

Estudio de técnicas fototérmicas aplicadas a la medición de flujo gaseoso

Pablo D. Slavkin

Centro de investigaciones en Laseres y Aplicaciones (CEILAP)
Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las Fuerzas Armadas (CITEFA) Zufriategui 4380 (1603) Villa
Martelli, Pcia de Buenos Aires
e-mail: Pablo_Slavkin@yahoo.com.ar
Tutor: Dr. Francisco Manzano

lunes, 31 de marzo de 2008

1 Resumen:

Es de gran interés en la industria la medición precisa de caudal volumétrico de fluidos en tuberías, es por eso que existen decenas de técnicas para lograrlo. Sin embargo se presenta una nueva técnica que por sus características, podría aumentar sensiblemente la precisión manteniendo el costo y complejidad, a la vez que brindaría nuevas posibilidades inalcanzables con el resto de las técnicas.

Primeramente se enumeran y describen varias técnicas fotométricas de interés y luego se usara la tecnica de deflexion de haz para demostrar su utilidad en la medición de caudal volumétrico en fluidos con movimiento laminar dentro de tubos cilíndricos. Se detallan algunas técnicas de optimización para aumentar el rango dinámico de velocidades y se especifican los parámetros de funcionamiento. Se enumeran otros posibles usos que brindarían mas información útil.

2 Introducción:

Actualmente la medición de caudal gaseoso en plantas industriales y gasoductos se realizan generalmente empleando sistemas conocidos como caudalímetros volumétricos de diversos tipos como turbinas, sondas ultrasónicas, medidores magnéticos, etc., de diversas tecnologías.. Estas técnicas de medición presentan varios inconvenientes como el bajo rango dinámico, la moderada precisión, entre otros. Tales inconvenientes podrían resolverse o mejorarse con el uso de ciertas técnicas fototérmicas.

3 Desarrollo

3.1 Procesos y conceptos básicos de las técnicas fototérmicas:

Las técnicas fototérmicas son sensibles solamente a los gradientes de temperatura de la muestra en estudio que son inducidos usando energía lumínica.

Los fenómenos involucrados se pueden ver en la Fig.1 y se detallan a continuación.

Irradiación: Cuando un material es irradiado con una fuente lumínica de una energía que coincide con alguno de los saltos energéticos permitidos de sus moléculas, existe una cierta probabilidad de que parte de esa energía sea absorbida en forma de energía interna en dichas moléculas como se muestra en la Fig.2

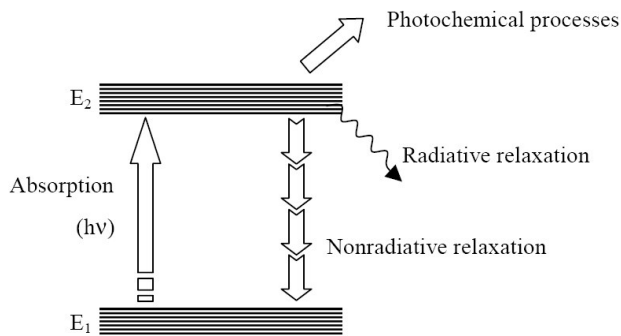


Fig. 2 Excitación y relajación por diversos caminos, radiativos y no radiativos

La probabilidad de absorción en estas condiciones sigue la ley de Lambert-Beer:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

donde:

$I(x)$ = es la irradiancia en función de la distancia penetrada en el material

I_0 = Es la irradiancia de la fuente.

β = Es el coeficiente de absorción

β dependerá de las propiedades intrínsecas del material pero también será proporcional a la densidad, es por eso que en gases se suelen realizar las experiencias a alta presión para que el material absorba la mayor cantidad de energía posible..

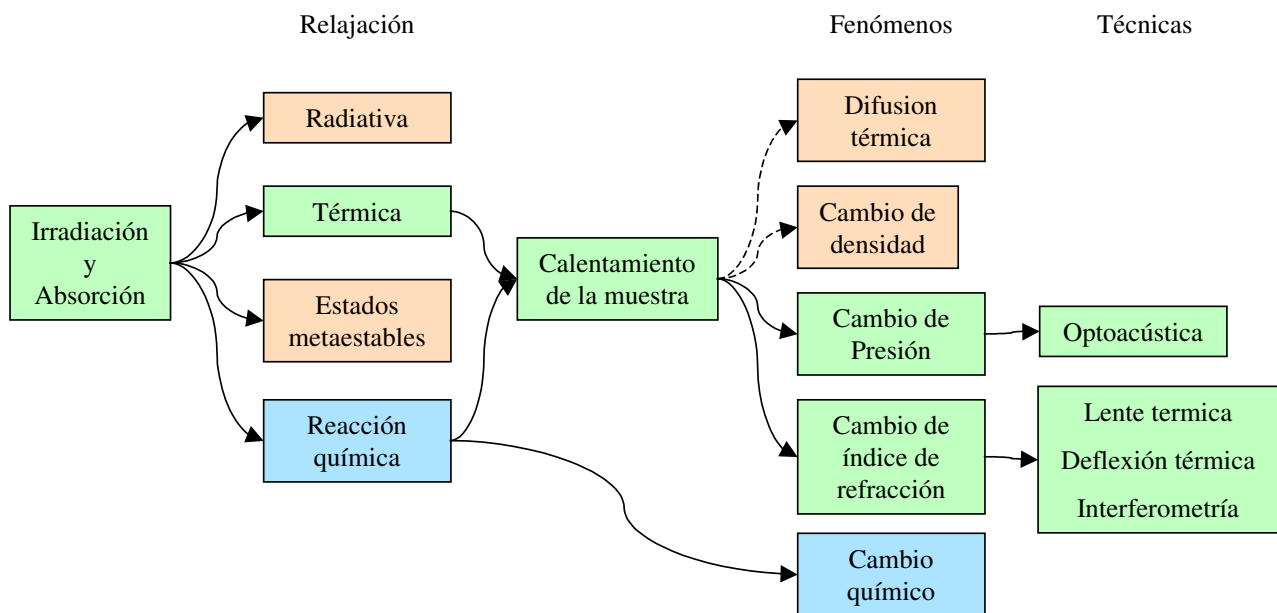


Fig. 1 Caminos posibles desde la irradiación de la muestra hasta el estado de equilibrio. En verde los de interés, en rojo las pérdidas, en azul efectos particulares.

En moléculas complejas, los estados vibracionales y rotacionales generan suficientes alternativas de salto energético de manera que la elección de la frecuencia de radiación no es crítica, sin embargo usualmente se utilizan láseres como fuente de radiación ya que se pueden aprovechar otras de sus propiedades.

Relajación: Cuando un material en equilibrio termodinámico se encuentra a una determinada temperatura T , el principio de Boltzman establece la fracción de moléculas para cada estado de energía permitido siguiendo la expresión:

$$\frac{N_i}{N_0} = e^{\frac{-E_i}{kT}}$$

donde:

N_i = número de moléculas en el estado i

N_0 = número de moléculas en el estado fundamental

E_i = energía del estado excitado en relación al fundamental

k = constante de Boltzman

T = Temperatura en grados Kelvin

Antes de ser irradiadas, las moléculas del material se encuentran en los estados dados por el principio de Boltzman a la temperatura de la muestra, pero luego, algunas de estas moléculas cambian de estado produciéndose un desequilibrio, con lo cual tras un determinado tiempo, estas moléculas intentarán volver al estado nominal por alguno de los siguientes fenómenos.

- **Térmica:** Las moléculas excitadas pueden ceder su energía mediante colisiones sucesivas intermoleculares que convierten esa energía interna en energía cinética de traslación, provocando un aumento en la temperatura de la zona irradiada. Asimismo espontáneamente una molécula podría acelerarse cediendo energía sin la necesidad de una colisión, pero con el mismo efecto resultante. Debido a que las

técnicas fototérmicas son sensibles solamente al cambio de temperatura, se busca que toda la relajación se realice siguiendo este fenómeno, sin embargo existen otras formas de disipación que se consideran pérdidas ya que no se detectan y son:

- **Radiativa:** espontáneamente o bien forzada por colisiones, una molécula excitada podría disminuir su energía interna emitiendo un fotón de una energía que deberá coincidir con alguno de los saltos permitidos. Este fenómeno, también es conocido como fluorescencia, no provoca ningún cambio de temperatura, con lo cual es fuente de pérdidas.
- **Estados metaestables:** Cada estado excitado requiere de un tiempo para desexcitarse y alcanzar el equilibrio, llamado vida media del estado. Puede ocurrir que el tiempo de vida media de un estado, inducido directamente por la radiación o alcanzado por otro decaimiento intermedio, sea muy largo comparado con los tiempos asociados a la técnica en cuestión, provocando un “atrapamiento” de la energía e impidiendo que esta molécula pueda volver a excitarse saturando el material. Como no producen un cambio en la temperatura de la muestra en los tiempos adecuados se considera una pérdida y se busca evitar esta situación.
- **Reacción química:** Puede ocurrir que la radiación lumínica provoque una reacción química de la muestra transformándola en otra sustancia. Solo en casos muy particulares y bien conocidos se puede hacer uso de esta transformación, pero generalmente se espera que la técnica no modifique las propiedades del material, y es por eso que se debe evitar esta situación.

Si los métodos fueron los indicados y la muestra aumenta su temperatura en la zona irradiada, entonces se producirán varios fenómenos simultáneos que intentarán equilibrar la temperatura de todo el material. Estos son:

a) **Difusión térmica:** Las moléculas de la zona irradiada que finalmente han aumentado su energía cinética, a medida que colisionan con el resto del material, se desaceleran cediendo su energía extra en cada colisión hasta equilibrarse. Una vez que se traslada la energía extra a todo el material, el efecto del gradiente de temperatura en la zona irradiada desaparece y ya no es posible medir con estas técnicas; es por eso que el tiempo asociado con la difusión deberá ser suficientemente largo para poder medir antes que desaparezca el fenómeno de interés.

b) **Cambio de densidad:** Las moléculas excitadas al tener mayor energía cinética que el resto del material intentaran alejarse de la zona irradiada disminuyendo la densidad en la zona. Este fenómeno puede afectar las mediciones en algunas técnicas, y es por eso que se deberá mantener acotado su valor. En el caso de los gases esto se logra aumentando la presión, de manera que el cambio de densidad sea despreciable frente a la gran densidad de gas..

c) **Cambio de presión:** Las colisiones elásticas entre las moléculas excitadas y el resto del material provocará cambios de presión que activarán los modos de oscilación naturales del material o del recipiente que lo contenga en el caso de los gases y líquidos hasta que finalmente se atenúa disipándose en forma de calor. Este fenómeno es de gran interés y derivará en técnicas de medición foto acústicas.

d) **Cambio del índice de refracción:** El índice de refracción de un material es función de la temperatura, la densidad y longitud de onda. Como se mencionó, la densidad es un efecto que se intenta minimizar y será despreciado, la longitud de onda se considera restringida y también se desprecia, de manera que se considera solamente el cambio en el índice en función de la temperatura, y se usa ampliamente en diversas técnicas..

3.2 Técnicas de medición

Haciendo uso de los dos fenómenos remarcados en verde en la Fig. 1 se describen varias técnicas ampliamente usadas:

3.2.1 Lentes Térmicas

La intensidad lumínica de un haz en función de la posición puede tomar diversas formas, plana, gaussiana, etc; Cuando una muestra apropiada es irradiada, el gradiente de temperatura en la zona será proporcional a esta forma, mas aún, generalmente el índice de refracción disminuye con la temperatura, de manera que se genera en el material una especie de lente convexa-convexa. Si colinealmente se hace incidir un haz de pruebas, este diverge provocando una dispersión espacial de su energía, comparado con la misma experiencia en el material sin irradiar. Esta disminución puede ser medida usando un detector apropiado como se muestra en la Fig. 3

. La intensidad recolectada en función del tiempo toma formas como la Fig. 4 de donde se pueden extraer diversos datos referidos a las propiedades del material.

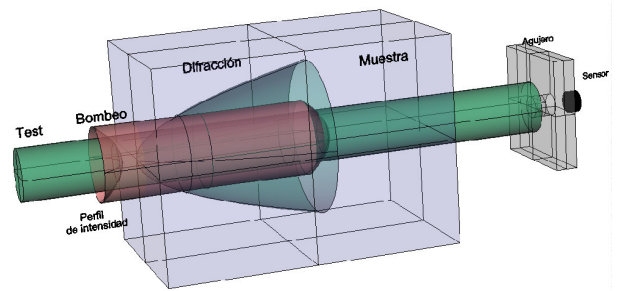


Fig. 3 El perfil de intensidad del haz de bombeo genera un gradiente de temperaturas en el interior de la muestra que a su vez genera un cambio en el índice de refracción que hace diverger el haz de prueba colineal

Inmediatamente después de la radiación, el material incrementa su temperatura siguiendo el perfil de intensidades del haz, el tiempo que le toma alcanzar el mínimo de la curva guarda dependencia con la velocidad en que las moléculas excitadas ceden su energía interna al material incrementando la temperatura, mientras que la exponencial decreciente que le sigue depende de cuan eficiente es el material para alcanzar el equilibrio termodinámico. Ambas zonas de la curva brindan parámetros del material de gran importancia práctica.

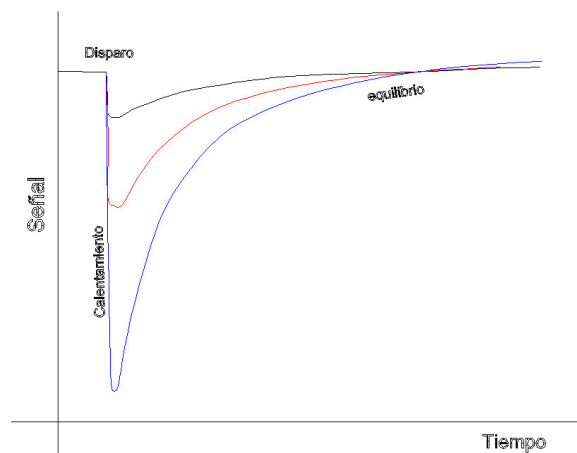


Fig. 4 Curva característica tomada en el sensor para diferentes absorciones

3.2.2 Efecto foto acústico

Tras la irradiación de una muestra apropiada, las moléculas excitadas colisionan elásticamente con el resto del material generando diferencia de presión local que activará los modos normales de oscilación del material o el recipiente que lo contiene y que luego se irá atenuando a medida que se disipe calentando el material. Si se diseña el sistema de manera que el modo natural preferido tenga una frecuencia del orden de las audibles, es posible usar un micrófono para capturar la amplitud de estas señales, que guardarán una estrecha relación con el cambio de temperatura provocado por la irradiación, información de valiosa utilidad práctica. Un esquema se puede ver en la Fig. 5

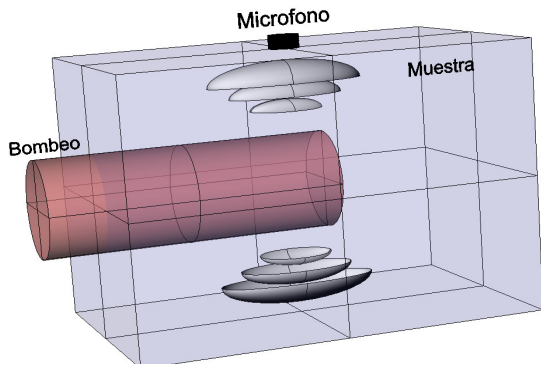


Fig. 5 El cambio de presión inducido por radiación genera ondas estacionarias en la muestra que son captadas por el micrófono.

3.2.3 Aplicaciones en muestras sólidas

Cuando la muestra a estudiar no tiene propiedades ópticas que permitan penetrarlo con irradiación lumínica, se puede utilizar esta técnica que consiste en aplicar una radiación normal al material que provocará que las moléculas excitadas transfieran su energía interna al medio circundante, generalmente aire, provocando un gradiente de temperatura que tendrá una forma como la de la Fig.6. Como el índice de refracción depende de la temperatura, un haz de pruebas pasando por un lateral de este gradiente y rasante a la superficie del material, se deflectará y es posible medir el grado de deflexión usando un captor ubicado apropiadamente. Este dato se puede usar para medir diferentes parámetros del material.

Existe una ubicación espacio-temporal para el haz de pruebas que maximiza el efecto y simplifica la detección.

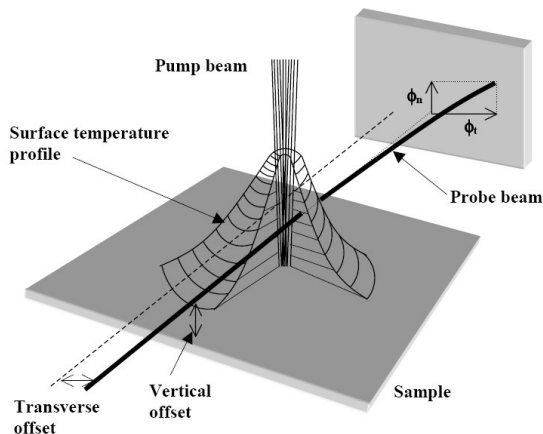


Fig. 6 El haz de bombeo genera un gradiente de temperatura provocando a su vez el gradiente en el índice de refracción del medio y es medido con un haz de pruebas ligeramente desfasado

3.2.4 Deflexión foto térmica

Sin importar que perfil de intensidades tenga el haz de bombeo, se puede ver en la Fig. 7 que tras la irradiación de una muestra se generará un cambio de temperatura que a su vez provocará un cambio en el índice de refracción en la zona irradiada de manera tal que un haz de pruebas incidiendo a un cierto ángulo se verá deflectado y podrá medirse usando un detector

apropiado. Nuevamente el grado de deflexión aportará información acerca del material.

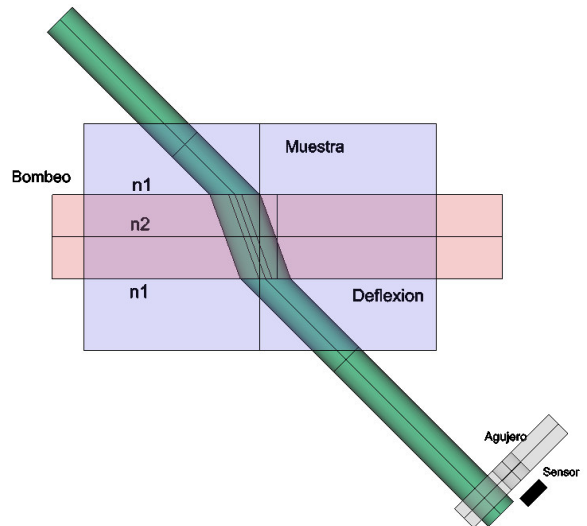


Fig. 7 deflexión del haz al pasar por la zona irradiada de mayor temperatura que el resto

Este es el método que se empleará más adelante para la medición de flujo.

3.2.5 Interferometría

Usando un esquema de dos espejos con la muestra en el medio, un haz de pruebas en forma colineal generará un patrón de interferencia a la salida; si en ese momento se hace incidir un haz de bombeo que interactúa con la muestra generando un cambio en su temperatura, el patrón de interferencia se desplazará y el número de líneas que pasen frente al detector será la información obtenida. Se puede ver el esquema en la Fig. 8

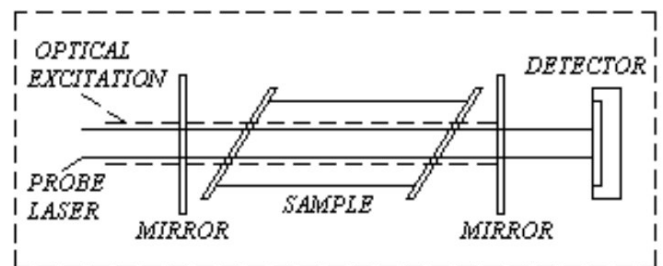


Fig. 8 Método interferométrico para medir el cambio en el índice de refracción inducido óptimamente.

3.2.6 Difracción

Cuando dos haces de bombeo se encuentran en un cierto ángulo interfieren generando un patrón característico. Si el encuentro se produce dentro de una muestra apropiada, esta aumentará su temperatura siguiendo este patrón y generando a su vez un cambio de índices con la misma forma. Si en ese momento un haz de testeo se hace pasar por esta zona se verá refractado por la red de difracción generada y se podrá medir esta magnitud para obtener información de las propiedades del material. El esquema se puede ver en la Fig. 9

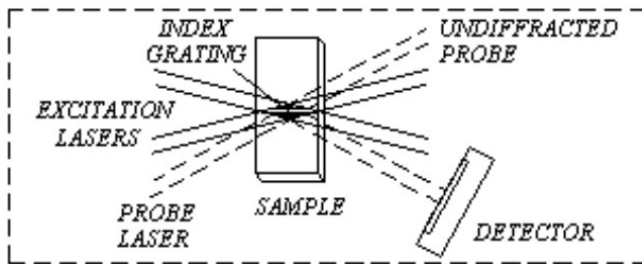


Fig. 9 El haz de pruebas difracta al encontrar una red de difracción en el material.

Estos dos últimos métodos son muy sensibles comparados con el resto aunque pueden a la vez requerir de mucha calibración y ajustes para poder ponerlos en marcha.

3.3 Medición de flujo

Se plantea la posibilidad de usar las ideas y conceptos de algunas de las técnicas ya mencionadas para poder medir el flujo gaseoso pasando a través de un tubo cilíndrico.

La técnica básica consiste en irradiar el gas en movimiento con un pulso mediante un haz de bombeo correctamente elegido que provocará el calentamiento focalizado. Luego, a una cierta distancia del haz y en dirección del movimiento del gas, se hace pasar una haz de pruebas continuo y se recoge la señal haciéndolo pasar por un orificio y recolectándolo con un censor apropiado.

Como la zona irradiada esta además en movimiento, en un cierto tiempo pasara frente al haz de pruebas y lo flexionará como lo hace en la técnica de deflexión estudiada, haciendo que el censor detecte una disminución en la señal. Luego conociendo el tiempo desde la irradiación hasta la detección y la distancia entre ambos haces, es posible calcular la velocidad de desplazamiento.

La idea básica se muestra en la Fig. 7

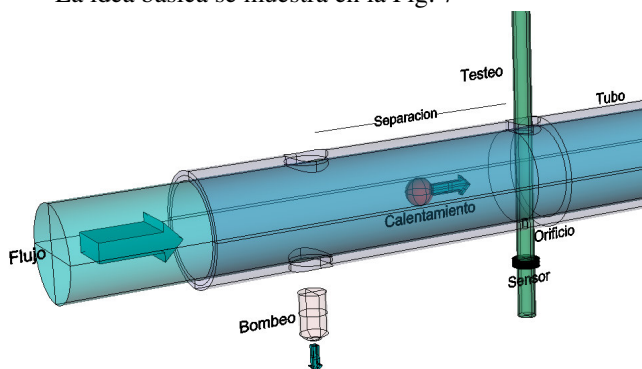


Fig. 7 El haz de bombeo "marca" puntualmente el gas que provocara la deflexión del haz de prueba mas adelante

Si:

- Δt = Tiempo entre el haz emitido y la deflexión
- d = Distancia entre los haces de bombeo y testeo.
- R = Radio del tubo.
- ϕ_v = Flujo volumétrico.

Entonces simplemente

$$\phi_v = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot d}{\Delta t} \quad \text{Eq. 1}$$

3.3.1 Consideraciones, problemas y soluciones

3.3.1.1 Flujo laminar y turbulento

En la idea básica del sistema se ha dado por sentado que el fluido se mueve de modo estacionario y la velocidad en función del radio del tubo es constante. Dado que existe realmente una fuerza de rozamiento entre el fluido y las paredes del tubo, la velocidad en las paredes será cero, mientras que al acercarnos al centro del tubo alcanzara su velocidad máxima. Esto provoca un rozamiento entre las diferentes "capas" de fluido que se desplazan a diferente velocidad y generan una diferencia de presión entre la entrada y la salida del flujo, siguiendo la ley de Poiseuille, de manera que si

- F = Fuerza de rozamiento entre capas de fluido
- S = Superficie de contacto fluido-tubo
- Δp = Diferencia de presión entrada-salida $P_1 - P_2$
- v = Velocidad del fluido en función del radio.
- L = Longitud del tubo censor.
- η = Coeficiente de viscosidad

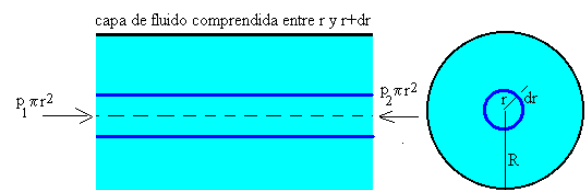


Fig. 8

$$\frac{F}{S} = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \quad \text{Eq. 2}$$

y como

$$F = \Delta p \cdot \pi \cdot r^2 \quad \text{Eq. 3}$$

Reemplazando se obtiene:

$$\frac{\Delta p \cdot r}{2 \cdot L} = -\eta \cdot \frac{dv(r)}{dr} \quad \text{Eq. 4}$$

Si se integra en r se obtiene el perfil de velocidades del tubo que será:

$$-\int_v^0 dv = \frac{\Delta p}{2 \cdot \eta \cdot L} \cdot \int_r^R r \cdot dr \Rightarrow v(r) = -\frac{\Delta p}{4 \cdot \eta \cdot L} (R^2 - r^2) \quad \text{Eq. 5}$$

perfil de velocidades

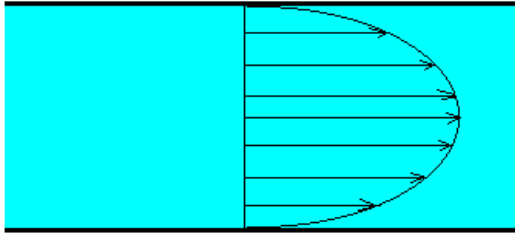


Fig. 9 Perfil de velocidades típico en tubo cilíndrico

Con este perfil de velocidades, el ϕ_v se obtendrá integrando el volumen de fluido en cada anillo imaginario de igual velocidad:

$$\phi_v = \int_0^R v(r) \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr = \frac{\pi \cdot \Delta p}{2 \cdot \eta \cdot L} \int_0^R (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr$$

$$\phi_v = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot R^4}{8 \cdot \eta \cdot L}$$

Eq. 6

Para resolver el flujo volumétrico entonces hace falta conocer Δp , que se puede obtener como sigue:
Si

x = Distancia de medición desde el centro del tubo
V = Valor de velocidad medida en x

$$\Delta p = \frac{V \cdot 4 \cdot \eta \cdot L}{(R^2 - x^2)}$$

Eq. 7

Reemplazando queda que:

$$\phi_v(V) = \frac{\pi \cdot R^4}{2(R^2 - x^2)} \cdot V$$

Eq. 8

y si $x=0$ que es justo el centro del tubo, queda que:

$$\phi_v(V) = \frac{\pi \cdot R^2}{2} \cdot V$$

Eq. 9

Este calculo solo es valido mientras el fluido se desplace de manera uniforme, conocido como “flujo laminar”. Bajo ciertas condiciones el desplazamiento se puede volver turbulento; en ese caso el sistema pierde eficacia debido a que no hay modelos precisos que expliquen tal movimiento. Para asegurar que el flujo es laminar se debe cumplir que la siguiente cuenta:

$$\zeta = \frac{\rho \cdot R \cdot v}{\eta}$$

Eq. 10

donde:

R = Radio del tubo

v = Velocidad del fluido

ρ = Densidad del fluido

η = Viscosidad del fluido

ζ = Numero de Raynolds.

arroje un valor menor a 2100:

3.3.1.2 Limite de velocidades medibles

De acuerdo con la velocidad del fluido puede suceder que el tiempo que tarda en recorrer la distancia “d” sea mayor que el tiempo en el cual el fenómeno de deflexión es observable; en ese caso será el limite inferior de velocidades capaz de medir con este sistema. Por el contrario, puede suceder que el fluido se desplace suficientemente rápido, de manera que el tiempo en recorrer “d” requiera una precisión de medición mayor que la disponible para garantizar un resultado valido. Este será entonces el limite superior de velocidades medibles.

El sistema puede extender los limites colocando varios sensores a lo largo del tubo, de manera que para velocidades bajas se usa el sensor mas cercano, mientras que para las mas rápidas el mas lejano, manteniendo la precisión de medición. también es posible correlacionar la medición de todos lo sensores para aumentar la precisión en ciertos casos.

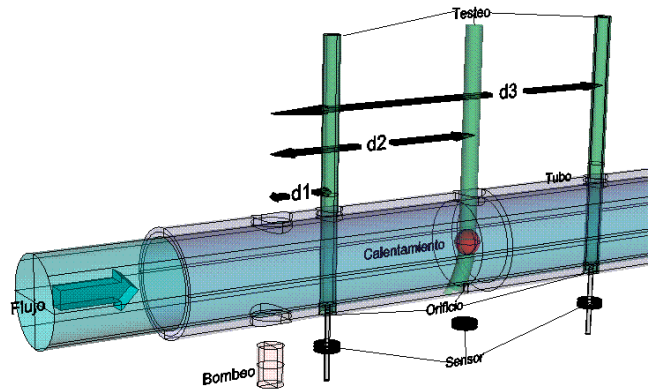


Fig. 10 Usando varios sensores de prueba se puede extender el rango dinámico de velocidades

3.3.1.3 Promedios

El efecto de deflexión del haz será proporcional, entre otras cosas, a la potencia del haz de bombeo, la sensibilidad del sistema receptor y de las propiedades intrínsecas del gas en el tubo. En consecuencia una vez fijado el sistema receptor y el gas a medir, lo único que queda disponible es la potencia del haz de bombeo, pero generalmente esta tiene un limite impuesto por la propia fuente, o bien porque pasada cierta potencia el gas se puede descomponer químicamente, cosa que no es deseable. Una manera alternativa de aumentar la relación señal / ruido es bombear con pulsos consecutivos en forma de ráfagas de numero y periodo conocidos por el receptor para realizar una correlación entre lo recibido y lo. Además el periodo se puede realimentar desde el receptor de manera de garantizar que el tiempo entre pulso y pulso sea suficientemente grande para permitir un espaciamiento temporal capaz de ser observado.

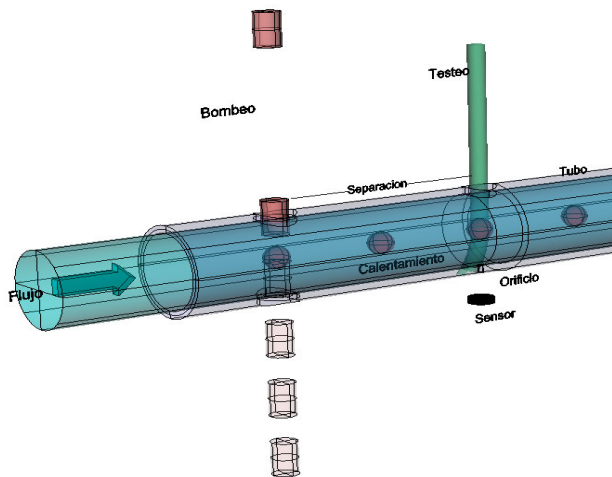


Fig. 11 Generando ráfagas de pulsos y correlacionando se puede aumentar la sensibilidad

3.3.1.4 Otros usos

En el caso de que el haz de bombeo sea un láser u otra fuente de luz, pero enfocado en un punto muy pequeño en comparación con el diámetro del tubo, cabe la posibilidad de medir el perfil de velocidades dentro del tubo simplemente cambiando la posición del foco del haz de bombeo.

Esta técnica brindaría un ajuste mas preciso que el calculo teórico desarrollado, ya que ajustaría de manera experimental la curva tomada por el fluido.

Además conociendo el perfil de velocidades y la diferencia de presión entrada / salida se podría determinar el coeficiente de viscosidad del fluido.

4 Conclusión

Se demuestra que la técnica de deflexión aplicada a la medición de caudal volumétrico de fluidos es altamente factible y brinda una alternativa muy atractiva con respecto a los metodos convencionales actualmente usados. Además es mas viable para altas velocidades que los sistemas de medición de decaimientos [7]. Se describen técnicas de optimización para aumentar el rango dinámico y la sensibilidad de la medición. Debido a que no se requiere de lasers costosos ni detectores complejos para su funcionamiento, se hace factible la fabricación a nivel industrial a un costo competitivo.

5 Estudios propuestos

Se propone estudiar la diversidad de gases y fluidos mas comunes en la industria para definir los parametros geometricos y condiciones que permitirían aplicar estas tecnicas.

6 Bibliografía

1. Eduardo J. Quel, Carlos A. Rosito. Introducción al Láser, Física –Tecnología. Lugar Editorial s.a. 1994, Buenos Aires.
2. Dr. Edmundo C. Fisher. Metodología de la Investigacion – Un enfoque para ingenieros.
3. Nibu A. George. Photoacoustic and photothermal deflection studies on certain selected photonic materials 2001
4. Stephen E. Bialkowski. Photothermal Spectroscopy methods for chemical analysis. Vol 134. 1996
5. F.A.Manzano. V.D'Accurso. O.Radulovich. Deteccion de trazas de SO₂ por medio de tecnicas fototérmicas.
6. K. Abbas Ghaleb. J. Georges. Photothermal spectroscopy for detection in miniaturized systems: relevant features, strategies and recent applications. Elsevier 2004
7. Wayne A. Weimer. Norman J. Dovichi. Time-resolved crossed-beam thermal lens measurement as a nonintrusive probe of flow velocity