

Capítulo 1

Anemometría de hilo caliente.

1.1. Introducción.

Como se ha visto anteriormente, la turbulencia es un fenómeno de gran importancia, dado que se da en la mayoría de los procesos en los que intervienen fluidos en movimiento, y su contribución al transporte de masa, calor y cantidad de movimiento, así como su influencia en la generación de pérdidas es muy significativa.

Debido al carácter fluctuante y casi caprichoso de dicho fenómeno, la aparición de técnicas experimentales capaces de responder rápidamente y con suficiente exactitud a los cambios en el seno fluido ha sido importantísima para poder abordar, o si quiera asomarnos, al estudio del mismo. Todo esto unido, claro está, al desarrollo de los ordenadores y de aplicaciones informáticas que han permitido el poder trabajar con el ingente número de datos que se derivan de los experimentos en turbulencia, que de otra forma hubieran sido imposible estudiar.

En turbulencia tres son los métodos experimentales más implantados, la anemometría de hilo caliente (HWA), la anemometría láser-doppler (LDA) y finalmente la velocimetría por imágenes de partículas (PIV) .

En la anemometría de hilo caliente (HWA) las medidas de velocidad están basadas en la transferencia de calor entre un sensor (hilo fino calentado eléctricamente) y el medio fluido que lo rodea. La cantidad de calor transferida está relacionada con la temperatura del hilo, las propiedades físicas y geométricas del mismo y con las características del fluido en movimiento y por su puesto su velocidad.

Por sus características este método es probablemente la herramienta más utilizada en estudios con aire o gas a bajas o moderadas intensidades turbulentas, ya que presenta las siguientes ventajas comparativas respecto a los otros métodos anteriormente citados.

1. Bajo coste en comparación con otras técnicas como LDA.
2. Buena respuesta en frecuencia. Así es fácil realizar medidas por encima de varios cientos de kilohercios, en contraste con las limitaciones que presenta la LDA a altas frecuencias.
3. El pequeño tamaño de la sonda. Permite obtener medidas de gran resolución espacial, sin distorsionar excesivamente al flujo fluido.
4. Se pueden obtener medidas de temperatura usando sondas multisensor.
5. Usando sondas con varios sensores se pueden realizar medidas de una, dos o tres componentes de la velocidad.
6. Exactitud, tanto la HWA como la LDA consiguen medidas con buena precisión, del orden de un 1 %.
7. Los sistemas de hilo caliente presentan menores niveles de ruido que el resto.
8. La salida del HWA es una señal continua analógica, por lo que pueden realizarse tanto análisis en el dominio temporal como en el de la frecuencia.
9. El uso de dos o más sondas separadas, permite obtener información sobre la correlación espacial y temporal de las fluctuaciones, así como obtener información sobre las distintas escalas temporales o espaciales que se desarrollan en el flujo.

Por otro lado, este método presenta ciertos inconvenientes que limitan su uso.

1. Debido a su fragilidad el hilo puede romperse frecuentemente, lo que lo hace inapropiado para medidas en entornos agresivos o con partículas en suspensión.
2. El HWA está restringido a intensidades turbulentas bajas, ya que a altas aparecen errores. Estos pueden ser debidos a simplificaciones en la ecuación que nos da la velocidad en función de la tensión de salida. Aunque también a que no es capaz de detectar inversiones en el sentido del movimiento del flujo, que pueden ocurrir a intensidades turbulentas altas.

3. Aunque la sonda es de pequeño tamaño crea una pequeña distorsión en la corriente fluida lo que da lugar a pequeños errores de poca consideración.
4. Dado que el HWA está basado en la transferencia de calor a través de la sonda, la oxidación o contaminación de la misma por deposición de partículas hacen que varíe su comportamiento y es necesaria una continuada calibración de la misma.

Dado que en los experimentos realizados en este trabajo, la intensidad turbulenta no excede del 25 % y que se ha trabajado con aire, el sistema HWA se considera la elección idónea.

1.2. Principios básicos de la anemometría de hilo caliente.

En la HWA la medidas de velocidad del fluido se basan en el fenómeno de transferencia de calor por convección desde el hilo-sonda hacia el fluido que lo rodea, dependiendo este calor de la velocidad del mismo. El principio básico se puede explicar de forma bastante simple.

La sonda o hilo, no es más que un brazo de un puente de Wheastone alimentado eléctricamente y controlado. Al estar el puente alimentado, la sonda será recorrida por una corriente eléctrica y disipará calor, por efecto Joule, hacia el medio que la rodea. De esta forma, si la sonda se encuentra en el seno de un fluido en movimiento, los cambios en las condiciones del flujo provocarán cambios en la transferencia de calor por convección y por tanto variará la temperatura del hilo. Esto provoca una variación en la resistencia del mismo y el consiguiente desequilibrio del puente. Los sensores (amperímetro o voltímetro) conectados al puente detectan este desequilibrio y el sistema de control actuará variando la tensión de alimentación del puente para volverlo a equilibrar, existiendo por tanto una relación entre la tensión y las condiciones del flujo.

Existen dos tipos de anemometría de hilo caliente, según la magnitud que se controle, la Anemometría a Corriente Constante (CCA) y la Anemometría a Temperatura Constante (CTA). En la CCA, se controla la intensidad que atraviesa a la sonda, mientras que en la CTA se controla la resistencia (temperatura) de la misma.

Puesto que en el presente trabajo se ha utilizado la anemometría a temperatura constante, con nos vamos a extender en la CCA. Sólo apuntamos, a modo de breve descripción (ver Figura 3.1), que a través de un amperímetro se controla la corriente que atraviesa a la sonda. Por otro lado el puente es constantemente equilibrado variando la resistencia del brazo enfrentado a la sonda, en el puente. La intensidad en la sonda se mantiene constante variando la resistencia R_s . De esta forma ante una variación en las condiciones del flujo se deberá equilibrar el puente (R_3) y se volverá a ajustar R_s para fijar la intensidad al valor de referencia ($I = cte$), lo que provocará un cambio en la tensión de alimentación del mismo. Calibrando para distintas velocidades se obtiene la relación tensión-velocidad. Como se puede apreciar este método es bastante engorroso.

En el siguiente apartado se describe la anemometría CTA, que ha sido el método empleado en este trabajo por ser, como se verá, menos engorroso.

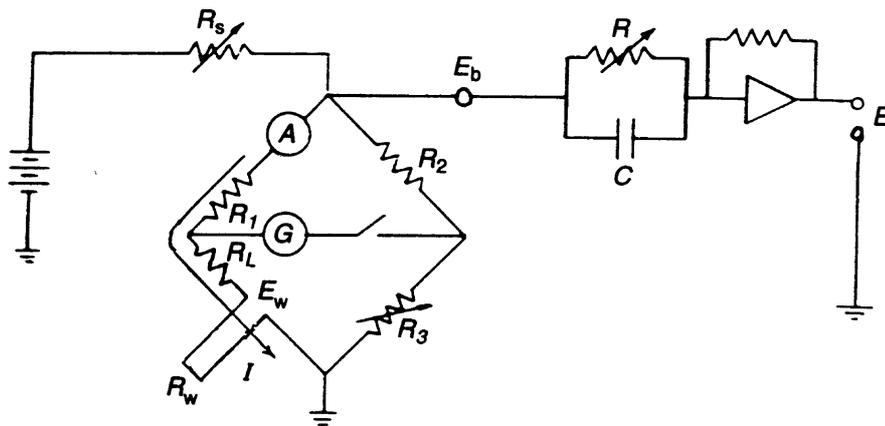


Figura 1.1: Esquema CCA

1.3. Anemometría de hilo caliente a temperatura constante.

El método basado en la CTA consta de dos partes básicas. Por un lado la sonda, consistente en un hilo conductor, normalmente de tungsteno, que forma un brazo

de un puente de Wheastone. La otra parte es el anemómetro de hilo caliente, que consiste en un circuito electrónico que incluirá al resto del puente y un amplificador operacional realimentado, que conectado al puente se encargará de equilibrarlo continuamente y nos dará el valor de salida de la tensión (alimentación del puente).

El proceso puede resumirse de forma esquemática como sigue:

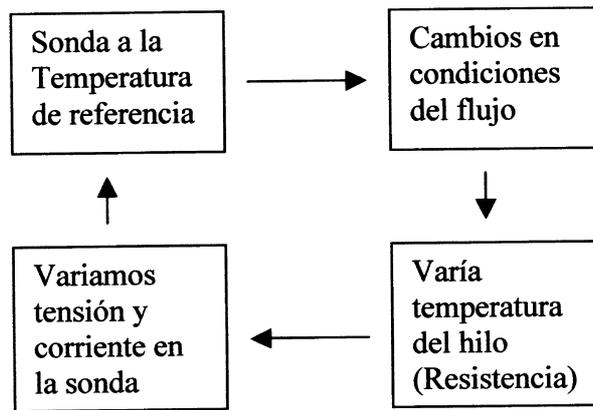


Figura 1.2:

En este caso la magnitud que se mantiene constante es la temperatura de la sonda, es decir su resistencia. Para ello el amplificador operacional alimentará el puente con distintas tensiones. En la figura 3.3 se muestra un esquema básico de un CTA.

Fijando R_3 , en cada instante el amplificador generará una tensión proporcional al error (tensión de desequilibrio), con la que se alimentará al puente de Wheastone. De esta forma, cuando por causa de una variación en las condiciones del flujo, la R_{sonda} varía y se desequilibra el puente, esta tensión de desequilibrio es detectada por el amplificador que actúa variando la tensión de alimentación del puente de Wheastone y por tanto la intensidad que atraviesa a la R_{sonda} , que vuelve por tanto a su valor original.

La tecnología electrónica actual, permite unos tiempos de respuesta muy rápidos, lo que hace de la CTA un método muy fiable para medir las fluctuaciones de la velocidad en la corriente fluida.

Comparando este método con la CCA, se muestra como menos engoroso, ya

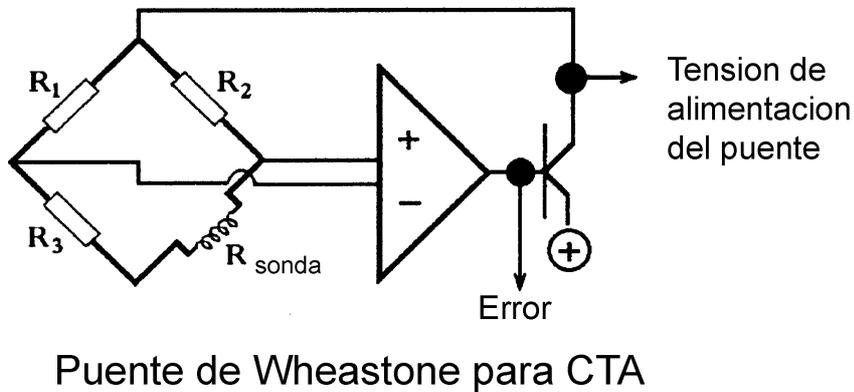


Figura 1.3: Esquema de CTA

que una vez fijado el valor de la resistencia de operación, este permanece casi invariable gracias a la propia electrónica del sistema. Mientras en la CCA, es necesario actuar constantemente sobre las resistencias de cara a equilibrar el puente. Es por esto que el método CTA es el más usado en anemometría y el elegido en nuestro trabajo.

1.4. Características de la sonda de hilo caliente.

En este apartado, se tratarán las características más importantes de las sondas de hilo caliente y cómo afectan a su funcionamiento, así como sus limitaciones.

1.4.1. Característica estática. Transferencia de calor estacionaria.

Se estudiará la forma en la que la sonda transfiere calor al fluido que la rodea, y cómo a partir del balance de energía, se puede llegar a una ecuación que ligue, la velocidad del fluido, con la intensidad de corriente que atraviesa al hilo. En este sentido, se establecerá un paralelismo entre la transferencia de calor en el hilo-sonda,

y la que existiría en un hilo de longitud infinita. Para ello se tendrán en cuenta, las pérdidas de calor por conducción hacia los soportes del hilo.

Partamos pues, del balance de energía en un elemento diferencial del hilo:

$$d\dot{Q}_e = d\dot{Q}_{fc} + d\dot{Q}_c + d\dot{Q}_r + d\dot{Q}_s, \quad (1.1)$$

donde $d\dot{Q}_e$ es la tasa de generación de calor por efecto Joule, $d\dot{Q}_{fc}$ es la transferencia de calor por convección forzada al fluido, $d\dot{Q}_c$ es el calor transferido por conducción, $d\dot{Q}_r$ el correspondiente a la radiación, y $d\dot{Q}_s$ la velocidad a la que el hilo almacena energía.

Cada uno de estos términos puede expresarse, en función de las ecuaciones que los modelan.

$$d\dot{Q}_e = I^2 R_w = \frac{I^2 \chi_w}{A_w} dx. \quad (1.2)$$

I es la intensidad que atraviesa el hilo, X_w su resistividad y A_w la sección.

$$d\dot{Q}_{fc} = h(T_w - T_a)\pi d dx, \quad (1.3)$$

$$d\dot{Q}_c = -K_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx. \quad (1.4)$$

Siendo h el coeficiente de película, d el diámetro del hilo, K_w la conductividad térmica del hilo y T_w su temperatura.

$$d\dot{Q}_r = \pi d(T_w^4 - T_s^4)\sigma\epsilon. \quad (1.5)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann, ϵ la emisividad del materia del hilo, y T_s la temperatura media de las superficies que interaccionan con él.

$$d\dot{Q}_s = \rho_w C_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx. \quad (1.6)$$

En esta ecuación ρ_w es la densidad del hilo y C_w su capacidad calorífica por unidad de masa.

Teniendo en cuenta, que el término correspondiente a la radiación es despreciable, se obtendrá, sin más que sustituir las ecuaciones (3.2) a (3.6) en (3.1), la expresión siguiente.

$$I^2 \frac{\chi_w}{A_w} = \pi dh(T_w - T_a) dx - K_w A_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} dx + \rho_w C_w A_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dx. \quad (1.7)$$

Veamos ahora como se puede simplificar esta ecuación, sin más que suponer que el hilo es infinito, y que la transferencia de calor es estacionaria (equilibrio). En este caso se anulan los términos de almacenamiento de energía y de transferencia por conducción, quedando la ecuación (3.7), de la forma siguiente

$$I^2 \frac{\chi_{w\infty}}{A_{w\infty}} = h(T_w - T_a) \pi d dx. \quad (1.8)$$

Integrándola para todo el hilo se obtendrá

$$I^2 R_{w\infty} = \pi h l (T_w - T_a) d. \quad (1.9)$$

Por otro lado, la resistividad del material que compone el hilo depende de la temperatura. Experimentalmente se ha obtenido, en diversos trabajos, que dicha dependencia toma la forma

$$\chi_w = \chi_0 [1 + \alpha_0 (T_w - T_0) + \beta_0 (T_w - T_0)^2], \quad (1.10)$$

auque para medidas de velocidad se considera suficientemente aproximada, esta ecuación más simple

$$\chi_w = \chi_0 [1 + \alpha_0 (T_w - T_0)]. \quad (1.11)$$

Puesto que la resistencia viene dada por $\int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{\chi_w}{A_w} dx$ se obtiene

$$R_w = R_0 [1 + \alpha_0 (T_w - T_0)], \quad (1.12)$$

$$\frac{R_w - R_0}{\alpha_0 R_0} = T_{w\infty} - T_0. \quad (1.13)$$

Ecuación que nos da la dependencia de la resistencia con la temperatura. Introduciendo esta ecuación en (3.9) y utilizando la correlación que proporciona el número de Nusselt, para convección forzada, en función de los números de Prandtl (P_r) y de Reynolds (R_e), se puede escribir

$$I^2 R_{w\infty} = \frac{\pi l k}{\alpha_0} \frac{R_{w\infty} - R_a}{R_0} (0,42 P_r^{0,2} + 0,57 P_r^{0,33} R_e^{0,5}). \quad (1.14)$$

Sabiendo que el número de Reynolds viene dado por $R_e = \frac{\rho U d}{\mu}$, se obtendrá la siguiente ecuación, que es una forma de la Ley de King (fig 3.4).

$$\frac{I^2 R_{w\infty}}{R_{w\infty} - R_a} = A + B U^{0,5} \quad (1.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{0,42 \pi l k}{\alpha_0 R_0} P_r^{0,2} \\ B = 0,57 \frac{\pi l k}{\alpha_0 R_0} P_r^{0,33} \left\{ \frac{\rho d}{\mu} \right\}^{0,5}. \end{array} \right.$$

Puesto que esta ecuación sólo es válida para un hilo infinito, habrá que realizar una corrección para el caso de la sonda de longitud finita. En la práctica, se emplean ecuaciones análogas

$$\frac{I^2 R_{w\infty}}{R_{w\infty} - R_a} = A + B U^n. \quad (1.16)$$

Los valores de A , B y n se obtienen experimentalmente a través de la calibración de la sonda, que se describe en el capítulo 4 de este trabajo.

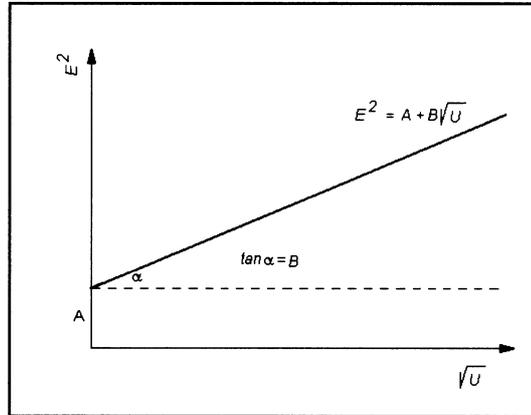


Figura 1.4: Ley de King

1.4.2. Característica dinámica. Frecuencia límite.

Cuando se producen cambios en la velocidad del fluido, el hilo no responde instantáneamente, debido a su inercia térmica. Esto supone un retraso a la hora de alcanzar un nuevo equilibrio. Por este motivo, la respuesta del hilo, por sí sola, es demasiado lenta para la mayoría de los estudios de turbulencia; existiendo una frecuencia límite, para la cual el hilo no es capaz de suministrar datos fidedignos. Es por esto, que se hace necesario un sistema basado en un amplificador realimentado, que permite incrementar la velocidad o frecuencia de respuesta por encima de 1000 veces.

Partiendo del balance de energía para una situación no estacionaria (transitorio entre dos estados de equilibrio) para un hilo de longitud infinita, se puede obtener una expresión para la frecuencia límite.

Añadiendo a la ley de King el término correspondiente al almacenamiento de energía tendremos

$$I^2 R_w = (R_{w\infty} - R_a)(A + BU^n) + m_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t}. \quad (1.17)$$

Derivando (3.12) respecto al tiempo y sustituyendo en (3.17) se obtendrá

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{1}{\alpha_0 R_0} \frac{\partial R_w}{\partial t}, \quad (1.18)$$

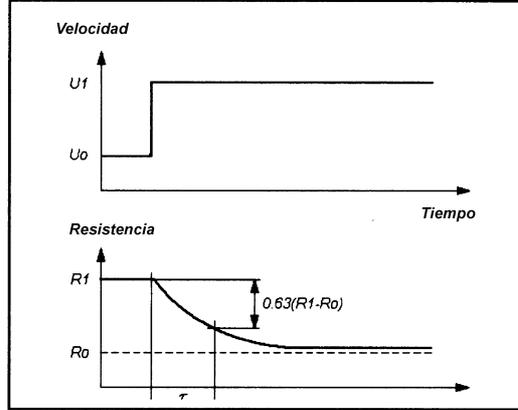


Figura 1.5:

$$I^2 R_w = (R_{w\infty} - R_a)(A + BU^n) + \frac{m_w C_w}{\alpha_0 R_0} \frac{\partial R_w}{\partial t}. \quad (1.19)$$

Esta ecuación diferencial tiene una constante de tiempo τ , que da una idea del tiempo que tarda en evolucionar de un estado a otro la sonda, y que tiene la expresión

$$\tau = \frac{m_w C_w}{\alpha_0 R_0 (A + BU^n - I^2)}. \quad (1.20)$$

Por lo que la frecuencia límite será

$$f_{limite} = \frac{1}{2\pi\tau}. \quad (1.21)$$

1.4.3. Diseño mecánico de las sondas.

La sonda de hilo caliente consiste en un hilo muy fino montado sobre unos soportes (fig 3.6).

El material elegido para el hilo es el tungsteno, pues presenta todas las características deseables en una sonda de hilo caliente; coeficiente de variación de la resistencia con la temperatura (α) alto, alta resistencia mecánica, alta resistividad,

buen comportamiento a altas temperaturas. De hecho, el tungsteno puede ser empleado a temperaturas superiores a 300°C y en velocidades supersónicas.

Las sondas tienen un tamaño típico de 1mm de longitud y 5 micras de diámetro. El hilo está colocado entre unos soportes con forma de aguja, normalmente de acero inoxidable. Estos soportes están metidos dentro del cuerpo de la sonda, y se conectan a través de cables finos a las conexiones, normalmente chapadas en oro.

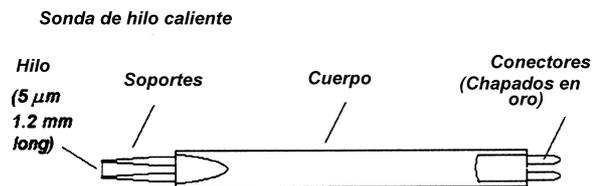


Figura 1.6: Sonda de hilo caliente