

Capítulo 2

Técnica láser Doppler

2.1. Introducción

Los sistemas láser Doppler para la medida de la velocidad de diferentes blancos (LDA/LDV) se basan en el principio básico del efecto Doppler, descubierto en 1842 por el físico austriaco Christian Doppler y por H. L. Fizeau para ondas luminosas, denominado como efecto Doppler-Fizeau. Si una fuente de ondas electromagnéticas (láser) de una frecuencia f_{TX} y longitud de onda λ_{TX} , incide sobre un blanco o partícula en movimiento a una velocidad V_p , la frecuencia detectada o recibida por un observador (detector) f_{RX} será

$$f_{RX} = \frac{c - V_p \cos(\alpha)}{c - V_p \cos(\alpha + \theta)} \cdot f_{TX} \quad (2.1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el medio de propagación, α el ángulo que forman la línea que une el emisor y el punto de medida con la velocidad de la partícula, y θ el ángulo entre el mismo vector velocidad y la línea desde el punto de medida al receptor.

Una forma más genérica de expresar el desplazamiento frecuencial debido al efecto Doppler, en función de los vectores unitarios que definen las direcciones de la fuente de luz e_{TX} y del observador o receptor e_{RX} , en función del vector velocidad de la partícula moviéndose en una dirección arbitraria en el espacio, definido por sus tres componentes $V_p = [V_{px}, V_{py}, V_{pz}]$, es

$$f_{RX} = f_{TX} \frac{1 - \frac{e_{TX} \cdot V_p}{c}}{1 - \frac{e_{RX} \cdot V_p}{c}} \quad (2.2)$$

Si consideramos a nivel práctico que la velocidad de propagación de la luz en el medio de propagación será mucho mayor que el módulo de la velocidad de la partícula

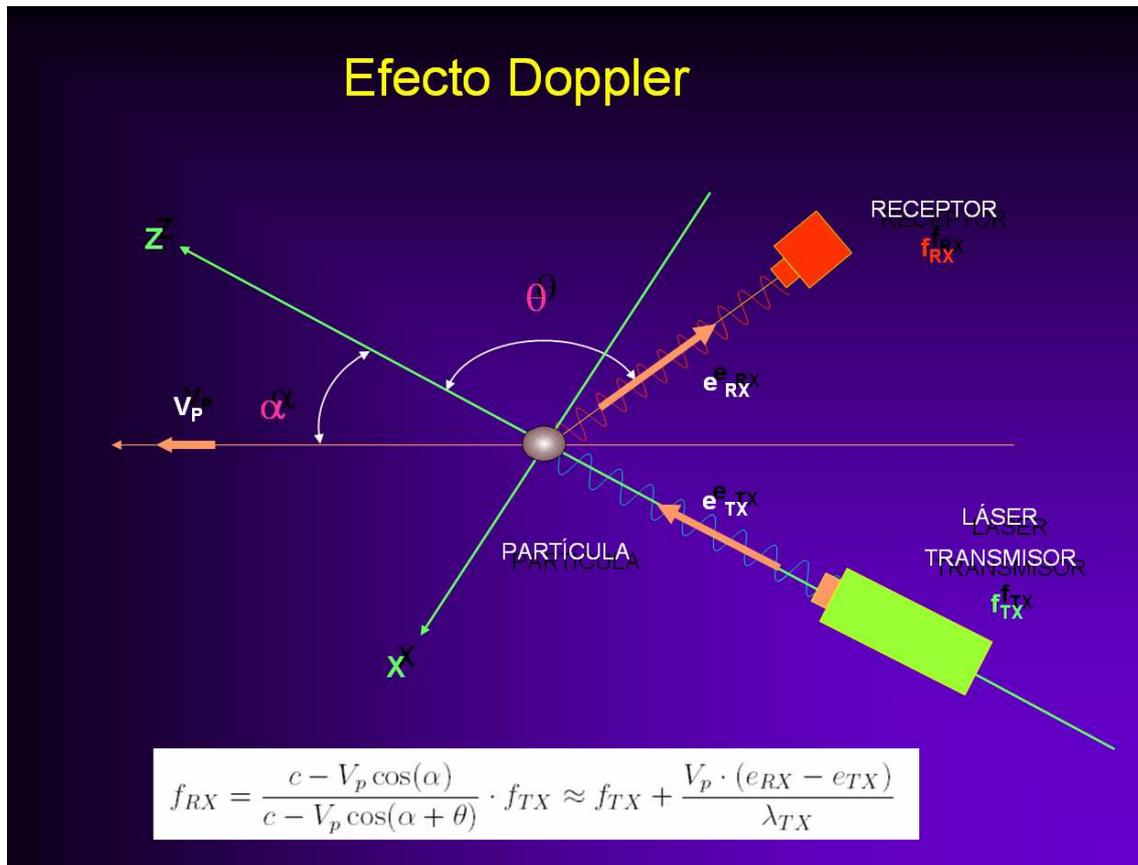


Figura 2.1 Efecto Doppler para una partícula en movimiento

($c \gg |V_p|$), con $c = f_{TX} \lambda_{TX}$, definido en la figura 2.1, la ecuación (2.2) queda

$$f_{RX} \approx f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX})}{\lambda_{TX}} \quad (2.3)$$

donde el desplazamiento frecuencial respecto a la frecuencia incidente, conocida como frecuencia Doppler f_D es proporcional a una de las componentes de velocidad de la partícula y por tanto del fluido, definida como

$$f_D = \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX})}{\lambda_{TX}} \quad (2.4)$$

2.2. Detección directa

La detección directa de la señal reflejada no nos permite obtener la frecuencia óptica desplazada. Al menos no con un fotodetector convencional. Por otra parte, aunque tal cosa fuera posible, nos encontraríamos ante la dificultad de resolver espectralmente un

pequeño desplazamiento. Para las velocidades de fluidos típicas, los desplazamientos Doppler a detectar están en un margen des de los Hz hasta las decenas de MHz y La frecuencia de la luz incidente está sobre los $10^{14}Hz$ (para un láser de HeNe @ $632.8nm$, la $f_{TX} \simeq 4,7 \cdot 10^{14}$).

Difícil pero no imposible. Utilizando un análisis espectral directo de la señal recibida por el receptor, mediante la utilización de un interferómetro Fabry-Perot, fue presentada el año 1970 por Jackson y Paul [JP70]. Aunque es una solución muy cara de utilizar, si que se realizaron las primeras experiencias, presentando resultados experimentales de medidas de velocidades hipersónicas y turbulencias en túneles de viento, y donde se midieron velocidades desde $1m/s$ a $2 \cdot 10^6m/s$.

Más tarde, a finales de los años 90 aparece otra forma de detección directa, a partir de las propiedades de absorción del yodo, que transforma el desplazamiento Doppler en variaciones de intensidad de la señal, denominado Doppler Global Velocimetry (DGV) o algunas veces llamado Planar Doppler Velocimetry (PDV), por Meyers y Lee [ML92].

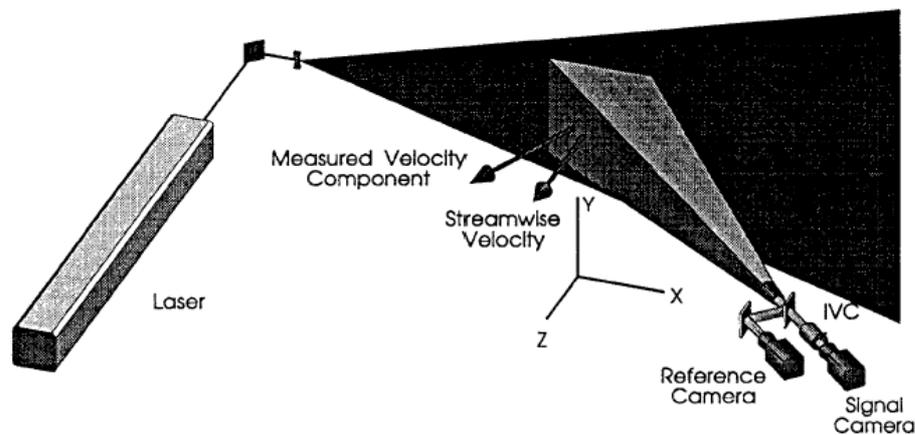


Figura 2.2 Configuración sistema DGV [ML92]

2.3. Haz de referencia

Fue en el año 1964, cuando Yeh y Cummins [YC64] publicaron el primer experimento que demostraba que si se ilumina un fluido (agua), mediante una fuente de luz o haz láser (HeNe) mediante una determinada óptica, la señal dispersada a la salida de un fotodetector, contenía en el desplazamiento Doppler de la señal, información de una de las componentes de la velocidad del fluido, para el caso particular de agua en un tubo en un laboratorio, y utilizando partículas de sembrado de esferas de poliestireno para

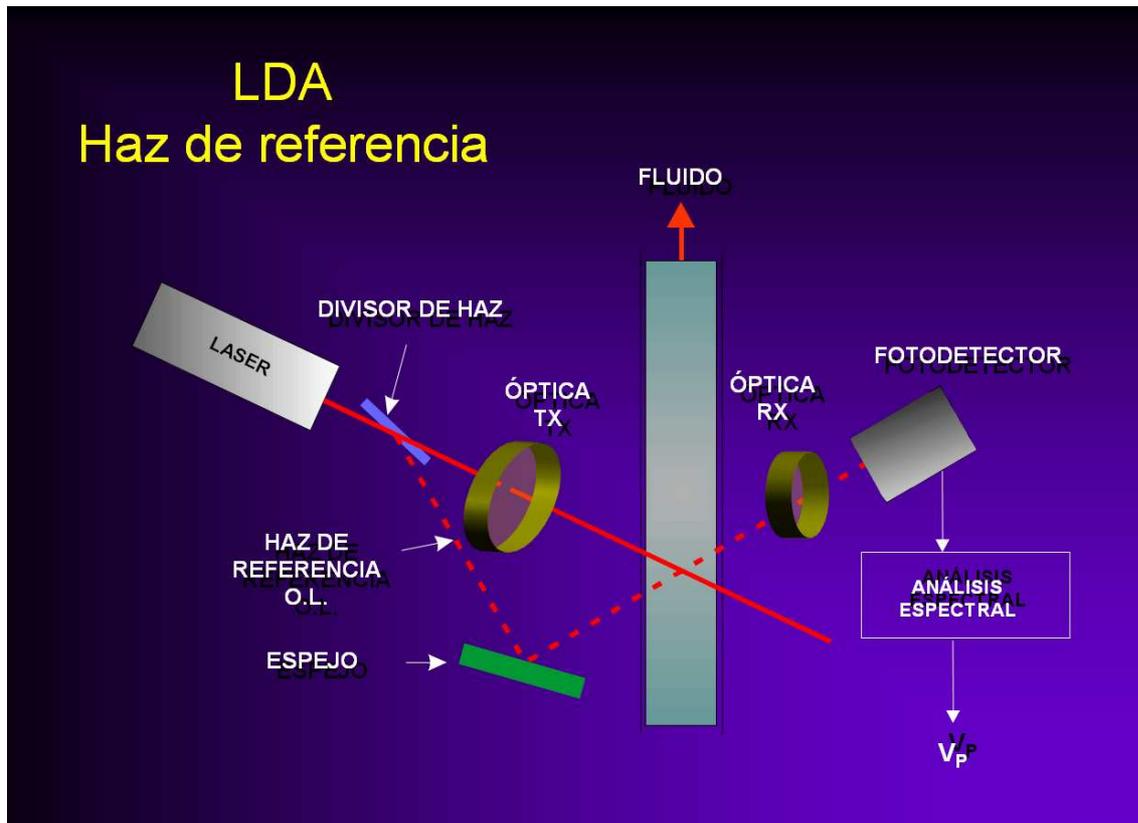


Figura 2.3 Sistema LDA, con la configuración haz de referencia

maximizar la energía dispersada. La configuración utilizada era la típica de un sistema RADAR de microondas, mezclando parte de la señal dispersada por las partículas del fluido con una muestra de la señal incidente o oscilador local (sistema heterodino). Esta configuración genérica se denomina *haz de referencia*, presentado en la figura 2.3.

Existen dos variantes, en función del camino de la señal O.L o referencia. Cada una de ellas, tendrán sus ventajas e inconvenientes, como veremos más adelante.

- **Haz de referencia de 1 haz** En este caso, el haz pasa externamente al blanco, y se mezcla con la señal dispersada (para cualquier tipo de blanco, fluidos y superficies rugosas).
- **Haz de referencia de 2 haces** El haz ilumina directamente el receptor, pero atravesando el fluido (sólo para líquidos y gases).

Haz de referencia de un haz

Si observamos la figura 2.4, sobre el área del fotodetector tendremos dos señales. La primera f_{RX1} , proviene de la señal dispersada por el blanco, mientras que la otra señal

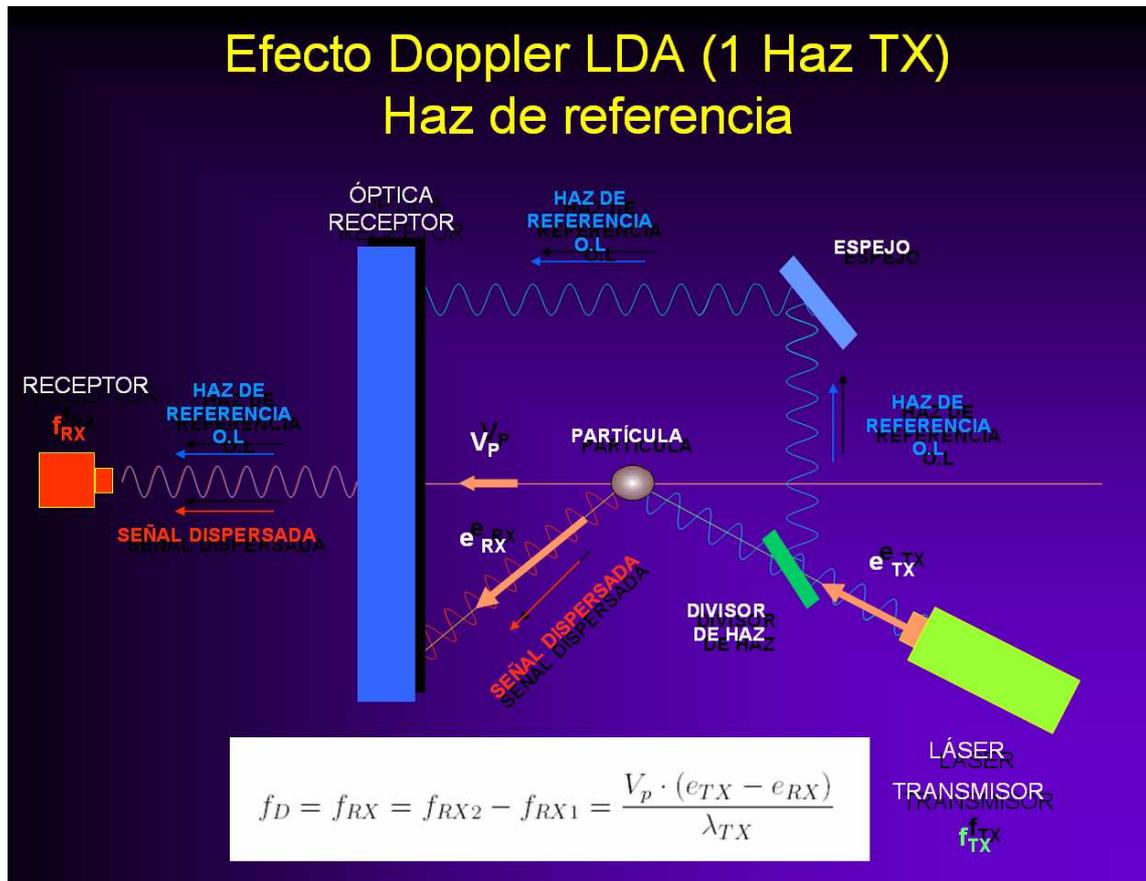


Figura 2.4 Sistema LDA, con la configuración haz de referencia de un haz

f_{RX2} tendremos una fracción del haz original, haz de referencia o oscilador local (O.L). Aplicando la ecuación (2.4), para este caso tenemos

$$f_{RX1} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX})}{\lambda_{TX}} \quad (2.5)$$

$$f_{RX2} = f_{TX} \quad (2.6)$$

A la salida del receptor, tendremos una señal heterodina o señal de batido, donde debido al comportamiento no lineal del fotodetector, generará a su salida la suma y diferencia de señales. Si a la salida sólo consideramos la diferencia (por la respuesta del receptor) a partir de las ecuaciones (2.5) y (2.6) tendremos que la señal Doppler es

$$f_D = f_{RX} = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p \cdot (e_{TX} - e_{RX})}{\lambda_{TX}} \quad (2.7)$$

Notemos que la velocidad del blanco, no sólo va a depender de la dirección de la

fente láser, sino que también dependerá de la posición del receptor. Eso significa, que como los haces focalizados sobre el blanco, del cual que queremos detectar su velocidad, no van ha ser infinitamente pequeños, las aperturas receptora tendrán que limitarse en tamaño, para limitar el volumen de medida, y como consecuencia la relación señal a ruido será pobre.

En función de la óptica utilizada y de la topología escogida para conseguir que la energía dispersada y la señal de referencia impacten sobre el detector, aparecen diferentes geometrías ópticas como el presentado por Foreman en [FGL65], recopiladas y estudiadas por Durst en [DW71] y [DMW76].

Haz de referencia de dos haces

Existe otra configuración que utiliza la configuración de haz de referencia, pero pasando esa muestra de la señal de referencia (O.L) a través del volumen de medida, denominada *haz de referencia de dos haces*, en diferentes geometrías ópticas, como la de Goldstein and Hagen [GH67]), Pike [PJBP68] y Melling [Mel70], que son modificaciones de la configuración Diferencial Doppler que veremos posteriormente, pero que presentamos en este apartado por ser una variante de la configuración general haz de referencia, aunque actualmente esté en desuso.

En la figura 2.5 presentamos la geometría utilizada para la obtención de la frecuencia Doppler en función de las direcciones de los haces incidentes y recibidos por el detector. En este caso se cumple que la dirección del haz de referencia coincide con la de la dirección de recepción $e_{TX1} = e_{RX}$, si bien no es esencial al método, si decisivo como veremos. Aplicando la ecuación (2.4), para este caso tenemos

$$f_{RX1} = f_{TX} \quad (2.8)$$

$$f_{RX2} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}} \quad (2.9)$$

y por tanto la frecuencia Doppler recibida por el detector, será

$$f_D = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p \cdot (e_{TX1} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}} \quad (2.10)$$

Esta topología, tiene la gran ventaja de que la frecuencia Doppler de la señal a la salida del detector, dependerá exclusivamente de las direcciones de los haces 1 y 2 incidentes, independientemente de la posición del detector. Eso supone, que el ancho espectral de la señal será mucho más pequeño que en el caso de haz de referencia de

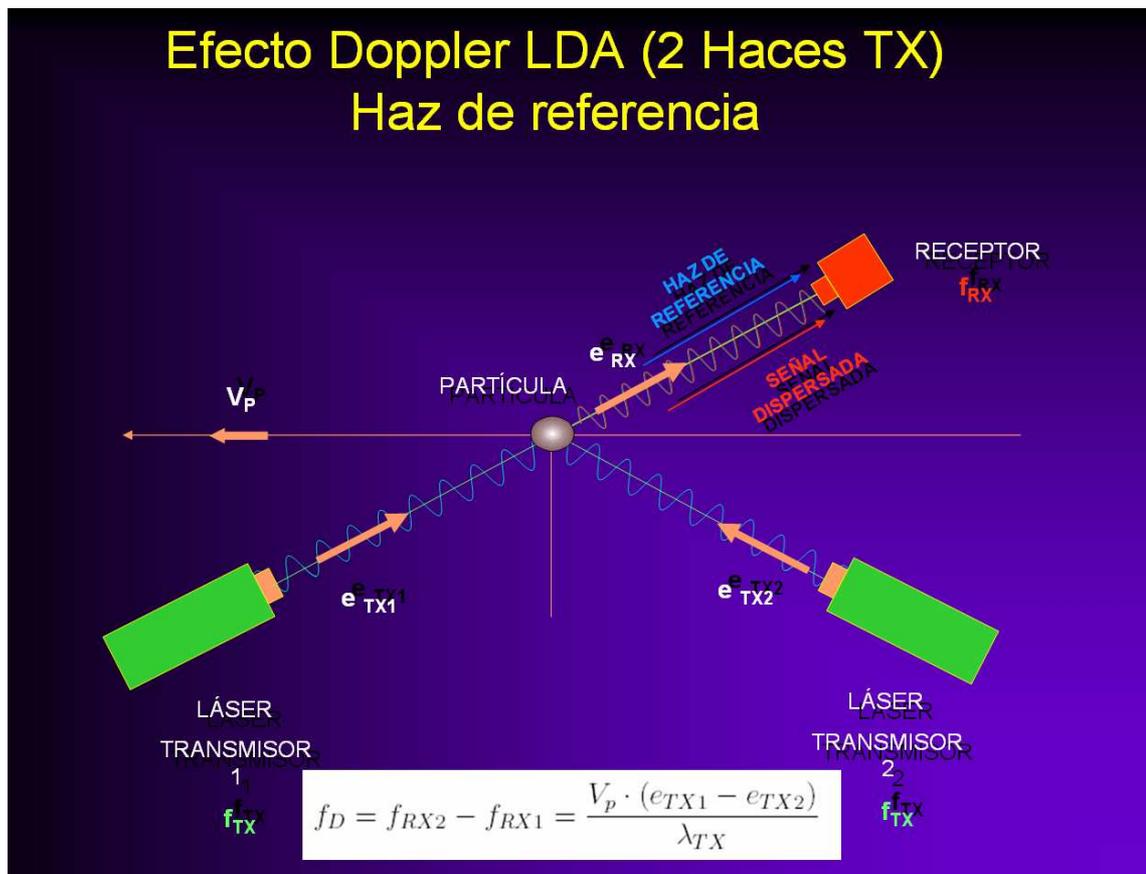


Figura 2.5 Sistema LDA, con la configuración haz de referencia de dos haces

un haz, y por tanto obtendremos una mejor resolución en la medida de la velocidad. Además, los caminos ópticos de los dos haces, el dispersado y la referencia, recorrerán exactamente la misma distancia, cosa que va a minimizar todos aquellos batidos interferentes que puedan aparecer si la fuente láser utilizada no es realmente monocromática (longitud de coherencia). El problema está en que el haz de referencia, por el hecho de cruzar el fluido, cada vez que atraviesen las partículas el volumen de medida aparecerán fluctuaciones de la intensidad dispersada, generando a la salida del receptor batidos espurios indeseados, pudiéndose confundir con el batido principal. Además, para el caso de fluidos muy absorbentes, no será una configuración muy útil.

2.4. Diferencial Doppler

Para mejorar las características de la configuración anterior basada en el haz de referencia de un haz, en 1969 Stein y Pfeifer [SP69] y Penney [Pen69], presentaron el primer montaje de un sistema LDA mediante una nueva configuración óptica, la conocida como

Diferencial Doppler o de *Doble haz*, que abría las puertas al sistema más utilizado para aplicaciones hidrodinámicas y aerodinámicas de los últimos cuarenta años.

Notemos que la configuración anterior, la denominada haz de referencia de dos haces de la figura 2.5, es un caso particular de la Diferencial Doppler, que apareció más tarde como un caso híbrido entre las dos configuraciones, que mejoraba las características propias de la configuración haz de referencia de un haz (figura 2.4).

Se trata de, a partir de una única fuente láser, dividirla en dos de igual potencia con un divisor de haz y focalizar los dos haces mediante una lente sobre el blanco a medir. El receptor podrá estar colocado delante o detrás del blanco. Para los casos en que el receptor se sitúe detrás (retrodispersión RD) o se sitúe delante (detección hacia delante DHD) los presentamos en las figuras 2.6 y 2.7.

La mejora más importante consiste en que la frecuencia Doppler de la señal a la salida del detector, no depende de la posición del receptor. Eso va a generar señales con poca ancho de banda y, por consiguiente, mejor resolución frecuencial, lo que implica un error menor en la medida de la velocidad del blanco. Asimismo no aparecerán problemas de coherencia longitudinal o temporal, ya que los caminos recorridos por los dos haces son iguales y por tanto el batido entre ellos podrá ser maximizado.

En las aplicaciones de medida de velocidad de blancos sólidos las configuraciones diferencial y de haz de referencia permiten obtener relaciones señal a ruido similares, pero en el caso de detección de líquidos y/o gases, la SNR del Diferencial Doppler va a ser mucho mejor que para el de haz de referencia, en el caso que en la zona de medida o volumen de dispersión formado por la interferencia de los haces, solo haya una partícula capaz de producir dispersión de la luz incidente. Esto es motivado porque las dos señales dispersadas provienen de una misma fuente dispersora o partícula de sembrado, y por eso la coherencia transversal o espacial está básicamente asegurada en esta configuración. Eso va a provocar que en el tamaño del detector o de la apertura receptora no existan límites por pérdidas de coherencia, justamente al contrario de lo que sucede para el caso de la configuración haz de referencia. Asimismo un mayor tamaño del volumen de dispersión, para el caso Diferencial Doppler, no va a influir negativamente, en principio, en la calidad de la señal recibida.

Otra característica importante, que hace de esta configuración la mejor de todas para su utilización en fluidos poco densos (líquidos y/o gases), es la posibilidad de con algunas pequeñas modificaciones permitan detectar más de una componente de la velocidad del blanco, como son los sistemas de dos componentes (2D-LDA) y de tres (3D-LDA).

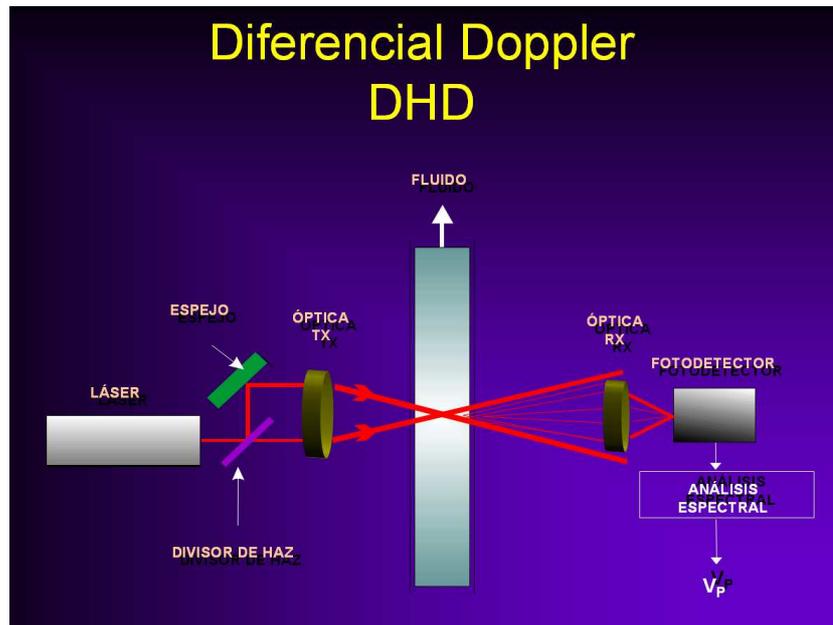


Figura 2.6 Diferencial Doppler en DHD

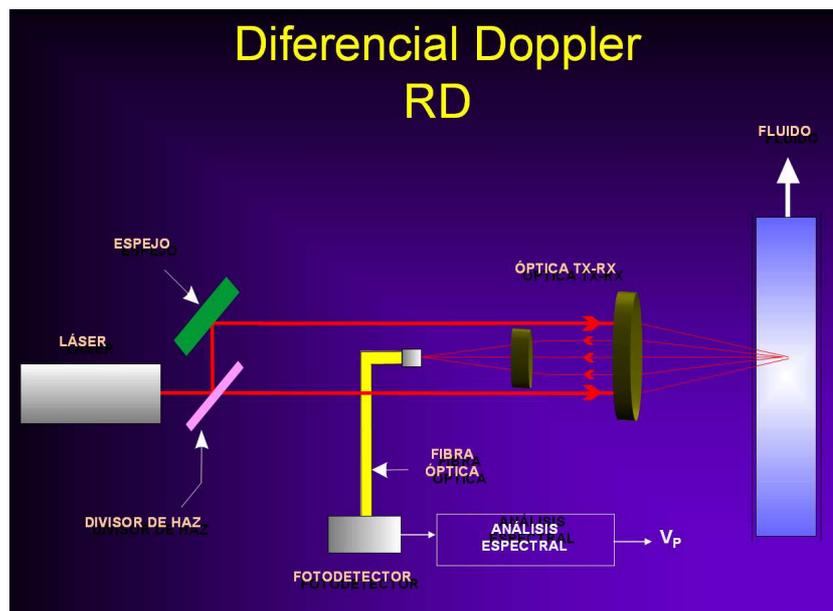


Figura 2.7 Diferencial Doppler en RD

Resumiendo, para el caso que tengamos que detectar la velocidad de líquidos y/o gases, la mejor opción es esta, la Diferencial Doppler, y cuando tengamos que detectar superficies rugosas de diferentes tipos de blancos, cualquiera de las dos es buena en principio.

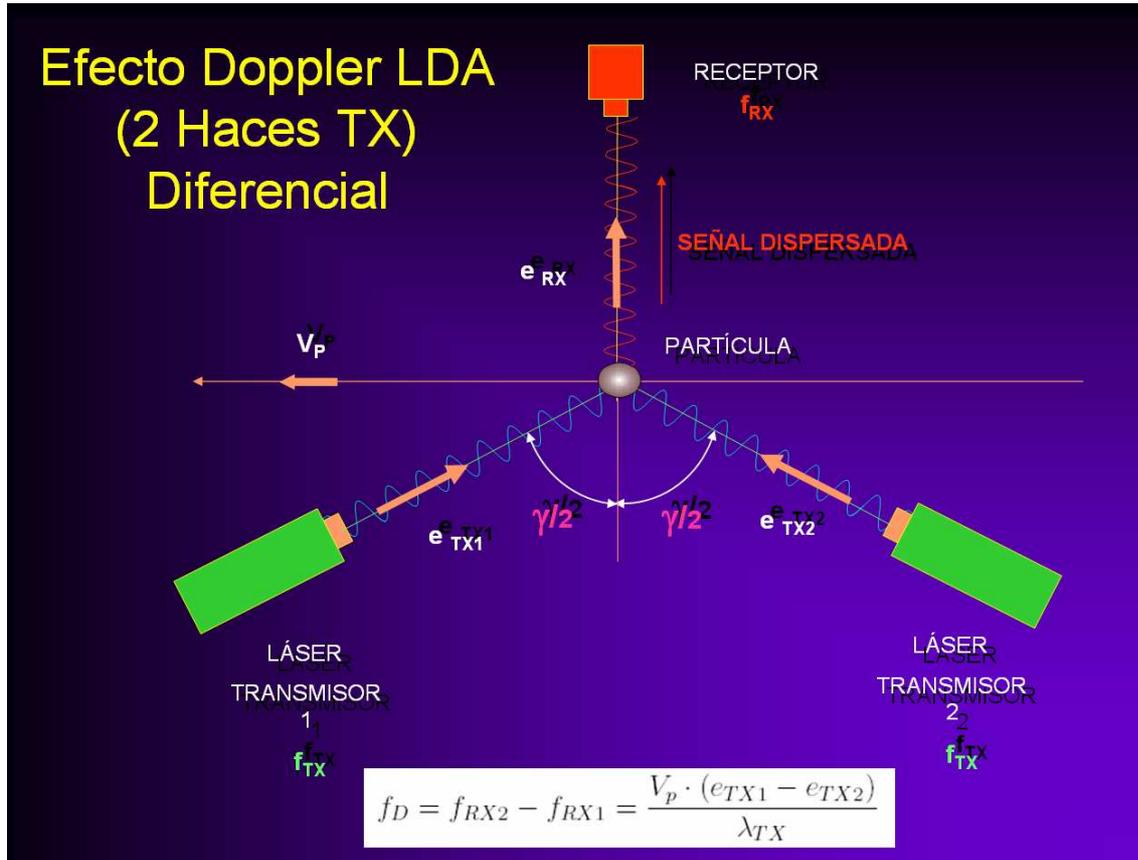


Figura 2.8 Sistema LDA, con la configuración Diferencial Doppler de dos haces

Análogamente a lo que hemos realizado anteriormente, calculamos la frecuencia Doppler a la salida del fotodetector, a partir de expresión general del efecto Doppler de la ecuación (2.4), con la geometría definida en la figura 2.8.

$$f_{RX1} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX1})}{\lambda_{TX}} \quad (2.11)$$

$$f_{RX2} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}} \quad (2.12)$$

$$f_D = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p \cdot (e_{TX1} - e_{TX2})}{\lambda_{TX}} \quad (2.13)$$

De la misma manera que ocurría en la configuración haz de referencia, para el caso de la configuración diferencial existe una alternativa, utilizando un solo haz transmisor, y recibiendo en el receptor dos señales dispersadas por el blanco, en dos direcciones distintas, Durst [DW71], conocida como configuración *simétrica*. En este caso (presentado

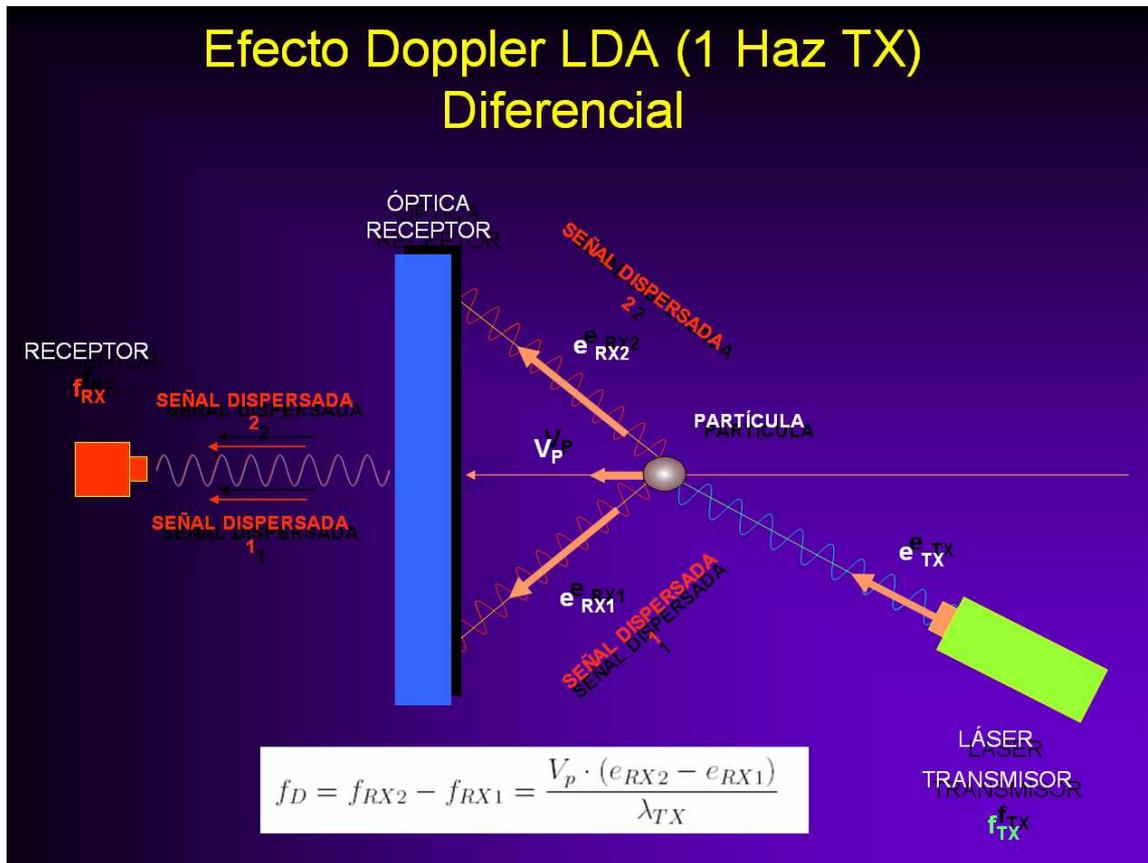


Figura 2.9 Sistema LDA, con la configuración Diferencial Doppler de un haz o Simétrica

en la figura 2.9), dos señales dispersadas por el blanco en dos direcciones arbitrarias del espacio, se mezclan en el fotodetector. La frecuencia Doppler será

$$f_{RX1} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX1} - e_{TX})}{\lambda_{TX}} \quad (2.14)$$

$$f_{RX2} = f_{TX} + \frac{V_p \cdot (e_{RX2} - e_{TX})}{\lambda_{TX}} \quad (2.15)$$

$$f_D = f_{RX2} - f_{RX1} = \frac{V_p \cdot (e_{RX2} - e_{RX1})}{\lambda_{TX}} \quad (2.16)$$

Esta configuración, tendrá las mismas características que las presentadas para el caso de la Diferencial Doppler pero con una diferencia: el ancho de banda espectral de la señal Doppler será mucho mayor, ya que la señal Doppler es función de la dirección de los dos haces recibidos, de manera parecida a la del haz de referencia de un haz.

2.5. Conclusiones

Hemos podido ver que las tres configuraciones ópticas más utilizadas en un sistema LDA para la medida de la velocidad de un determinado tipo de blanco son: la de haz de referencia, Diferencial Doppler y la simétrica. Cada una de ellas presenta unas determinadas características, derivadas de su peculiar geometría. A modo de resumen presentamos la SNR de las tres configuraciones, estimadas por Wang [Wan72], y posteriormente, en la tabla 2.1, sus principales diferencias.

⇒ HAZ DE REFERENCIA:

$$SNR \sim N_p \sigma_p (\lambda_{TX}^2 / l_v^2) \quad (2.17)$$

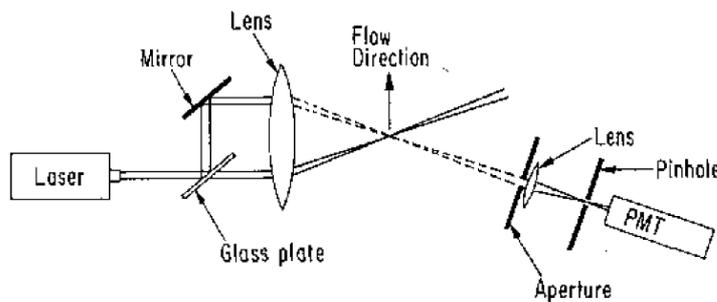


Figura 2.10 Esquema básico de una configuración Haz de referencia

⇒ DIFERENCIAL DOPPLER:

$$SNR \sim (1/N_p^{5/3}) \sigma_p (\lambda_{TX}^2 / d_p^2) \quad (2.18)$$

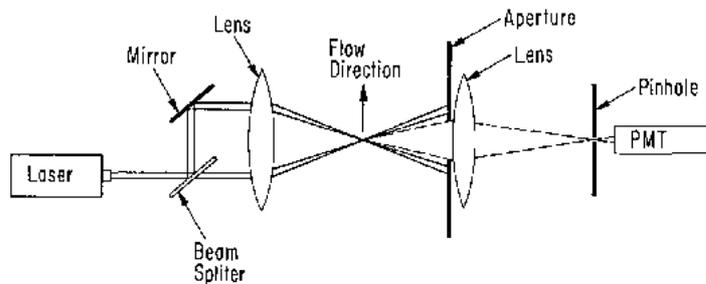


Figura 2.11 Esquema básico de una configuración Diferencial Doppler

⇒ SIMÉTRICA:

$$SNR \sim (1/N_p^{5/3}) \sigma_p(\lambda_{TX}^2/d_p^2) \quad (2.19)$$

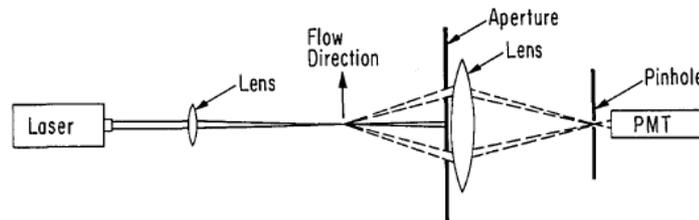


Figura 2.12 Esquema básico de una configuración Simétrica

Los parámetros que aparecen en estas expresiones son: N_p el número de partículas dispersoras en la zona de medida, d_p el diámetro medio de las partículas, σ_p el coeficiente de dispersión de *Mie*, λ_{TX} la longitud de onda de la fuente incidente de luz láser en el fluido y l_v la dimensión lineal del volumen de medida o zona de interferencia.

Las principales ventajas que presenta la configuración Diferencial Doppler son las siguientes:

- Una mejor resolución frecuencial y por tanto un error de la medida de la velocidad en cada punto del fluido más pequeño.
- Con algunas modificaciones en la configuración del sistema original, que permite detectar sólo una componente de la velocidad, se consigue obtener las tres componentes.
- La luz producida por los elementos dispersores puede ser recibida por un detector de área ancha, ya que no existe limitación de coherencia en la apertura receptora y, por tanto tampoco en las dimensiones del área del fotodetector (coherencia espacial o transversal), para el caso de tamaños de sembrado pequeños, cosa que permite niveles aceptables de SNR para a bajas concentraciones de sembrado (líquidos y/o gases).
- Los caminos ópticos recorridos por los dos haces que producen la interferencia son iguales, y por tanto no existirán problemas de coherencia temporal o longitudinal, relajando las exigencias hacia la fuente láser utilizada.

Cuadro 2.1 Características más importantes de las tres configuraciones de un sistema LDA.

Parámetros	CONFIGURACIÓN		
	Haz de referencia	Diferencial	Simétrica
Caminos ópticos	Diferentes	Iguales	Iguales
Ancho espectral Doppler	Grande	Pequeño	Grande
Complejidad Óptica	Grande	Moderada	Simple
Alineamiento	Difícil	Fácil	Moderado
Partícula Tamaño (d_p)	Grande y pequeño	Pequeño	Pequeño
Concentración de partículas (N_p)	Grande	Pequeño	Pequeño
Volumen dispersión (l_v)	Pequeño	Indiferente	Pequeño
Apertura receptora	Pequeña	Grande	Pequeña
Tipos de Blancos ¹	SR	SR/L/G	SR/L/G

Abreviatura	Tipo de Blanco
SR	Superficies rugosas
L	Líquidos
G	Gases

Recordemos que en el caso de detección de la velocidad de líquidos (L) y gases (G), se utilizarán partículas de sembrado.