

Mediciones de Parámetros Físicos, Utilizando Técnicas no Invasivas.

Pedro Moreno Zárate

Ingeniería en Agronomía

NovaUniversitas

Ocotlán de Morelos, Oaxaca, México

Ana Luz Muños Zurita

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Universidad Autónoma de Coahuila

Torreón, Coahuila, México

Raúl Ochoa Valiente

Facultad de Ingeniería Física

Universidad Autónoma de Coahuila

Saltillo, Coahuila, México

ABSTRACT

Con la aparición del láser de onda continua en 1961, la posibilidad de medir parámetros físicos como son: tamaño, velocidad, posición, temperatura, composición química, etc., con métodos no invasivos, se vislumbraba cercana^{1,16}. El desarrollo de estas aplicaciones, es en la actualidad de fundamental interés dentro de los departamentos de Ingeniería de las universidades en el mundo. El avance tecnológico ha llevado a encontrar cada día nuevas aplicaciones del láser, en distintos campos del conocimiento. Dentro de estos nuevos desarrollos, la carrera de Ingeniería en Agronomía está particularmente interesada en las aplicaciones biológicas. En este trabajo, se realiza una revisión de las bases teórico-prácticas utilizadas en técnicas no invasivas. Dichas técnicas se basan en principios físicos como son, el Efecto-Doppler e Interferencia de dos ondas. De los cuales se derivan técnicas más complejas como son: la Tomografía-Óptica-Coherente y el Efecto-Raman. Para la detección se propone utilizar novedosos detectores basados en el efecto de Fuerza-Foto-Electromotriz. Por las ventajas que ofrecen dichos detectores en comparación con los fotodiodos convencionales.

Keywords: Aplicaciones laser, interferencia, efecto Doppler, efecto de fuerza foto-electromotriz

1. TÉCNICAS NO INVASIVAS DE DETECCIÓN

La determinación de propiedades físicas de los objetos tales como su posición, tamaño, velocidad, temperatura, ect., es objetivo de muchos trabajos de investigación,² estos parámetros son relevante en distintos campos de la ciencia y tecnología como son;

- **Aplicaciones en biomedicina**, en estudios de flujo sanguíneo en arterias venas en diferentes órganos humanos,³ animales,⁴ y la detección de células de plasma o células rojas.⁵
- **En aerodinámica**, en la construcción y optimización de automóviles, aviones o helicópteros, reduciendo resistencia al viento o minimizando el consumo de energía.⁶
- **Hidrodinámica**, en la optimización y construcción de mecanismos inmersos en fluidos⁷.
- **Monitoreo de procesos industriales**, con la finalidad de optimizar líneas de producción, esto para reducir costos, aumentando la calidad.

Con la aparición del láser de onda continua en 1961, la posibilidad de medir los parámetros físicos con métodos no invasivos, se vislumbraba cercana. El desarrollo de estas aplicaciones, es en la actualidad de fundamental interés dentro de los departamentos de los departamentos de Ingeniería de las universidades en el mundo. El avance de esta ciencia ha llevado a encontrar cada día nuevas a aplicaciones dentro distintos campos del conocimiento del láser de onda continua. Dentro de estos nuevos desarrollos es particularmente interesante, las aplicaciones biológicas. Que es el caso particular, del que el departamento de Ingeniería en Agronomía de NovaUniversitas.

1.1 Interferencia

En teoría de mecánica ondulatoria la interferencia es lo que resulta de la superposición de dos o más ondas, resultando en la creación de una nueva distribución de intensidad,¹³ i.e. “la interferencia óptica equivale a la interacción de 2 o más ondas de luz que producen una irradiancia resultante que se desvía de la suma de las irradiancias componentes”¹³⁻¹⁵

Cuando dos ondas planas se superponen entre sí con un ángulo θ sobre la superficie A , como se ve en la fig 1 se genera un patrón de interferencia con la distribución sinusoidal de intensidad.[?]

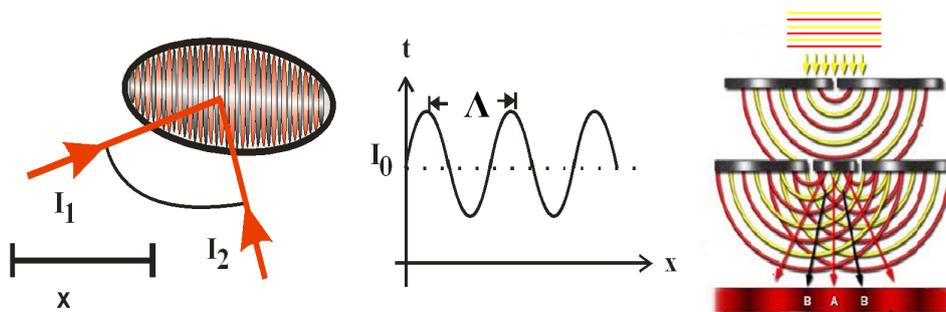


Figura 1. Superposición de dos haces de luz I_1 , I_2 con frentes de onda planos formando un ángulo θ entre ellos. x es la coordenada espacial, Λ es el periodo espacial. La distribución de intensidad resultante sobre la superficie S es una serie de franjas senoidales perpendiculares al plano de la figura.

El patrón de interferencia estará definido como (1)

$$I_t = I_0(1 + m \cos(Kx - \varphi(t))) \quad (1)$$

Donde m es el contraste de las franjas de interferencia, I_0 es la intensidad promedio de iluminación, K es la frecuencia espacial que está definida como (2).

$$K = \frac{4\pi \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{\lambda} \quad (2)$$

Aquí λ es la longitud de onda.

El término $\varphi(t)$ en la Ecuación (1) es la diferencia de fase que determina la posición de las franjas. Si depende del tiempo, por ejemplo linealmente

$$\varphi(t) = \Omega_D t \quad (3)$$

las franjas del patrón de interferencia comenzaran a desplazarse a velocidad constante:

$$v_F = \frac{\Omega_D}{K} \quad (4)$$

donde $\Omega_D = 2\pi f_D$ es así llamada la frecuencia de Doppler que puede ser interpretada como un desplazamiento en frecuencia respecto la frecuencia central ω_0 de la onda de luz cuyo origen y significado aclararemos posteriormente y es la frecuencia lineal. Nótese que este caso es análogo al caso de interferencia de 2 ondas a distintas frecuencias temporales ω_0 y $\omega_0 + \Omega_D$.

Ahora bien si depende del tiempo, pero de manera periódica

$$\varphi(t) = \Delta \sin(\Omega_P t) \quad (5)$$

el patrón de interferencia oscilara periódicamente con amplitud Δ y frecuencia Ω_P .

Las técnicas interferométricas se emplean para medir el contorno de la superficie de los espejos de los telescopios. Los índices de refracción de una sustancia también pueden medirse con el interferómetro, y se calculan a partir del desplazamiento en las franjas de interferencia causado por el retraso del haz. El principio del interferómetro también se emplea para medir el diámetro de estrellas grandes relativamente cercanas, como por ejemplo Betelgeuse. Como los interferómetros modernos pueden medir ángulos extremadamente pequeños, se emplean también en este caso en estrellas gigantes cercanas para obtener imágenes de variaciones del brillo en la superficie de dichas estrellas. En técnicas basadas en detección de parámetros de manera remota mediante luz coherente¹⁴⁻¹⁵ En la actualidad debido a la viabilidad y robustez de los experimentos interferométricos se está optando por utilizarlos en aplicaciones biológicas.¹⁶

2. MÉTODOS DE DETECCIÓN USANDO EL EFECTO DOPPLER

Las técnicas de Detección Láser Doppler se dieron a conocer al final de la década de los 70's y se fue perfeccionándose en las décadas posteriores. Existen 2 configuraciones experimentales en la detecciones basadas en el efecto Doppler: el caso más simple que consta de un solo haz, y el método de 2 haces coherentes basado en el fenómeno de interferencia.

2.1 Caso de un solo haz o detección directa

El arreglo experimental para la configuración de un solo haz se presenta en la figura (2).

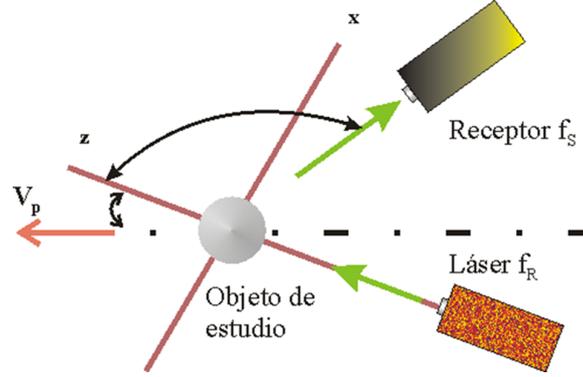


Figura 2. Efecto Doppler en configuración de un solo haz

La frecuencia de luz percibida por el detector estará determinada por la ecuación.²

$$f_S = f_R \frac{c - v_p \cos(\theta)}{c - v_p \cos(\theta + \alpha)} = f_R \frac{1 - \frac{\vec{v}_P \cdot \widehat{e}_R}{c}}{1 - \frac{\vec{v}_P \cdot \widehat{e}_S}{c}} \quad (6)$$

Donde \widehat{e}_S y \widehat{e}_R son los vectores directores de las ondas R y S.

Como la velocidad de la luz siempre será mucho mayor que la velocidad de la partícula, es decir $c \gg v_P$, la expresión 6 se puede aproximar a.

$$f_S \approx f_R + \frac{\vec{v}_P \cdot \widehat{e}_R}{\lambda_R} \quad (7)$$

Donde el desplazamiento en frecuencia Doppler respecto a la frecuencia incidente es.

$$f_D = \frac{\vec{v}_P \cdot \widehat{e}_R}{\lambda_R} \quad (8)$$

La detección directa fue el primer intento de medir desplazamientos con métodos no invasivos. Para determinar f_D se utiliza un análisis espectral directo de luz recibida por el detector mediante la utilización de un interferómetro Fabry-Perot.¹⁷

Otra forma de detección directa fue propuesta por Meyers y Lee.¹⁸ Consiste en utilizar las propiedades de absorción del yodo que transforma el desplazamiento Doppler en variaciones de intensidad de la señal. A este método se le denomina Doppler Global Velocimetry

El método de un solo haz no permite medir la componente de frecuencia Doppler de forma directa con un detector convencional. Además, se tiene el problema de resolver espectralmente desplazamientos en frecuencia tan pequeños: para las velocidades de fluidos típicas, los desplazamientos Doppler a detectar están en un margen desde los Hz hasta decenas de MHz . No obstante, que el método presentado por Jackson y Paul¹⁷ resuelve este problema, es un método bastante caro.

Para solventar las desventajas mencionadas anteriormente, surgió la idea de utilizar el concepto de interferencia, desarrollándose así los arreglos basados en 2 haces coherentes.

2.2 Caso de 2 haces coherentes.

El detalle común de estas técnicas de detección es la superposición de 2 haces coherentes, uno de señal H_S (esparcido por el objeto en movimiento) y otro de referencia H_R . El H_S sufre desplazamiento en frecuencia $\omega \pm \Omega_D$. Entonces al superponerse los haces tendremos el caso de interferencia de 2 ondas a distintas frecuencias temporales. El patrón de interferencia resultante no solo tendrá modulaciones periódica espacial, si no que también poseerá modulación temporal análoga al caso de modulación lineal de fase ecuación 3. Es decir el patrón de franjas se desplazara a la velocidad $v_F = \Omega_D/K$.

Experimentalmente la detección de frecuencia Doppler se realiza contando el número de franjas que “ ve ” el detector a través de un pinhole.

Existen 3 arreglos ópticos fundamentales para la detección de velocidades en configuración de 2 haces los cuales son.

1. Configuración de Haz de Referencia.
2. Arreglo Diferencial Doppler.
3. Arreglo Heterodino Diferencial Simétrico.

2.3 Configuración de Haz de Referencia.

En 1964 Yeh y Cummins⁸ demostraron que si iluminaban un fluido, con una fuente de luz (láser), utilizando la óptica adecuada, la señal dispersada a la salida del fotodetector contenía un desplazamiento Doppler y por lo tanto la información sobre la velocidad del fluido. La figura 3 muestra el esquema experimental de configuración de haz de referencia.

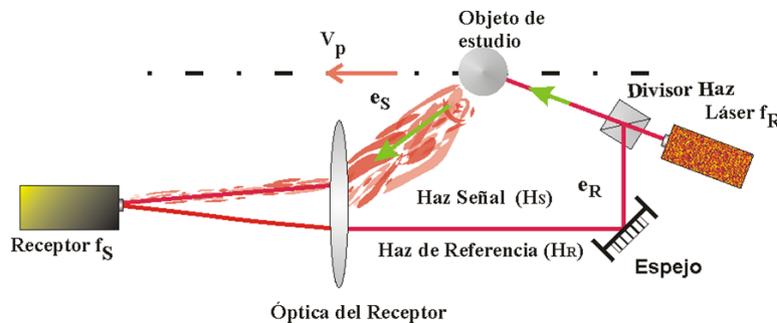


Figura 3. Detección de frecuencia Doppler en configuración de haz de referencia

El patrón de interferencia creado por la superposición de haces H_S y H_R , presentara un batido en frecuencia. A la entrada del receptor debido a su comportamiento no lineal se generara suma y diferencia de frecuencia. El armónico representado por la diferencia de las frecuencias contiene la información sobre la frecuencia Doppler. En este arreglo experimental la velocidad de la partícula no sólo dependerá de la de la frecuencia de la fuente sino que también de la posición del receptor. Esto se debe a que el haz que incide sobre la partícula en movimiento no es infinitamente pequeño, la abertura receptora estará limitada en tamaño, para limitar

el volumen de medida, y como consecuencia la razón señal a ruido sea pequeña. Esto limita grandemente el arreglo experimental, por la dependencia de los receptores a la intensidad de iluminación.

En la actualidad existen diferentes geometrías óptica basadas en esta configuración, como las presentadas por Foreman,⁹ las cuales fueron estudiadas por Dutrs^{19,20}

2.4 Arreglo Diferencial Doppler.

En el arreglo diferencial Doppler ambos haces (de señal y de referencia) pasan por el objeto en movimiento pero lo hacen con los ángulos distintos. Existen diferentes configuraciones como son las de Goldstein y Hagen,²¹ Pike²² y Melling.²³ El arreglo experimental típico está representado en la figura 4

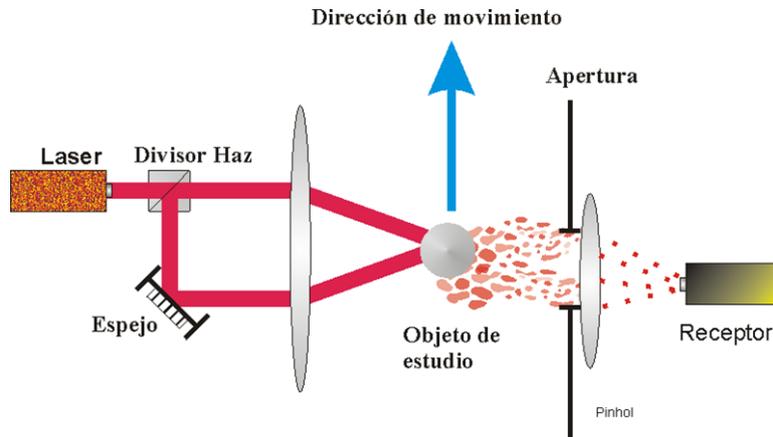


Figura 4. Esquema básico de una configuración diferencial Doppler.

Para este caso el vector director del haz de referencia coincide con el de de la señal . Por lo tanto la frecuencia Doppler recibida por el receptor es.²

$$f_D = f_{S2} - f_{S1} = \frac{\vec{v} \cdot (\hat{e}_{R2} - \hat{e}_{R1})}{\lambda_R} \quad (9)$$

Esta configuración tiene la ventaja de que la frecuencia a la salida del detector, depende exclusivamente del ángulo entre los haces incidentes 1 y 2, es decir, es independiente de la posición del detector. Lo cual supone que el ancho espectral de la señal será más pequeño que en el caso del haz de referencia y por lo tanto la resolución de la medida de velocidad será mejor. Además, los caminos ópticos de ambos haces recorren la misma distancia con lo que se minimizan los batidos debido a la longitud de coherencia finita de la fuente. Por otro lado, existe el problema de que el haz de referencia por el hecho de cruzar el fluido, cada vez que el volumen de medida crucen algunas partículas aparecerán fluctuaciones de la intensidad dispersada, generando a la salida del receptor batidos espurios indeseados, pudiéndose confundir con el batido principal, esto debido a que los haces interferentes no recorren el mismo camino óptico. Finalmente, para el caso de fluidos absorbentes esta configuración no será útil

2.5 Arreglo Diferencial Heterodino Simétrico.

Para mejorar las características de la configuración anterior basada en el haz de referencia de un haz en 1969 Stein y Pfeifer²⁴ y Penney,²⁵ presentaron el primer montaje de un sistema Láser Doppler Anemometry (LDA) mediante la configuración óptica Diferencial Doppler o de Doble Haz.

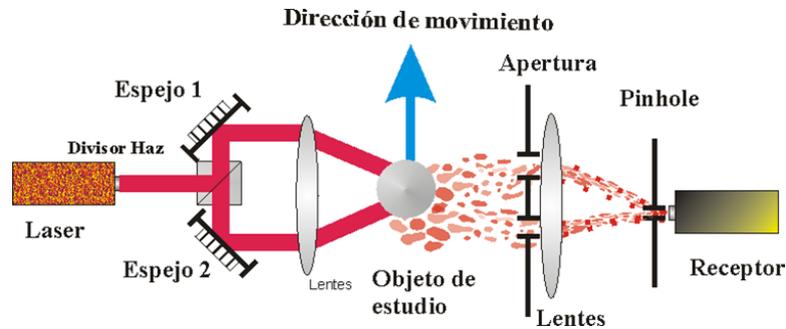


Figura 5. Esquema básico de configuración diferencial Doppler simétrica.

Esta configuración consiste como se puede apreciar en la figura 5 en un haz láser, el cual es dividido por un divisor de haz. Con una lente se focalizan los 2 haces al blanco a medir. El receptor podrá estar colocado delante o detrás del blanco a medir. La frecuencia Doppler la cual será la vista por el receptor es la misma que para el caso de diferencial Doppler. Como se aprecia en la figura 5, la medición no dependerá de la posición del receptor. Lo que genera señales con poco ancho de banda, dando por consecuencia una mejor resolución en frecuencia y por lo tanto un error menor al momento de medir la velocidad del blanco. Así mismo los problemas de coherencia espacial y temporal son minimizados, al hacer que los haces recorran el mismo camino óptico, y por consiguiente el batido de los haces será máximo.

En las aplicaciones de medida de velocidad de blancos sólidos las configuraciones diferencial y de haz de referencia permiten obtener relaciones señal a ruido similar, pero en el caso de detección de líquidos y/o gases, la relación señal a ruido del Diferencial Doppler va a ser mucho mejor. La razón de esto es que 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. 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 detectar más de una componente de la velocidad del blanco con algunas pequeñas modificaciones.

2.6 Análisis del efecto de Fuerza Foto Electromotriz con modulación periodica de fase

En la década de los 90's, se estudió el uso de rejillas dinámicas producidas por un patrón de interferencia que incide sobre un material fotoconductor, para determinar los parámetros de desplazamiento de los objetos (vibración). El efecto se basa en excitar corrientes en un material fotoconductor producido por la interacción entre la rejilla de fotoconductividad y la rejilla de

campo de carga espacial¹² a este efecto se conoce como el efecto de Fuerza Foto Electromotriz o Photo Electromotive Force.

Si consideramos un patrón de interferencia con modulación periódica de fase esta definido por la siguiente expresión.¹²

$$I(x) = I_0 [1 + m \cos (Kx - \Delta \sin (\Omega_P t))] \quad (10)$$

Se puede demostrar¹² que la corriente de primer armónico que fluye através de una muestra fotoconductorora esta dada por la expresión

$$j^{1P} = \frac{m^2 \Delta}{2} \sigma_0 E_D \frac{i \Omega_P \tau_{di}}{1 + i \Omega_P \tau_{di}} \quad (11)$$

La señal de foto-FEM en dependencia en frecuencia de modulación periódica de fase Ω_P se puede ver figura 6.

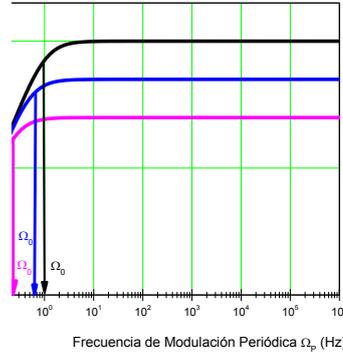


Figura 6. Dependencia de la señal de foto-FEM ac j^{1P} respecto a frecuencia de modulación periódica Ω_p para distintas intensidades promedio de iluminación.¹²

Como se observa en la figura 6 para bajas frecuencias de modulación periódica el crecimiento de la señal de foto-FEM es lineal hasta cierta frecuencia de corte Ω_0 después de la cual la señal se satura. Como se puede observar la frecuencia de corte $\Omega_0 \propto \tau_{di}^{-1}$. En la región independiente de la frecuencia $\Omega_P > \Omega_0$ la señal es proporcional a la intensidad, mientras que en la región $\Omega_P < \Omega_0$ de bajas frecuencias es independiente de la intensidad de iluminación. Cabe mencionar que si se toma en cuenta el tiempo finito de vida de los portadores aparecerá la segunda frecuencia de corte, después de la cual la señal decae linealmente.

La siguiente dependencia importante es la de corriente de foto-FEM versus amplitud de modulación. En caso general la dependencia funcional de la corriente está representada por el producto de funciones Bessel $J_0(\Delta)J_1(\Delta)$ como se observa en la figura 7.

En caso de amplitudes de modulación pequeñas ($\Delta < rad$) la señal de foto-FEM depende linealmente de la amplitud de modulación. El primer máximo se presenta cuando $\Delta = 1rad$, después la señal decaerá también de forma lineal hasta alcanzar un máximo negativo. Por último

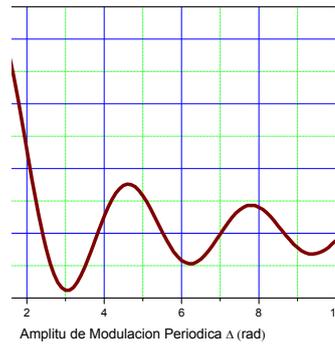


Figura 7. Dependencia de la señal de foto-FEM ac j^{1P} respecto a amplitud de modulación periódica Δ para distintas intensidades promedio de iluminación I_0 .¹²

se muestra en la figura 8 la dependencia de la señal de foto-FEM respecto la frecuencia espacial K .

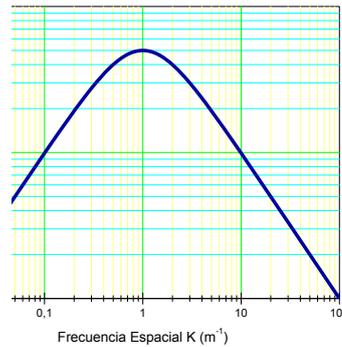


Figura 8. Dependencia de la señal de foto-FEM ac j^{1P} respecto a frecuencia espacial K .¹²

Como se puede observar, al incrementar la frecuencia espacial K , la señal de foto-FEM crecerá linealmente hasta alcanzar un máximo. Después del máximo, la respuesta es un decaimiento también lineal.

El efecto de foto-FEM para el caso de modulación periódica, tiene aplicaciones en detección de vibraciones mecánicas;^{11,12, 30,31,32,33,34} además de detección de ultrasonido;^{11,35,36} en comunicaciones ópticas;^{11,37} análisis espectral;^{11,38,39} en aplicaciones aerodinámicas y mecánica de fluidos;^{11,40,41,42} amarre de fase de los laceres independientes etc.¹¹ Estas aplicaciones son posibles gracias a características de adaptabilidad del efecto. Debido a que su función de transferencia (Figura 6) es como de un filtro pasa altas, el sistema de detección es insensible a ruidos ambientales, i.e. el detector se adapta a los cambios lentos de fase. Además, el sistema funciona con los frentes de onda complicados, incluyendo speckle; la alineación del sistema óptico es sencilla; y por último el costo comercial potencial es bajo.

3. CONCLUSIONES Y TRABAJO A REALIZAR

En este trabajo se hizo una revisión bibliográfica de las técnicas ópticas en la determinación de parámetros físicos. Esta revisión sustenta que las técnicas ópticas no invasivas son una alternativa viable a utilizar en la biología, de manera particular en la caracterización de frutos y semillas.

El trabajo que se tiene que realizar para aplicar estas técnicas ópticas, para la caracterización de frutos y semillas son:

- Realizar las simulaciones pertinentes para predecir los resultados experimentales a obtener.
- Proponer las técnicas ópticas, a utilizar para la caracterización no invasiva de frutos y semillas.
- Proponer los arreglos experimentales correspondientes a utilizar así como la metodología de medición.
- Realizar el trabajo experimental. Comparar los resultados experimentales con los resultados teóricos.

REFERENCES

1. Yoshizawa T. (Editor), "Handbook of Optical Metrology, Principles and Applications", *CRC Press*, 2009.
2. Garca D., "Sistema lser de medida de velocidad por efecto Doppler de bajo coste para aplicaciones industriales e hidrodinmicasm" *Tesis doctoral, Universidad Politcnica de Catalua, Barcelona Espaa*, (2005)
3. Smedley G., Kay-Pong Y., Warner A., Dubovistsky S. and Marsh D. "A laser Doppler instrument for in vivo measurements of blood flow in single renal arterioles". *IEEE Transactions on Biomedical Vol 40 n. 3.*, Pages 290-298, (Marzo 1993)
4. Marsh D and Osborne J. Cowley. "Fluctuation in arterial pressure and the regulation of renal blood flow in dogs." *American Journal of Physiology. Vol 258 (renal fluid electrolyte physiology, vol 27)* Pages 13394-1400, (1990).
5. Kolari P. "Penetration of unfocused laser light into skin". *Arch Dermatol. Res. Vol 277*, pages 342-344, (1985).
6. Becker S., Durt F. and Lienhart H. "LDA Systema for in flight local velocity measurements on airplane wings". *In proceedings of the 18th international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities*, pages 25/1-25/7. Toulouse, France, june (1999).
7. Lehmann B. and Mante J. "Application of laser-Doppler scanning technique to the unstable flow field of a heated jet". *In proceeding of the 13th international congress on instrumentation in aerospace simulation facilities.*, Gttingen, Germany. (Sept 1989)
8. Sorrienda Ferrando, M. J., "Procesado y optimización de espectros Raman Mediante Técnicas de Lógica Difusa; Aplicaciones en la Identificación de Materiales Pictóricos." *Tesis Doctoral, Departament de Teoria del Senyal i Comunicacions Universitat Politècnica de Catalunya Capitulo 1* (2008)

9. Skoulika, S. G., Georgiou, C. A., "Rapid, noninvasive quantitative determination of acyclovir in pharmaceutical solid dosage forms through their poly [vinyl chloride] blister package by solid-state Fourier transform Raman spectroscopy *Applied spectroscopy* Vol. 57, p.p. 407-412, (2003).
10. Nordon, A., Mills, A., Burn, R. T., Cusick, F. M., "Littlejohn, D. Comparison of non-invasive NIR and Raman spectrometries for determination of alcohol content of spirits *Analytica Chimica Acta* Vol. 548, p. p. 148-158, (2005).
11. Armenta Estrela, S., "Desarrollo De Aplicaciones Cuantitativas De La Espectrometría Vibracional Para El Control De Calidad" *Departamento De Química Analítica* Universitat de Valencia (2007).
12. Stepanov S. "Handbook of advanced electronic and photonic materials and devices". *Two volume set*, H.S. Nalwa, (2001).
13. www.wikipedia.com
14. Hecht E. "óptica". *Pearson Addison Weley*, Tercera edicin (2003).
15. Malacara D. "óptica bsica". *Fondo para la cultura econmica*, Segunda edicin (2004).
16. Martinez J. "Aplicaciones del efecto Doppler" *Tesis de licenciatura*, INAOE Mxico (1974)
17. Jackson D. Paul M. "Measurement of hypersonic velocities and turbulence by direct spectral analysis of Doppler shifted laser light". *Applied Physics Letters*. Vol. 32 A(2). Pages 77-78 (Junio 1970).
18. Meyers J. and Lee J. "Three component Doppler global velocimeter measurements of flow adobe a delta wing". *In proc of the 6TH Int. Symp Lisbon*. Pages 345-362. Portugal (Julio 1992)
19. Durst F. and Whitelaw H. "Optimization of optical anemometers". *In proc. of the Royal Society of London*. Vol 324. Pages 157-181 (London. 1971)
20. Dusr F., Melling A. and Whitelaw H. "Priciples a practices of lser doppler anemometry". *Academic Perss*, (London, 1976)
21. Goldstein R., and Hagen R. "Turbulent flow measurements utilising the doppler-shift of scattered laser radiation". *Physics Fluids, Volumen 10*. Page 1349. (1967).
22. Pike E. Jackson E. Burke P. Page D. "Measurements of turbulent velocities from the Doppler-shift in scattered laser-light". *Journal of Scient Instrument*. Vol 2. Page 103-107. (1988)
23. Melling A. "The laser-Doppler shift technique and hot wire anemometry: a comparacin". *University of London*. (1970).
24. Stein H. and Pfeifer. "A Doppler differences method for velocity measurements". *Metrologa Vol 5(2)*. Pages 59-61. (1969).
25. Penney C. "Diferencial Doppler velocity measurements". *IEEE Journal of Quamtum Electronics*. Vol qe-5. pages 318. (June. 1969)
26. Wang C.P. "Unified Analisis on laser doppler velocimeters" *Journal of Physic E: Scientific Instruments Vol 5* page 763-766 (1972)
27. McKelvey J.P., "Fsica del estado slido y de semiconductores". *Limusa*, (1992)
28. Yeh P., Gu C., "Landmark papers on photorrefractive nonlinear optics". *World Scientific* (1995)
29. Petrov M., Stepanov S., and Trofimov G. "Time varying emf in a nonuniformly illuminated photorefractive crystal" *Sov. Physic Solid State Letters 12*. Page 379-481. (1986)
30. Marshall R., Sokolov A., Ning Y., Palmer A., and Grattan K. "Photo-electromotive force crystals for interferometric measurement of vibrational response". *Electronic Journal*. Septiembre (1996)
31. Stepanov S., Sokolov I., Trofimov G., Vlad V., Popa D. and Apostol I. "Measuring vibration amplitudes in the picometer range using moving light gratings in photoconductive GaAs:CR". *Optics Letters 15. 21*. Page 1239-1241. (1990)

32. Wang CC., Trivedi S., Jin F., Elliott G., Tse S., Rodriguez P., Stepanov S., Meyers J., and Lee J. "From pulsed laser vibrometer to optical Doppler velocimeter, Laser metrology using Photo-EMF sensors". *Paper AIAA. 2004-547*. January (2004)
33. Rodriguez P., Trivedi S., Wang CC., Stepanov S., Elliott G., Meyers J., Lee J. and Khurgin J. "Pulsed-laser vibrometer using photoelectromotive-force sensors". *Applied Physics Letters 83*. Page 1893-1895, (2003)
34. Castillo J. "Optimización de un fotodetector adaptivo de GaAs basado en el efecto foto-fem, para aplicaciones de detección de ultrasonido". *Tesis doctoral. INAOE*. (2003)
35. Bello M. "Implantación de un sistema interferométrico para la calibración de transductores de ultrasonido". *Tesis de maestría. INAOE*. (Septiembre 2005)
36. Celis M. "Compensación de fluctuaciones de polarización usando fotodetectores adaptivos Photo-EMF de GaAs para aplicaciones en sistemas de comunicaciones ópticas coherentes" *Tesis doctoral INAOE* (2001)
37. Wang CC. and Davidson F. "Optical spectrum analyzer of a new design". *Optics Letters 20, 9*. Page 1035-1037. (1995)
38. Wang CC. and Davidson F. "Optical spectral analysis using moving space-charge field effects in photoconductive semiconductors" (*Journal of the Optical Society of America* 13, 7) Page 1376-1383. (1996)
39. Wang CC, Davidson F and Trivedi S, "Simple laser velocimetry that uses photoconductive semiconductors to measure optical frequency differences". *Applied Optics 34, 28*. Page 6496-6499. (1995)
40. Wang CC., Trivedi S., Jing F., Jia K., He H., Elliott G., and Khurgin J. "High-precision measurement of optical frequency differences between q-switched laser pulses using photo-electromotive-force sensors". *Journal of the Optical Society of America b 19, 2*. Page 177-182, (2002)
41. Davidson F., Wang CC., Field C. and Trivedi S., "Photocurrents in photoconductive semiconductors generated by a moving space-charge field". *Optics letters 19, 7*. Page 478-480. (1994)
42. Boguszko M., Elliott G., Wang C.C., Trivedi S., Tse S., Meyers J. and Lee J. "Fluid flow Doppler velocimetry using adaptive photo-induced electromotive force detectors". *43rd Aerospace sciences meeting and exhibit*. Pages 10-13