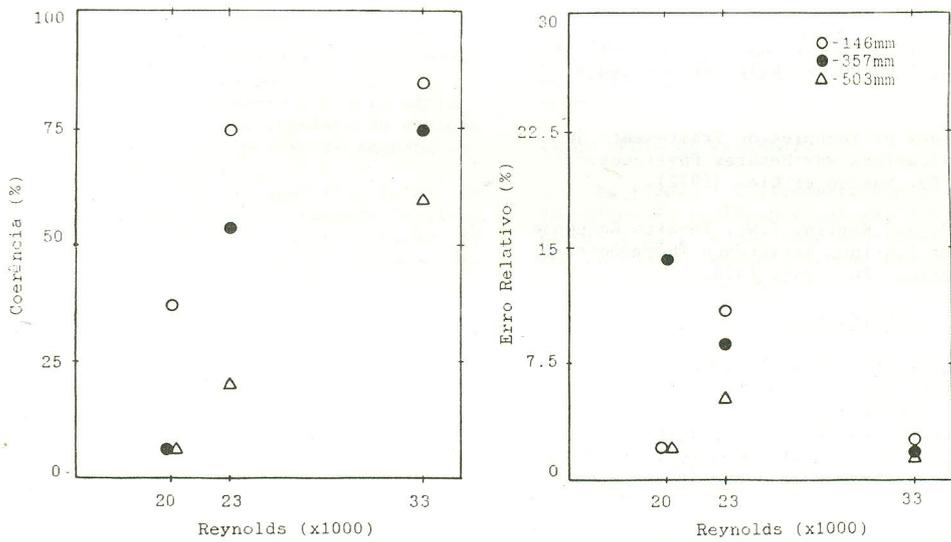


Figura 4. Termopar tipo T para 550W.

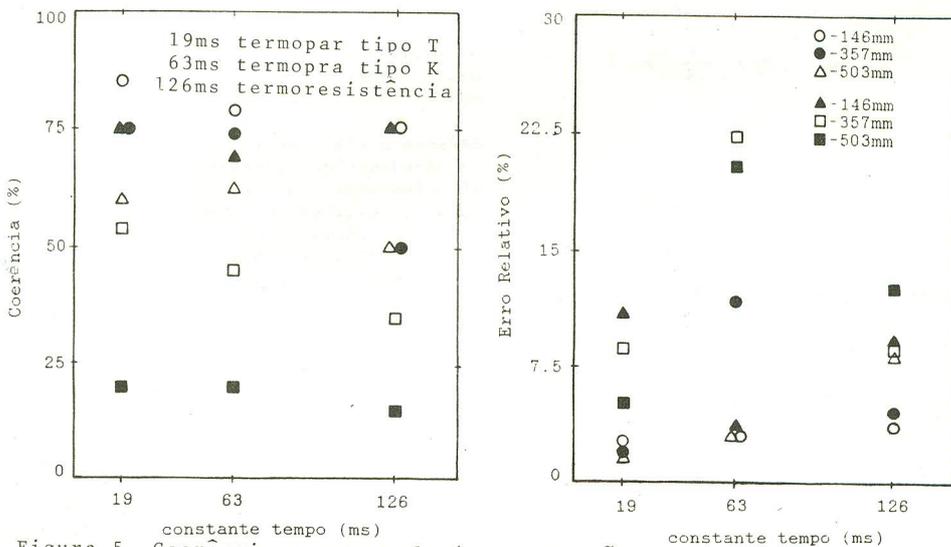


Figura 5. Coerência e erro relativo em função da constante de tempo

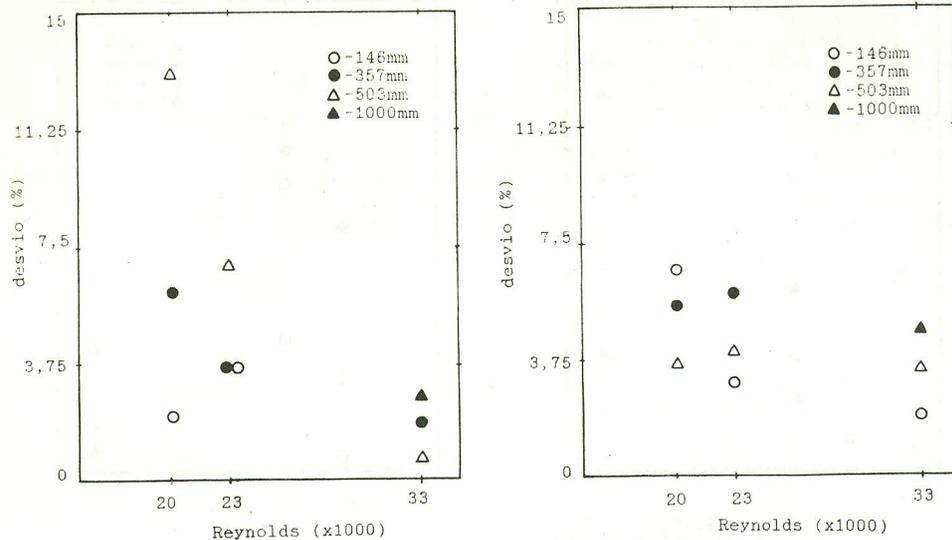


Figura 6. Desvio padrão em função do Reynolds.

REFERÊNCIAS

- [1] Bendat, J. and Piersol, A., Random Data: Analysis and Measurement Procedures. Wiley-Interscience (1986).
- [2] Max, J., Methodes et Technics de Traitement du Signal et Applications aus Mesures Physiques. Tome Premier, Ed. Masson et Cie. (1972).
- [3] Upadhyaya, B.R. and Kerlin, T.W., In-Situ Response Time Testing of Platinum Resistance Thermometers. EPRI NP-834, Volume 204, July 1978.

ABSTRACT

Local velocities of turbulent closed channel flow were measured applying the noise analysis technique to signals coming from two sensors separated by a known distance. Good agreement was found when comparing experimental data to more accurate measurements. Ranges of Reynolds number and thermocouple spacial separation are recommended.