

## MEDIDAS PONTUAIS DE VELOCIDADE

### INTRODUÇÃO

A medição de velocidades em escoamentos é importante tanto para o entendimento de processos físicos relacionados a dinâmica dos fluidos quanto para a determinação de quantidades necessárias em projetos e aplicações de engenharia. Além disso, com o atual avanço das técnicas computacionais de simulação, criou-se uma demanda adicional por experimentos de validação e verificação dessas simulações. De modo que as técnicas de medição em escoamentos continuam sendo muito importantes para o estudo de escoamentos.

Dentre as diversas técnicas existentes para a medição da velocidade do fluido pode-se encontrar dois principais grupos que se referem a medições localizadas (ou pontuais) e medições de campo. Nos métodos para medição pontual destacam-se o tubo de Pitot, a anemometria térmica e a anemometria por efeito Doppler. Já os casos de medição de campo envolvem as técnicas de velocimetria por imagem de partícula (PIV- do inglês *Particle Image Velocimetry*), rastreamento de partículas (PTV- do inglês *Particle Tracking Velocimetry*), dentre outras. Nesta aula serão abordados em detalhe o tubo de Pitot e a anemometria térmica.

### TUBO DE PITOT

A técnica mais comum utilizada para determinar a velocidade do fluido é através do tubo de Pitot. As principais razões para a sua ampla utilização se devem a simplicidade na operação do equipamento, na fabricação das sondas e no baixo custo do sistema. Além disso o tubo de Pitot pode ser utilizado em diversos fluidos e em diferentes faixas de velocidades que variam desde baixo regime subsônico até velocidades supersônicas. Com o uso de correções apropriadas pode-se obter medidas de velocidade com alta precisão. Contudo, a técnica também apresenta desvantagens dentre as quais pode-se citar a erro em baixas velocidades, a incapacidade de medição de escoamentos reversos e dificuldade de se obter resposta em alta frequência.

#### *Princípio de funcionamento*

O funcionamento do Pitot se baseia na conversão da energia cinética do escoamento em energia potencial. Essa conversão é feita utilizando as equações de conservação de quantidade de movimento, que podem ser resumidas a equação de Bernoulli para o caso de escoamentos estacionários e invíscidos.

$$\frac{dp}{\rho} + UdU = 0 \quad (1)$$

onde  $p$  é a pressão,  $\rho$  a densidade local do fluido e  $U$  a velocidade.

No caso de escoamentos incompressíveis a densidade local do fluido não apresenta variação e a equação 1 pode ser integrada facilmente, assumindo a forma abaixo:

$$p - p_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (2)$$

onde  $p$  é a pressão de estagnação (ou total) e  $p_0$  a pressão estática. A diferença entre a pressão total e a estática é conhecida como pressão dinâmica.

O termo do lado direito da equação 2 está relacionado a energia cinética do escoamento enquanto que os termos do lado esquerdo se referem a energia potencial. Para o cálculo da velocidade do escoamento é necessário que se conheça os termos de pressão da equação 2 e a densidade do fluido. Essa formulação é válida para escoamentos onde os efeitos de compressibilidade do fluido são desprezíveis ( $U < 0.2Ma$ ), onde  $Ma$  é o número de Mach que é dado pela equação abaixo:

$$Ma = \frac{U}{c}; \quad (3)$$

Vale lembrar que  $c$  é a velocidade do som ( $c = \sqrt{\gamma p / \rho}$ ) e  $\gamma$  a razão entre os calores específicos do fluido.

Quando os efeitos de compressibilidade do escoamento são importantes a relação entre a pressão e velocidade dada pela equação 2 não é mais válida. Nesses casos a densidade não pode ser considerada como constante na solução da equação 1. Em regimes subsônicos de gases ideais pode-se assumir o escoamento como isoentrópico de modo que a solução da equação 1 fica:

$$\frac{U^2}{2} + \left( \frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) (p - p_0)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = 0 \quad (4)$$

### Tipos de Pitot

Existem diferentes modos de se medir essas pressões e conseqüentemente diferentes configurações de Pitot. As principais configurações são mostradas na figura 1.

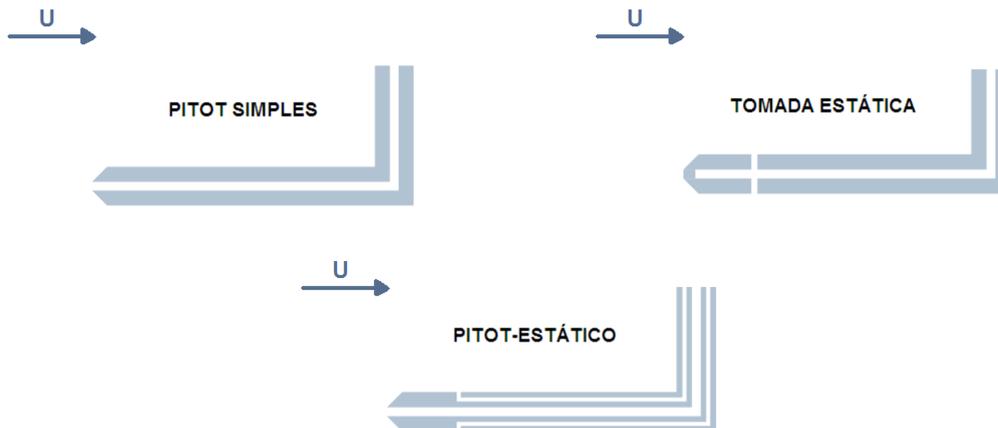


Figura 1: Principais configurações dos tubos de Pitot

O pitot simples serve para a medição da pressão de estagnação do escoamento. Esse tipo de pitot deve ser utilizado em conjunto com alguma tomada de pressão estática de referência, para que a pressão dinâmica possa ser determinada.

As tomadas estáticas devem ser sempre perpendiculares a direção do escoamento de modo a evitar que componentes da pressão de estagnação influenciem na medição da pressão estática. A configuração de tomada estática mostrada na figura 1 é utilizada para a medição em escoamento livre. No caso de escoamentos sobre superfícies, geralmente utiliza-se furos como tomadas de pressão estáticas. Nesses casos deve-se tomar cuidado para que a linha de eixo de cada furo fique sempre alinhada perpendicularmente com a superfície.

Para a medição conjunta das pressões total e estática, utiliza-se tubos de Pitot-estáticos. Essa é uma configuração bastante usada pois as medidas são feitas em um mesmo local. Deve-se atentar para o problema da utilização deste sensor em escoamentos próximos a superfície e em esteiras devido a influência desses fatores na medição da pressão estática.

A leitura da pressão dinâmica normalmente é feita diretamente utilizando-se manômetros de coluna, transdutores, microfones ou ainda qualquer outro equipamento que permita medir um diferencial de pressão. No entanto, vale lembrar que a precisão das medidas e o tempo de resposta na leitura dos dados é fortemente dependente do transdutor escolhido. Além disso, as linhas de transmissão de pressão também podem influenciar nas medições, principalmente nos casos onde se deseja observar as flutuações de pressão. Nesses casos é necessário estimar a função de transferência do sistema para corrigir as leituras. Existem métodos na literatura que foram desenvolvidos com esse propósito, entretanto a descrição e detalhamento de tais métodos foge do objetivo da aula. Para maiores detalhes ver: H. Bergh & H. Tijdeman, *Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems*. NLR-TR F.238, 1965.

O fato do tubo de Pitot utilizar a pressão de estagnação para a medição da velocidade o torna sensível a efeitos de geometria, viscosidade e inclinação em relação ao escoamento. Dependendo da geometria e do número de Reynolds a estagnação pode se formar dentro ou em frente a sonda causando uma variação na medição da pressão. Ao longo dos anos, várias configurações de sondas foram desenvolvidas para adequar a resposta do sensor a diferentes situações. Dentre as várias geometrias de sonda destacam-se a de ponta reta, a de ponta redonda, a de ponta achatada, a de ponta cônica e a tipo Kiel. A sensibilidade de algumas dessas sondas a variação do ângulo de incidência do escoamento pode ser observada na figura 2. A figura mostra que a sonda do tipo Kiel é a mais indicada para os casos onde pode ocorrer grandes variações do ângulo de incidência do escoamento.

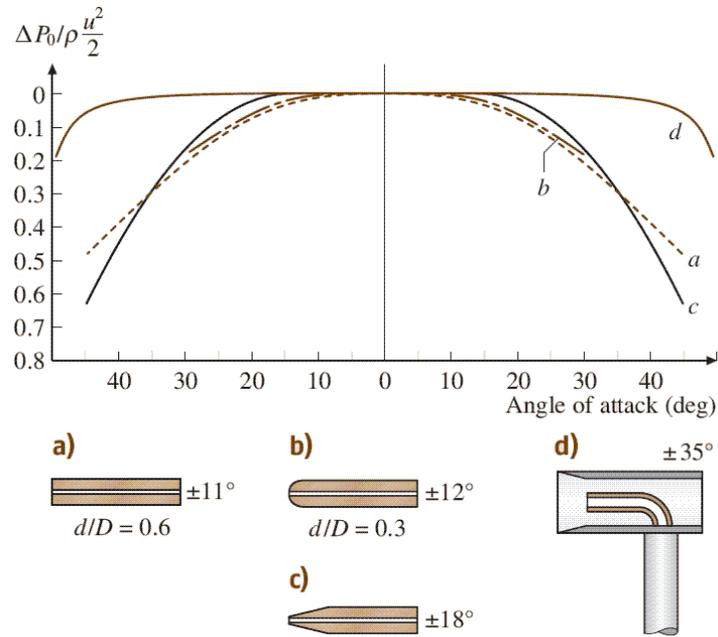


Figura 2: Sensibilidade dos tubos de Pitot à variações no ângulo de incidência do escoamento. **a)** sonda de ponta reta; **b)** sonda de ponta redonda; **c)** sonda cônica para escoamentos supersônicos e **d)** sonda do tipo Kiel. Extraído do *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Tropea, Yarin, Foss, 2007.

As sondas de ponta reta são as mais utilizadas em escoamentos subsônicos devido à facilidade de construção. Sondas de ponta redonda também são comuns pois oferecem uma pequena redução na sensibilidade ao ângulo de incidência e uma menor perturbação do escoamento quando comparadas com as sondas de ponta reta. Já as sondas achatadas, sejam elas de ponta redonda ou reta, são usadas em medições próximas à parede.

Os efeitos viscosos também podem induzir a erros nas medições, devido ao fato de a pressão e da velocidade serem relacionadas por uma equação de Bernoulli, que é essencialmente invíscida (isentrópica). Para velocidades muito baixas e consequentemente em números de Reynolds da sonda ( $Re_{sonda} = d_{sonda} * U_{local} / \nu$ ) também baixos os efeitos viscosos se tornam importantes de modo que a estagnação ocorre a montante do sensor. As correções para esses efeitos normalmente são feitas através de calibração, uma vez que não há uma formulação simples da equação de Bernoulli que inclua os efeitos viscosos. As curvas da figura 3 exemplificam algumas das curvas de correção do coeficiente de pressão de tubos de Pitot de acordo com o número de Reynolds.

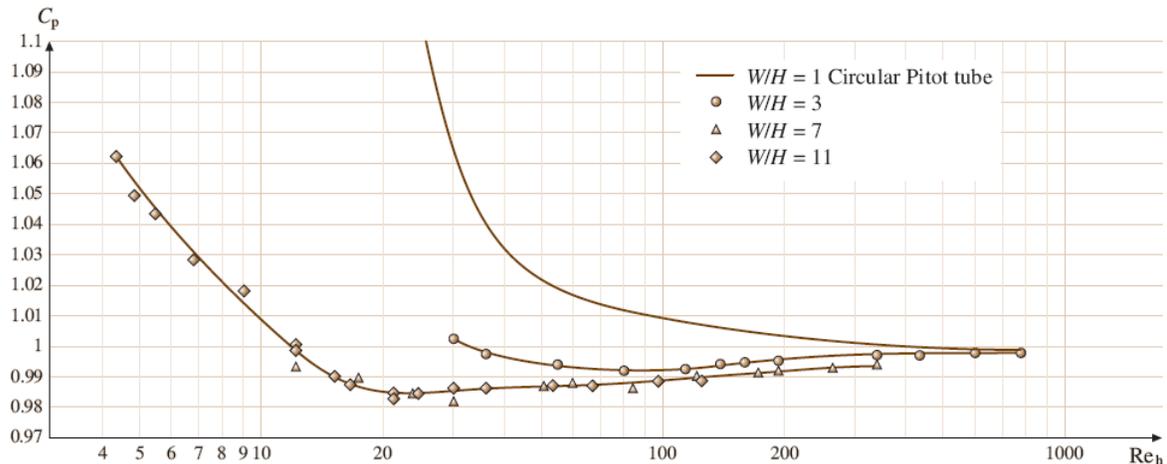


Figura 3: Variação do coeficiente de pressão de tubos de Pitot de acordo com o número de Reynolds. Extraído do *Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Tropea, Yarin, Foss, 2007*.

As curvas da figura 3b, tratam de sondas achatadas de seção quadrada e com diferentes razões entre a largura e altura. As correções para baixo número de Reynolds são especialmente importantes para esse tipo de sonda, pois elas são utilizadas em medições próximas a parede onde as velocidades do escoamento frequentemente são baixas.

A medição de velocidades em mais de uma direção com um tubo de Pitot pode ser realizada através de sondas multi-furo, que consistem basicamente de uma sonda com uma tomada central e várias tomadas radiais simetricamente distribuídas. Ao contrário do Pitot convencional as sondas multi-furo requerem uma calibração, que é feita utilizando escoamentos com ângulos conhecidos (normalmente rotaciona-se a sonda). Mesmo com a calibração, a maioria das sondas multi-furo não oferecem resultados precisos quando o ângulo de incidência do escoamento é maior do que 30° graus. Nesses casos é comum a ocorrência de separação do escoamento na ponta da sonda. O instrumento também apresenta alto erro na presença de elevada turbulência, caso esse que frequentemente ocorre em situações práticas. Por isso, o mais comum é a utilização de técnicas mais sofisticadas como anemometria a fio quente, laser doppler ou ainda PIV para a medição das componentes de velocidade do escoamento .

## ANEMOMETRIA TÉRMICA

A anemometria a fio quente é uma ferramenta atualmente utilizada na maioria dos estudos da turbulência em gases, apesar do princípio de funcionamento do sistema ter sido desenvolvido no início do século XX. Isso pode ser confirmado pela quantidade e qualidade dos resultados de investigações experimentais sobre escoamentos turbulentos disponíveis na literatura. A ampla utilização da técnica se deve a diversos fatores dentre os quais pode-se citar:

- O custo de um sistema de anemometria a fio quente ser relativamente baixo em comparação com um sistema de anemometria a laser.

- A frequência de resposta de um anemômetro moderno pode chegar a 500kHz, para algumas configurações, mas normalmente gira em torno de 50-100kHz para as configurações típicas. Esses valores estão bem acima daqueles observados nos sistemas de anemometria a laser, que atinge no máximo 20kHz.
- Medições de temperatura podem ser feitas simultaneamente à medição de velocidade utilizando sondas multi-sensores, que geralmente contêm um sensor operando no modo frio.
- A operação de um sistema a fio quente é relativamente simples em comparação com o sistema a laser.
- A análise de sinal em anemometria a fio quente é menos complexa devido à continuidade do sinal analógico de saída enquanto que no sistema a laser a resposta depende da passagem de partículas entre os feixes.

A principal desvantagem da anemometria a fio quente em relação ao método a laser se deve ao fato da técnica ser intrusiva, ou seja é necessário inserir uma sonda no escoamento o que pode causar perturbações indesejadas ao escoamento. Outra desvantagem em relação à anemometria a laser é que na anemometria térmica convencional não é possível extrair o sentido do escoamento.

#### *Princípio de funcionamento*

O princípio de funcionamento é baseado na transferência de calor por convecção forçada entre um filamento aquecido e o fluido escoando ao seu redor. A figura 4 mostra esquematicamente o arranjo do sensor no escoamento. A variação da resistividade elétrica do fio com a temperatura são reconhecidas por um circuito elétrico que transforma essa variação em um sinal elétrico.

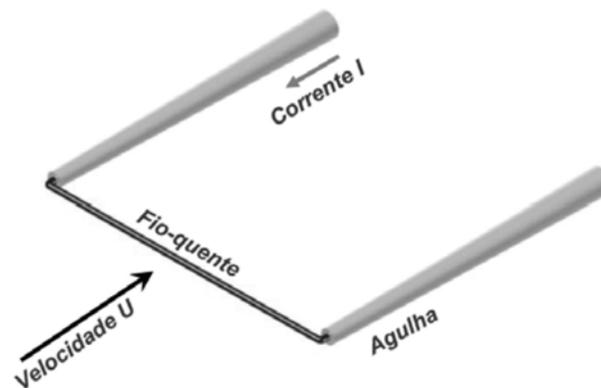


Figura 4: Desenho esquemático de uma sonda de fio quente. Extraído do livro *Turbulência vol. 5*, EPTT, Freire, Ilha, Colaço, 2006.

O calor introduzido no sensor por efeito Joule é dado por  $I_w^2 R_w$ , onde  $I_w$  é a corrente que passa pelo fio e  $R_w$  a sua resistência. Já a perda de calor por convecção forçada pode ser descrita de maneira simplificada por  $(T_w - T_a) \phi_{conv}(U)$ , onde  $T_w$  e  $T_a$  se referem respectivamente à temperatura do fio e do ambiente, e  $\phi_{conv}(U)$  é uma função que

representa o efeito de convecção forçada que depende da velocidade do escoamento  $U$ . Deprezando-se a perda de calor por condutividade nas extremidades do suporte do sensor e perdas por convecção natural, é possível fazer o balanço em regime permanente entre calor introduzido e dissipado no sensor conforme mostrado na equação 5.

$$R_w I_w^2 = (T_w - T_a) \phi_{conv}(U) \quad (5)$$

De acordo com Collis & Williams, J. Fluid Mech. 1959, os efeitos de convecção forçada prevalecem sobre os efeitos de convecção natural se a seguinte relação for satisfeita:

$$Re > Gr^{1/3} \quad (6)$$

onde  $Gr$  é o número de Grashoff ( $Gr = g\beta(T_w - T_a)d^3 / \nu^2$ ),  $g$  a gravidade,  $d$  o diâmetro do fio,  $\beta$  o coeficiente de expansão térmica a pressão constante e  $\nu$  a viscosidade.

Com a equação 5 é possível estimar a velocidade do escoamento  $U$  a partir das quantidades  $R_w$  e  $I_w$  caso elas possam ser relacionadas com  $T_w$  e a função  $\phi_{conv}$  seja conhecida. Para a maioria dos sensores existe uma relação entre a resistência do material e a temperatura que é dada pela equação 7. Essa relação é linear e pode ser descrita assumindo-se uma temperatura de referência ( $T_0$ ) e avaliando-se a resistência do material ( $R_0$ ) e seu coeficiente de variação de resistividade ( $\alpha_0$ ) em torno dessa temperatura.

$$\begin{aligned} R_w &= R_0 + R_0 \alpha_0 (T_w - T_0); \\ R_a &= R_0 + R_0 \alpha_0 (T_a - T_0); \end{aligned} \quad (7)$$

Para materiais metálicos o coeficiente de resistividade possui valores positivos enquanto que para termistores os coeficientes costumam ser negativos.

A partir das equações acima é possível estimar a temperatura do fio para uma dada resistência e vice versa. Isso permite que os anemômetros de fio quente possam ser utilizados também para medição de temperatura, no caso onde  $U$  é conhecido. A relação entre resistência/temperatura é importante pois dela dependem vários termos da equação de balanço de calor inclusive a potência que deve ser fornecida ao sensor. Normalmente, antes de operar um anemômetro de fio quente é necessário que se defina a resistência ou temperatura de trabalho do sensor. A relação entre as resistências do sensor na temperatura de trabalho ( $R_w$ ) e na temperatura de ambiente ( $R_a$ ) definem a razão de sobre aquecimento do sensor ( $OR$  do termo em inglês *Overheat Ratio*).

$$OR = \frac{R_w}{R_a} = 1 + \frac{R_0}{R_a} \alpha_0 (T_w - T_a) \quad (8)$$

Na prática utiliza-se valores de  $OR$  da ordem de 1.6 a 1.8 para sondas de tungstênio ou 1.3 a 1.5 para sondas de filme quente imersas em ar. Para sondas de diferentes materiais e/ou imersas em outros fluidos a razão de sobre aquecimento deve ser diferente. A regra geral para ajuste da resistência e temperatura do fio é escolher temperaturas elevadas o suficiente que permitam uma boa resposta do sensor a flutuações de velocidade do escoamento mas que não causem oxidação do fio, nem excessiva convecção natural e

nem vaporização do fluido. Existem algumas regras básicas para auxiliar nessa operação e esse assunto será discutido em detalhe mais adiante.

O balanço de calor proposto na equação 5 é válido para o regime permanente e estacionário. Na presença de flutuações de velocidade, como é o caso de escoamentos turbulentos, uma parcela de energia pode ser acumulada ou retirada do sensor, dependendo da flutuação. Assim a equação do balanço instantâneo de calor deve conter um termo adicional relacionado a inércia térmica do sensor, e que pode ser escrita conforme abaixo:

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = R_w I_w^2 - (T_w - T_a) \phi_{conv}(U) \quad (9)$$

onde  $m_w$  e  $c_w$  são respectivamente a massa e o calor específico do sensor.

A relação entre a transferência de calor do sensor e a potência ou voltagem no fio pode ser obtida através de diversas formulações propostas na literatura. Uma das mais conhecidas e utilizadas é aquela proposta por King no início do século XX e que pode ser escrita como:

$$Nu = A + B Re^{0.5} \quad (10)$$

onde  $Nu$  é o número de Nusselt ( $Nu = R_w I_w^2 / [\pi l k (T_w - T_a)]$ ), com  $l$  sendo o comprimento do fio,  $k$  a condutividade térmica do material, e  $Re$  o número de Reynolds baseado no diâmetro do sensor. Levando-se em consideração as perdas de calor por condução para os suportes do fio a lei de King pode ser reescrita na forma abaixo:

$$E^2 = A + B U^n \quad (11)$$

onde  $E$  é a tensão de saída do anemômetro,  $A$ ,  $B$  e  $n$  coeficientes obtidos através de calibração. De acordo com Perry (1982), Bruun (1995), Tropea et al (2007)<sup>1</sup> e muitos outros, o coeficiente  $n$  normalmente assume valores em torno de 0.5.

Pode-se encontrar trabalhos onde ajustes polinomiais foram utilizados para a calibração dos sistemas de anemometria. Frequentemente a precisão nesses ajustes é satisfatória, no entanto deve-se tomar cuidado para evitar a extrapolação de velocidades medidas fora da faixa utilizada na calibração. Isso porque no caso de ajustes polinomiais os valores fora da faixa de ajuste são imprevisíveis e podem em nada corresponder a realidade do escoamento. No caso da lei de King isso não ocorre pois utiliza-se uma equação de calibração baseada em relações teóricas.

### *Modos de operação*

Existem atualmente, três modos de operação dos sistemas de anemometria térmica, sendo eles:

- Corrente constante (CCA, do inglês *constant current anemometer*). Nessa configuração a corrente sobre o sensor ( $I_w$ ) é mantida constante. Assim, mudanças

<sup>1</sup> *Hot wire anemometry*, Perry 1982; *Hot wire anemometry: Principles and signal analysis*, Bruun, 1995; *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Tropea, Yarin, Foss, 2007

na velocidade causam alteração da resistência  $R_w$  do sensor e o sinal de saída do equipamento é uma medida direta dessa variação de resistência. Os primeiros equipamentos de anemometria térmica foram desenvolvidos com essa configuração.

- Temperatura constante (CTA, do inglês *constant temperature anemometer*). No anemômetro de temperatura constante a resistência  $R_w$  é mantida constante. Para isso se utiliza um circuito de realimentação que detecta as variações de resistência e efetua um ajuste da corrente  $I_w$  de modo a manter a temperatura e consequentemente a resistência do sensor constantes. Nesse caso o sinal de saída é uma medida relacionada a mudança de corrente imposta pelo circuito de realimentação.
- Voltagem constante (CVA, do inglês *constant voltage anemometer*). A voltagem dada por  $R_w I_w$  é mantida constante por um circuito de realimentação. Nessa configuração e o sinal de saída do equipamento é na verdade uma medida direta da variação da corrente  $I_w$ .

A principal diferença entre os 3 modos de operação está relacionada ao modo como a inércia térmica do sensor, dada pelo lado esquerdo da equação 9. Cada configuração possui uma maneira de compensar efeitos de atenuação do sinal devido a inércia do sensor e assim aumentar a frequência de resposta do sistema. No anemômetro de corrente constante a atenuação do sinal é compensada por um filtro de ganho crescente com a frequência. A figura 5 mostra o desenho esquemático do circuito nesse tipo de configuração. A compensação da atenuação não atua no sensor diretamente, de modo que quando o decaimento é alto a razão entre o sinal de interesse e o ruído (*signal to noise ratio* - SNR) do sistema fica comprometida. Para melhorar a SNR pode-se utilizar um arranjo com uma ponte de WheatStone, que é indicada na figura 5 por linhas tracejadas. Ainda assim, a frequência de resposta desses equipamentos não é muito elevada, sendo tipicamente na faixa de 1kHz.

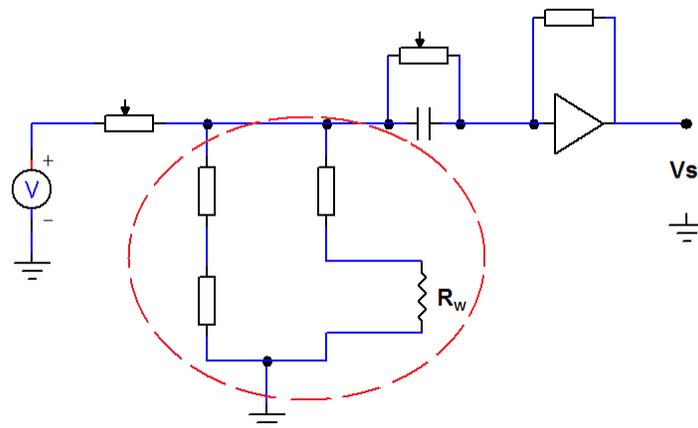


Figura 5: Desenho esquemático do circuito básico de um anemômetro a corrente constante (CCA).

O anemômetro a temperatura constante possui um arranjo com uma ponte de WheatStone realimentada por amplificadores, conforme mostrado na figura 6. O sensor  $R_w$  é colocado

em um dos braços da ponte. A diferença de tensão entre os dois lados da ponte fornece o sinal de entrada para os amplificadores que no estágio final recebem potência para realimentar a ponte. A relação entre as resistências nos dois lados da ponte definem a razão da ponte. Normalmente utiliza-se valores de 5:1, 10:1 ou 20:1, onde o lado correspondente ao sensor possui menor resistência. O valor da resistência de trabalho do sensor é ajustado pelo resistor variável diretamente oposto na ponte ao sensor.

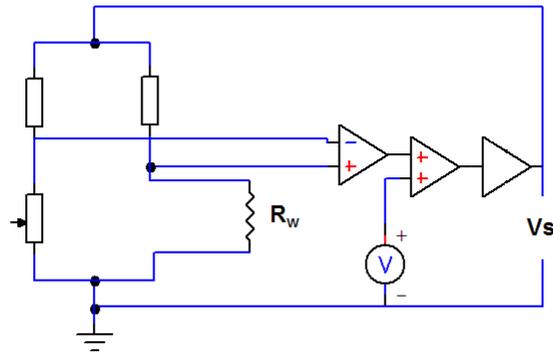


Figura 6: Desenho esquemático do circuito básico de um anemômetro a temperatura constante (CTA).

A configuração básica de um anemômetro a voltagem constante é mostrada na figura 7. Esse modo de operação foi desenvolvido em meados dos anos 90, sendo considerado ainda recente (ver G. R. Sarma, *Analysis of a constant voltage anemometer circuit*. IEEE 1993). Nesse circuito a voltagem sobre o sensor é independente da sua resistência, mas a mudança na resistência  $R_w$  gera uma alteração na corrente que flui sobre a realimentação do amplificador. A variação da corrente passa pela parte da realimentação localizada a direita do sensor e a variação da queda de tensão sobre esses resistores é observada na saída do equipamento. Com essa configuração e utilizando-se circuitos adicionais para a compensação da inércia do sensor é possível atingir frequências da ordem de 500kHz. Isso é extremamente importante no estudo de escoamentos de alta velocidade onde as flutuações turbulentas possuem frequências da ordem de centenas de kHz.

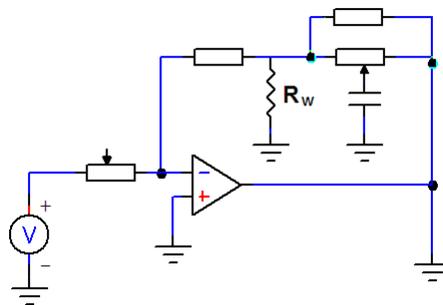


Figura 7: Desenho esquemático do circuito básico de um anemômetro a voltagem constante (CVA).

### *Tipo de Sensores*

Os elementos sensíveis usados na construção de sondas de anemometria podem ser tanto fios como filmes, dependendo da aplicação. Tipicamente, os fios possuem diâmetros da ordem de 0.5 a 5 $\mu\text{m}$  enquanto que filmes normalmente possuem espessura de 0.1 $\mu\text{m}$  e ficam depositados sobre cilindros de quartzo de 25 a 50 $\mu\text{m}$  de diâmetro. Os materiais utilizados na construção das sondas são principalmente tungstênio, platina e ligas de platina. As propriedades desses materiais podem ser encontradas em Bruun (1995).

As sondas que utilizam fios como elemento sensível apresentam maior razão entre sinal e ruído e uma melhor resposta em frequência do que filmes. No entanto sensores de fio são mais frágeis e sujeitos a contaminação. Além disso, elevadas tensões de cisalhamento do escoamento podem romper o sensor. Sendo assim, é mais comum a utilização de fios para investigações em escoamentos de gases, sem a presença de particulado e em regimes subsônicos. Os filmes são usados em investigações que envolvem escoamentos de líquidos, ou escoamentos supersônicos ou ainda escoamentos onde existe uma pequena concentração de particulado. Nesse último caso, deve-se considerar que dependendo da quantidade de movimento do particulado o sensor pode ser rompido.

Existem diversas configurações de sondas e algumas possuem múltiplos elementos para a medição de mais de uma componente de velocidade. A figura 8 mostra como exemplo alguns dos arranjos mais comuns.

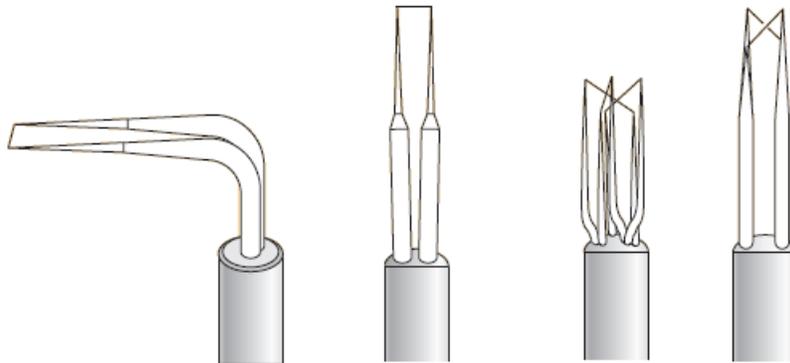


Figura 8: Arranjos de sondas de anemometria a fio quente. Da esquerda para a direita: sonda de camada limite, sonda reta, sonda 3D, sonda 2D tipo X.

Normalmente os elementos sensíveis não estão expostos ao escoamento em toda a extensão do filamento. Para se reduzir o efeito de perda de calor para o suporte, costuma-se isolar o sensor perto das extremidades. O isolamento não deve conferir baixa resistividade elétrica para que ele não participe da resposta do sensor.

### *Resposta Dinâmica*

Vários parâmetros podem influenciar a frequência de resposta dos sistemas de anemometria, dentre os quais destacam-se o tipo de sonda, o ganho e a razão de sobreaquecimento. Sendo assim, não existe um valor fixo pré determinado para o tempo

de resposta do equipamento que pode variar de acordo com o arranjo escolhido. O procedimento padrão para se avaliar o comportamento dinâmico dos sistemas consiste na introdução de um sinal do tipo degrau seguido da medição do tempo que o sistema demora para retornar para o regime estacionário. Este tipo de teste é conhecido como teste da onda quadrada. Cada modo de operação possui uma resposta para esse tipo de perturbação. A resposta típica de sistema operando no modo CTA é mostrada na figura 9 para sondas de fio e filme quente. O tempo de resposta do sistema pode ser avaliado conforme indicado na figura.

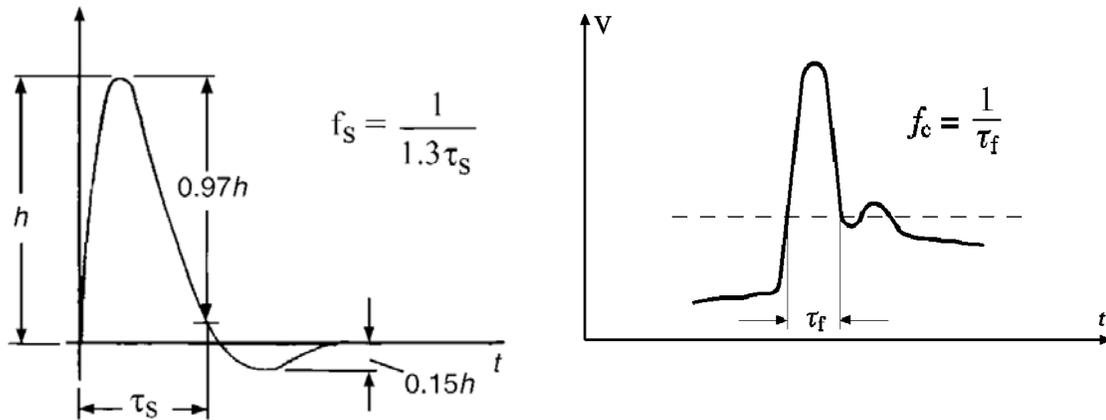


Figura 9: Resposta típica de um CTA a excitação do tipo onda quadrada. A figura da esquerda se refere ao caso com uma sonda de fio e a da direita uma sonda de filme. Extraído de *Hot wire anemometry: Principles and signal analysis*, Bruun, 1995.

### Procedimento de calibração

A calibração do sistema de anemometria é feita utilizando-se um medidor de velocidade de referência, de modo que os valores de tensão fornecidos pelo sistema possam ser ajustados por meio da lei de King (equação 11). O medidor de velocidade mais utilizado como referência é o tubo de Pitot.

A lei de King mostra que a relação entre tensão e velocidade é não linear. Sendo assim, é importante que durante a calibração as velocidades sejam compatíveis com essa relação afim de se evitar um baixo número de amostras em regiões de alta variação da resposta do anemômetro. A figura 10 mostra um exemplo de curva de calibração obtida para um CTA.

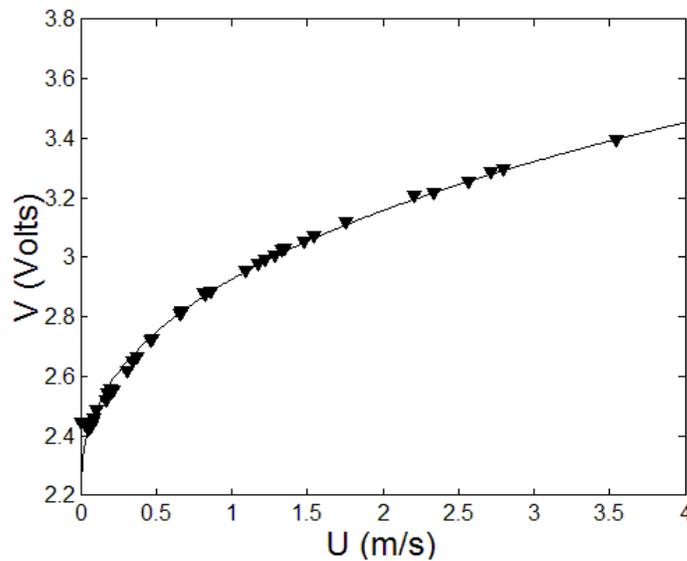


Figura 10: Curva de calibração de um anemômetro operando no modo CTA. Symbols correspondem aos pontos experimentais e a linha contínua a curva ajustada pela lei de King.

O valor do coeficiente  $n$  da lei de King é obtido através da avaliação do mínimo erro no ajuste dos dados, conforme mostrado na figura 11. De acordo com Bruun 1995 a equação

$$\text{erro}\% = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{amostras}}} \sum_1^{N_{\text{amostras}}} \left(1 - \frac{U_{\text{Ref}}}{U_{\text{HW}}}\right)^2},$$

onde  $U_{\text{ref}}$  é a velocidade do medidor de referência e  $U_{\text{HW}}$  a velocidade obtida substituindo-se a voltagem do anemômetro na equação de calibração.

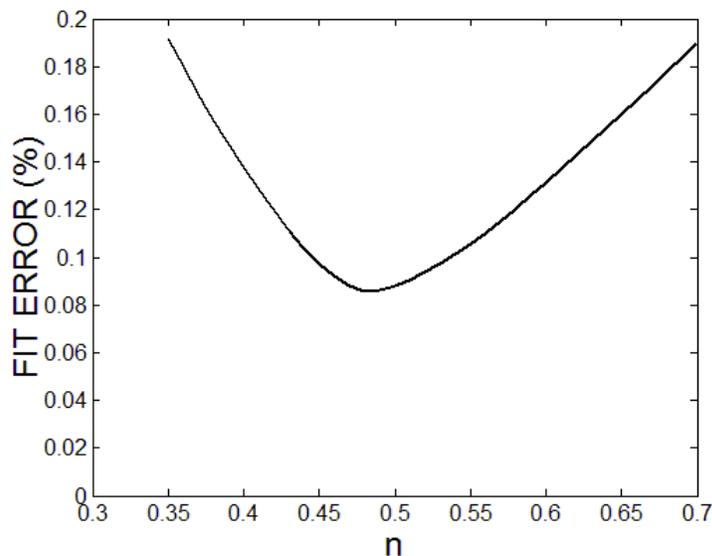


Figura 11: Variação do erro do ajuste de acordo com o coeficiente  $n$  da lei de King.

### Medição de mais uma componente de velocidade

A conversão dos valores de tensão de saída do anemometro em velocidade do escoamento é feita através da lei de King (equação 11) quando se utiliza sondas simples alinhadas perpendicularmente ao escoamento. Nos casos de sondas inclinadas ou de múltiplos sensores deve-se considerar o efeito de sensibilidade direcional da sonda. Como o anemometro trabalha com a convecção forçada no sensor, a transferência de calor do fio para o escoamento é maior quando a velocidade é perpendicular ao sensor de modo que sensibilidade a componente perpendicular ao fio também é maior. Logo, para estabelecer a influência do vetor de velocidades sobre a resposta do sensor é necessário estabelecer uma velocidade efetiva de resfriamento.

Para facilitar o entendimento do processo as equações serão demonstradas para o caso de uma sonda bidimensional. A figura 12 mostra a decomposição da velocidade  $U$  em componentes normal e tangencial de cada sensor. De acordo com *Al-Kayiem e Bruun (1991)* a velocidade efetiva para uma sonda bidimensional é dada por:

$$U_{eff} = \tilde{U}(\cos^2 \beta + k^2 \sin^2 \beta)^{1/2} = (U_{Normal}^2 + k^2 U_{Tangencial}^2)^{1/2} \quad (12)$$

onde o ângulo  $\beta$  e as componentes normais e tangenciais de cada fio estão indicados na figura 12. O parâmetro  $k$  é um coeficiente de sensibilidade do fio a componente tangencial. Tipicamente o valor desse coeficiente é menor do que 1, uma vez que a componente normal é a maior responsável pela transferência de calor.

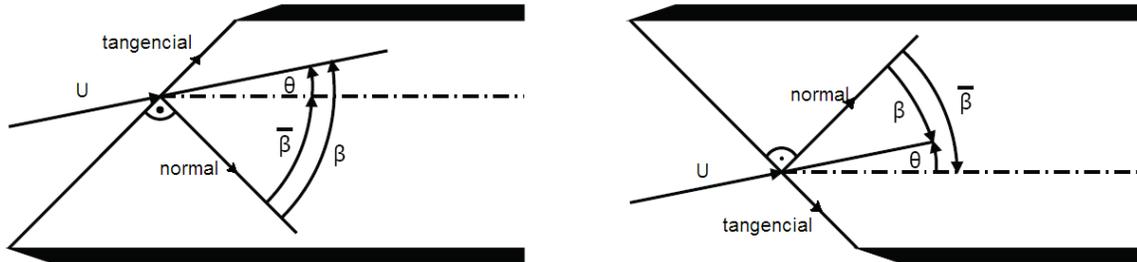


Figura 12: Desenho esquemático da decomposição do vetor velocidade em relação as coordenadas de uma sonda bidimensional.

A partir da velocidade efetiva é possível então utilizar a lei de King na calibração de cada sensor, para isso é necessário somente substituir a velocidade  $U$  da equação 11 pela velocidade efetiva  $U_{eff}$ . Na calibração de sondas multidirecionais deve-se efetuar a varredura de diferentes velocidades em diferentes ângulos de modo a se determinar o coeficiente  $k$ , além dos coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $n$ . Os valores de  $n$  e  $k$  são obtidos através da avaliação do mínimo erro dos ajustes.

A conversão dos valores de tensão de cada sensor para velocidade nas coordenadas do suporte da sonda é feita utilizando-se as relações propostas por *Bruun et al (1991)*<sup>2</sup>. Nessas equações somente termos de primeira ordem são considerados.

<sup>2</sup> Bruun et al. *Velocity calibration relationships for hot wire anemometry*. Journal of Physics E. , v21, 1991

$$U_{eff1} = \left( \frac{E_{Sensor1}^2 - A_1}{B_1} \right)^{1/n_1} / f(\bar{\beta}_1) \quad \text{e} \quad U_{eff2} = \left( \frac{E_{Sensor2}^2 - A_2}{B_2} \right)^{1/n_2} / f(\bar{\beta}_2) \quad (13)$$

onde  $f(\bar{\beta}) = (\cos^2 \bar{\beta} + k^2 \sin^2 \bar{\beta})^{1/2}$  e o ângulo  $\bar{\beta}$  corresponde ao ângulo de inclinação nominal do sensor. Para converter os valores de velocidade efetiva nas componentes de velocidade é necessário utilizar a equação abaixo:

$$U = \frac{U_{eff1} \cdot g_2(\bar{\beta}_2) + U_{eff2} \cdot g_1(\bar{\beta}_1)}{g(\bar{\beta}_1) + g(\bar{\beta}_2)} \quad \text{e} \quad V = \frac{U_{eff2} - U_{eff1}}{g(\bar{\beta}_1) + g(\bar{\beta}_2)} \quad (14)$$

onde  $g(\bar{\beta}) = \frac{(1-k^2)\cos^2 \bar{\beta}}{k^2 + (1-k^2)\cos^2 \bar{\beta}} = \tan^2 \bar{\beta}$ . Com isso o ângulo do escoamento é dado por:

$$\theta = \tan^{-1}(V/U) \quad (15)$$