

# Velocimetría por Sombras de Partículas en un Flujo Supersónico

Carlos Echeverría, David Porta & Catalina Stern

carlosea1982@ciencias.unam.mx, davidporta@ciencias.unam.mx catalina@ciencias.unam.mx

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, CDMX.

Se presentan la implementación de la técnica Velocimetría por Sombras de Partículas (PSV por sus siglas en inglés) en un flujo axisimétrico supersónico de aire que sale de una tobera de 4 mm de diámetro, los resultados preliminares de la investigación así como detalles del desarrollo de la técnica. La velocidad promedio del flujo fue de Mach 1.4.

Existen distintas técnicas para determinar campos de velocidades. La Anemometría Laser Doppler (LDV), la Velocimetría por Imagen de Partículas (PIV) y la Velocimetría por Sombras de Partículas (PSV), dependen de trazadores que sigan al flujo.

PSV es una técnica relativamente nueva propuesta por Esteveordal (2005), similar a PIV, ya que se basa en fotografiar trazadores que se mueven en un flujo. Se toman dos fotografías de un mismo grupo de partículas en dos momentos diferentes. La imagen se divide en zonas de interrogación, y se obtiene el desplazamiento medio de una zona de interrogación a través de una correlación cruzada. Por último, se obtiene una velocidad instantánea de la zona con el tiempo entre imágenes.

La principal diferencia entre las técnicas PIV y PSV es que PIV depende de la dispersión de la luz de las partículas trazadoras y utiliza una hoja de luz, que por lo general es producida con un láser pulsado de alta potencia. El espesor de la hoja de luz junto con la óptica utilizada, determinan el volumen de medición. PSV depende de la sombra producida por los trazadores al ser iluminados directamente. En este trabajo se utiliza un LED pulsado de alta potencia y el volumen de medición depende de la óptica utilizada.

La aplicación de estas técnicas para flujos relativamente lentos ( $U < 100$  m/s) no presenta mayores dificultades por lo que son ampliamente utilizadas. Sin embargo, para flujos transónicos y supersónicos ( $U > 270$  m/s) aparecen varias dificultades: el sembrado homogéneo con trazadores adecuados (tiempos de relajación pequeños), contar con un equipo de alta resolución temporal para seguir dichos trazadores y tener volúmenes de estudio adecuados. Estas dificultades no han sido resueltas en sistemas comerciales.

Para flujos rápidos, el tiempo de relajación está determinado por la siguiente expresión:

$$\tau_s = \frac{d_p \rho}{18\mu} \sim \frac{d_p^2}{\nu}$$

$d_p$  - Diámetro de la partícula  
 $\nu$  - Viscosidad dinámica  
 $\mu$  - Viscosidad cinemática

En este trabajo se utilizó talco para bebé como trazador, por tener un tiempo de relajación menor respecto al óxido de titanio (ver Tabla 1), que es utilizado frecuentemente para las técnicas PIV y LDA debido a su capacidad para dispersar luz.

Partícula Trazadora	Diámetro [ $\mu\text{m}$ ]	Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$\tau_s$ [s]
Talco para bebé ( $\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$ )	0.1-10	2700 $\text{kg}/\text{m}^3$	$1 \times 10^{-6}$
Oxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ )	0.1-5	4230 $\text{kg}/\text{m}^3$	$7 \times 10^{-6}$

Tabla 1: Tiempos de relajación, densidad y diámetros promedios para talco de bebe y óxido de titanio.

Se utilizó un LED de alta potencia CBT-120. El volumen de medición queda determinado por la profundidad de correlación, que es el espesor del volumen real que se está midiendo y considera qué sombras aún contribuyen a cambiar los resultados de la correlación cruzada significativamente:

$$2z = 2 \left[ \frac{(1 - \sqrt{\epsilon})}{\sqrt{\epsilon}} \left( \frac{f\#^2 d_p^2 + 5.95(m+1)^2 \lambda^2 f\#^4}{m^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$m$  - Magnificación  
 $d_p$  - Diámetro de Partícula  
 $f\#$  - Número f  
 $\epsilon$  - Parámetro umbral  
 $\lambda$  - Longitud de onda

En el arreglo experimental típico para PSV se coloca la fuente de luz (LED) en frente de la zona a estudiar (Figura 1), alineada con el eje óptico de la cámara.

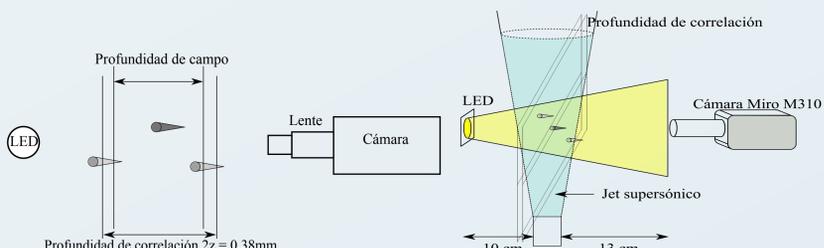


Figura 1.- Izquierda: Profundidad de campo y profundidad de correlación, derecha: arreglo experimental de PSV.

Para grabar trazadores que se mueven a velocidades del orden de Mach 1 y asegurar la presencia de grupos de trazadores en dos imágenes contiguas, es necesario tener una resolución temporal entre pares de imágenes y un tiempo de exposición menor a  $1 \mu\text{s}$ .

La cámara (Miro M310) tiene la capacidad para grabar video con separación entre fotogramas de 400 ns. Para disminuir el tiempo de exposición se diseñó y construyó un circuito generador de pulsos de luz (Figura 2), utilizando un microcontrolador MSP430g2553 y un amplificador de señales de alta velocidad (Echeverría 2005) que fueron generados y sincronizados con la señal TTL de la cámara. Con esto se logró un tiempo de exposición de 880 ns (Figura 3).

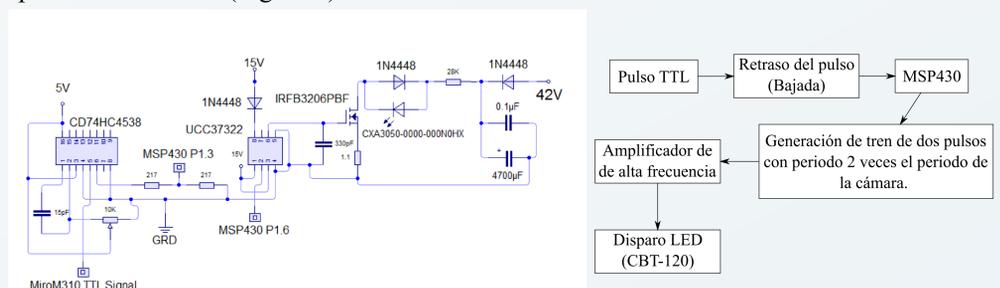


Figura 2.- Izquierda: Circuito generador de pulsos. Derecha: Esquema de funcionamiento del circuito.

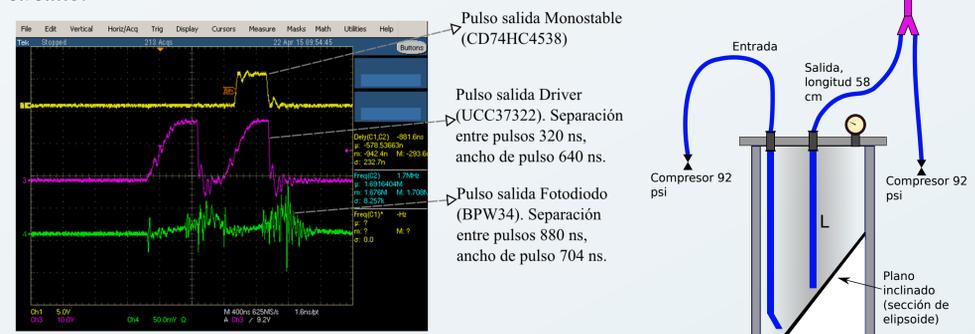


Figura 3.- Izquierda: Pulsos eléctricos resultantes del circuito generador de pulsos. Derecha: cámara de partículas con una presión de operación de 5.5 atm.

La frecuencia de grabación fue de 7200 fps, con una resolución de 778x776 píxeles. Para sembrar al flujo se diseñó un dispositivo para inyectar las partículas para obtener un sembrado homogéneo (Figura 4).

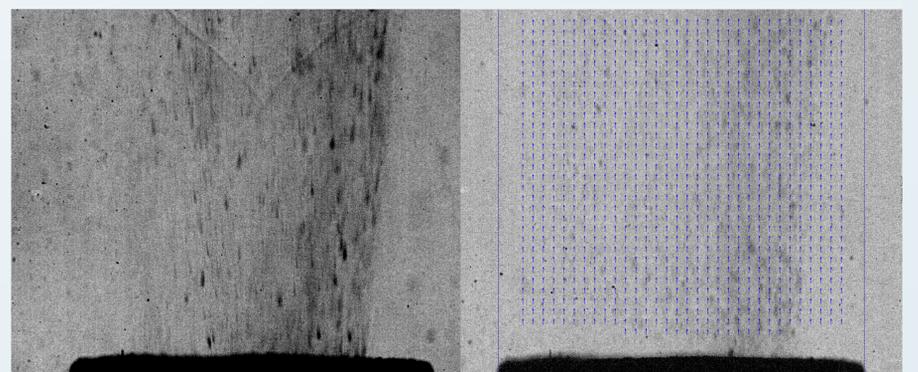


Figura 4.- Izquierda: Ejemplo de cuadro resultante. Derecha: Campo vectorial promedio.

Conclusiones:

La técnica tiene la misma configuración que un shadowgraph, lo que permite ver la onda de choque al mismo tiempo que el flujo está sembrado. Se puede utilizar para localizar la posición de la estructura de choque en el interior del flujo para obtener los perfiles de velocidad en su vecindad. No se ha encontrado ningún otro estudio que pueda mostrar el campo de velocidad y las ondas de choques, al mismo tiempo.

Los videos indican que la estructura de choque es en realidad fluctuante, por lo que más estudios se deben realizar alrededor de este hecho ya que en general se considera que el patrón de choque es estacionario.

Se logró obtener una velocidad estimada a partir del ángulo de Mach de 1.4 y el campo de velocidad promedio, obtenido con PSV coincide con este valor.

Agradecemos el apoyo de la UNAM a través de DGAPA PAPIIT IN117712.

Referencias:

- [1] Echeverría C., Implementación de la Técnica Velocimetría por Sombras de Partículas (PSV) para el estudio de las interfaces de un flujo supersónico. Tesis de Maestría, UNAM, 2015.
- [2] Esteveordal, J., & Goss, L., PIV with LED: Particle Shadow Velocimetry (PSV). AIAA (Ed.), 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: AIAA., 2005.
- [3] Porta, D., Estudio de las interfaces de un jet supersónico axisimétrico usando schlieren con un fondo como referencia. Tesis de Maestría, UNAM, 2015.