

ESTUDIO DE VIBRACIONES SUPERFICIALES EN MEDIOS VISCOELASTICOS UTILIZANDO UN METODO DE DEFLEXION OPTICO.

I. MOTIVACION

Actualmente en nuestro laboratorio se cuenta con una adaptación del método de Schlieren¹ para medir ópticamente las vibraciones superficiales de sólidos viscoelásticos². El principal problema de los sólidos blandos es que difunden mucha luz con lo cual es difícil observar la variación de fase de la luz a través del método de Schlieren. En este trabajo se propone un nuevo método capaz de medir vibraciones en sólidos blandos. Se compararán los resultados con los obtenidos a través de una medida por ultrasonido, la cual se asumirá como patrón oro. Luego se comparará la eficacia de este método con la de un sensor acústico de bajo costo. En ambos casos se encontró coincidencia entre las medidas acústicas y ópticas.

Este método abre las puertas a posibles aplicaciones en medicina a través de la medida de la velocidad de ondas de pulso. También podría ser una posible técnica de detección de defectos superficiales.

II. TEORIA

II.1 SUPERFICIE ESPECULAR

Este es un método muy sencillo para obtener información óptica de la vibración de una superficie. Es condición necesaria que la superficie del cuerpo refleje buena parte de la luz incidente, y es deseable que la calidad de la superficie sea “especular”, es decir ópticamente pulida.

Si este es el caso, la configuración experimental más simple se muestra en la Figura 1. Un láser L hace incidir un haz de luz normalmente a la superficie “a” reflectante del cuerpo a estudiar M. Las perturbaciones de la superficie se producen mediante un emisor de ondas E (frecuencia ≈ 100 Hz). Un divisor de haz BS desvía la luz reflejada hacia una pantalla S. En condiciones de no perturbación, la luz reflejada incide en el punto 0 de la pantalla. Cuando la superficie en la zona de estudio recibe una perturbación, se inclina un ángulo α (superficie “b” de la figura) y el haz reflejado se

deflecta en un ángulo 2α . Esto lleva a que el punto luminoso en la pantalla S se desplace una cantidad y , relacionada con el ángulo de deflexión de la superficie en la forma

$$\tan 2\alpha = \frac{y}{h+l} \quad (1)$$

Donde h es la distancia entre la superficie y el divisor de haz, y l es la distancia entre éste y la pantalla. En la práctica los ángulos suelen ser muy pequeños, con lo que la expresión (1) permite despejar el ángulo de deflexión α en la forma

$$\alpha(t) \approx \frac{1}{2} \frac{y(t)}{h+l} = q \cdot y(t) \quad (2)$$

En esta expresión se ha explicitado la dependencia temporal de la deflexión de la superficie, y se ha introducido un *factor de calibración* del sistema definido como

$$q = \frac{1}{2(h+l)} \quad (3)$$

Cuanto menor es este factor de calibración q , mayor es la sensibilidad del sistema, obteniéndose mayores valores del desplazamiento y en pantalla para menores ángulos α . Los valores de pueden ser registrados con un array de fotodiodos o filmados con cámara de video, a un adecuado número de imágenes por segundo.

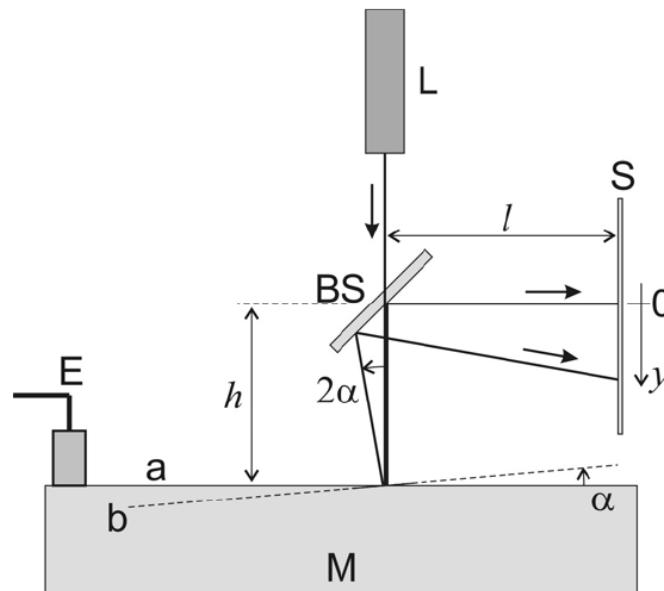


Figura 1 Sistema para detectar el movimiento de una superficie mediante la deflexión de un haz de luz reflejado en ella.

Si consideramos en la Figura 1 un eje de propagación x de izquierda a derecha para las ondas de superficie en esa dirección, los desplazamientos verticales z se podrán expresar como una función. Los ángulos α de inclinación de la superficie perturbada cuando son pequeños están aproximados por

$$\alpha(x,t) \approx \frac{\partial z}{\partial x} \quad (4)$$

Nuestro objetivo es obtener la función de los desplazamientos sobre la superficie de prueba a partir de las mediciones de los desplazamientos del punto luminoso sobre la pantalla S de la Figura 1.

Las relaciones (2) y (4) vinculan la pendiente de la superficie en el punto x de la dirección de propagación de la onda con el desplazamiento y del punto luminoso observado en la pantalla S de la Figura 1, en la forma

$$\frac{\partial z}{\partial x} = q \cdot y(t) \quad (5)$$

La perturbación $z(x,t)$, está dada como un paquete de ondas

$$z(x,t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) \exp[jk(\omega) \cdot x - j\omega t] d\omega \quad (6)$$

Donde se debe conocer la relación de dispersión $k(\omega)$, pero se ignora la distribución de amplitudes $A(\omega)$ que permite construir el paquete $z(x,t)$.

Sustituyendo esta expresión en (5) tenemos

$$q \cdot y(t) = j \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega) A(\omega) \exp[jk(\omega) \cdot x - j\omega t] d\omega \quad (7)$$

Podemos simplificar las expresiones (6) y (7) sin pérdida de generalidad si suponemos que el punto de la superficie analizado es el origen $x=0$. Evaluando las expresiones (6) y (7) en el origen, haciendo la transformada inversa de Fourier obtenemos

$$A(\omega) = -\frac{j}{2\pi} \frac{q}{k(\omega)} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) \exp[j\omega t] dt \quad (8)$$

Sustituyendo esta expresión en (6) obtenemos el campo $z(x,t)$, de los desplazamientos de superficie a partir de los desplazamientos del punto luminoso reflejado sobre la pantalla S de la Figura 1.

$$z(x,t) = -j \frac{q}{2\pi} \iint y(t') \frac{\exp[jk(\omega).x]}{k(\omega)} \exp[-j\omega(t-t')] d\omega \quad (9)$$

El origen de coordenadas $x=0$ en la expresión (9) es elegido en el punto de la superficie en el que se refleja la luz en la Figura 1.

Si el pulso producido es quasi-monocromático con frecuencia Ω entonces la vibración $y(t)$ del punto luminoso en la pantalla se pueda poner como

$$y(t') = y_o \exp(-j\Omega t') \quad (10)$$

Al sustituir (10) en (9) obtenemos

$$z(x,t) = -jq \frac{y_o}{K} \exp(jKx - \Omega t) \quad (11)$$

Donde se ha puesto $K=k(\Omega)$. Tomando partes reales de (10) y (11) tenemos que si la señal óptica en la pantalla S de la Figura 1. es de la forma

$$y(t) = |y_o| \cos(\phi - \Omega t) \quad (12)$$

Entonces el campo de desplazamientos verticales z de la superficie en estudio es de la forma

$$z(x,t) = q \frac{|y_o|}{K} \sin(Kx - \Omega t + \phi) \quad (13)$$

En (13) el número de onda es $K=\Omega/c$, siendo c la velocidad de propagación para las ondas de superficie de frecuencia Ω .

II.2 SUPERFICIE DIFUSORA

La superficie de los geles no es lo suficientemente especular como para utilizar el arreglo de la Figura 1. Debido a que la luz reflejada se difunde, es necesario utilizar una lente convergente colectora de luz para obtener una mancha luminosa lo suficientemente pequeña sobre la superficie S y así poder registrar su movimiento. La lente se coloca entre la superficie del cuerpo y el divisor de haz BS de la Figura 1. Su finalidad es obtener una imagen real del punto de la superficie en estudio.

Esta imagen real debe caer próxima a la pantalla S pero no directamente sobre la propia pantalla. Esto es debido a que el punto de la superficie en estudio tiene pequeños desplazamientos verticales y despreciables movimientos horizontales. Entonces su imagen real tampoco se desplaza.

En la Figura 2 se muestra un esquema de la función desempeñada por la lente utilizada para coleccionar luz. Para simplificar el análisis se ha omitido el divisor de haz BS de la Figura 1, cuya única función es desviar en 90° la luz reflejada.

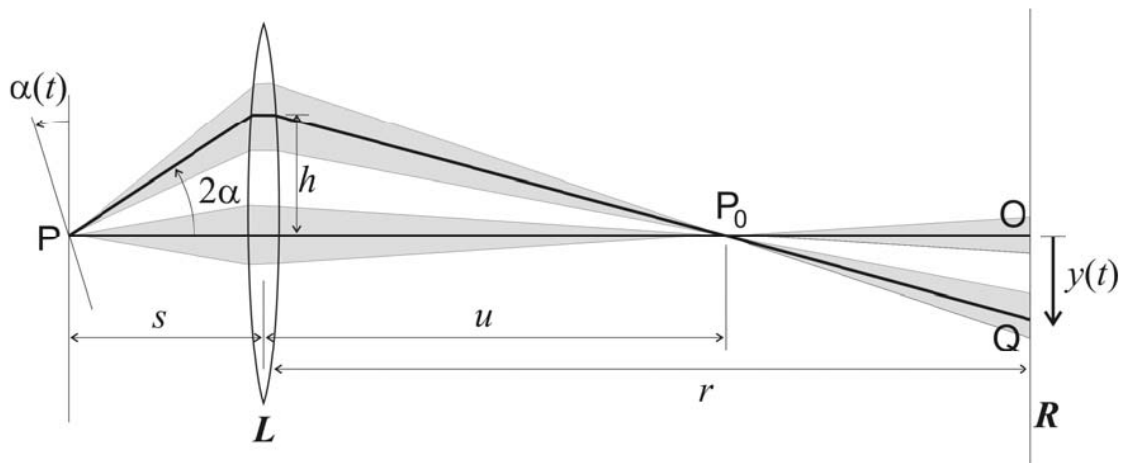


Figura 2 Utilización de una lente coleccionadora de luz cuando la superficie reflectora no es especular.

La lente convergente L tiene una distancia focal f y se coloca a una distancia $s > f$ de la superficie tal que forme a una distancia u de la lente una imagen real P_0 del punto P. Cuando la superficie gira un ángulo α , el rayo principal del haz de luz difundido desde el punto P gira un ángulo 2α como se muestra en la Figura 2 pero la imagen real P_0 no se mueve. Si la pantalla R se coloca a una distancia $r > u$ de la lente, mostrará una mancha luminosa centrada en el rayo principal. Esta mancha se moverá una distancia y que está relacionada con el ángulo α de deflexión de la superficie. Utilizando las relaciones geométricas que se observan en la Figura 2 y asumiendo, como antes que $1 \ll \alpha$ obtenemos una relación lineal entre este ángulo y la desviación y sobre la pantalla, de la misma forma que la expresión (5) pero con el factor de calibración

$$q = \frac{u}{2s(r-u)} \quad (14)$$

III. CALIBRACION CON ULTRASONIDO

En esta sección se validará el método de deflexión del haz (óptico) utilizando el ultrasonido (US) como patrón oro. Para esto se montará un montaje experimental

combinando el de la Figura 1 junto con el de la Figura 2, ya que como cuerpo a estudiar (M) se utilizará un gel a base de gelatina (3% disuelto en agua). Se obtendrá $y(t)$ mediante el método óptico. Se sustituirá luego el láser por un transductor de US. Mediante un algoritmo de correlación se seguirá el movimiento del eco de la superficie, obteniéndose $z(x=0,t)$. Se compararon ambas señales utilizando la ecuación (5) obteniéndose buena concordancia.

III.1 DESCRIPCION DE LA MEDIDA OPTICA

Para realizar la medida óptica se utilizará una combinación de los montajes experimentales descritos en la Figura 1 y en la Figura 2 ya que como cuerpo a estudiar se utilizará un gel a base de gelatina (3% disuelto en agua) y este tiene la propiedad de difundir luz. El gel tiene la importancia de ser un medio visco-elástico que mimifica las propiedades de un tejido biológico. En el montaje experimental mostrado en la Figura 3 se utiliza un shaker como emisor de ondas de baja frecuencia (E). Este es controlado por un generador de ondas arbitrario (Tektronik AFG 3021). Es este generador quien esta a su vez esta sincronizado con un emisor de pulsos (HP 8114A) quien se encarga de controlar la cámara digital (Pixel link) con la cual se filmará el movimiento de la mancha luminosa proyectada en la pantalla (S). Cuando la vibración sea emitida a través del shaker, el emisor de pulsos enviará un tren de pulsos a la cámara, por cada pulso se adquirirá un cuadro. Por lo tanto controlando el numero de pulsos se controlará el numero de cuadros, controlando la frecuencia de repetición de pulsos de controlará la frecuencia de muestreo. Esta frecuencia de muestreo depende del tiempo de exposición de la cámara así como del tamaño del cuadro a adquirir. Cuanto menor sea el tiempo de exposición y menor la región de interés mayor es la frecuencia de muestreo. Se lograron obtener frecuencias de muestreo de hasta 700 Hz. Como emisor de luz se utilizó un láser de helio-neón de 4mW de potencia (Oriel Corporation). El lente (L) colector de luz tiene una distancia focal de 10 cm.

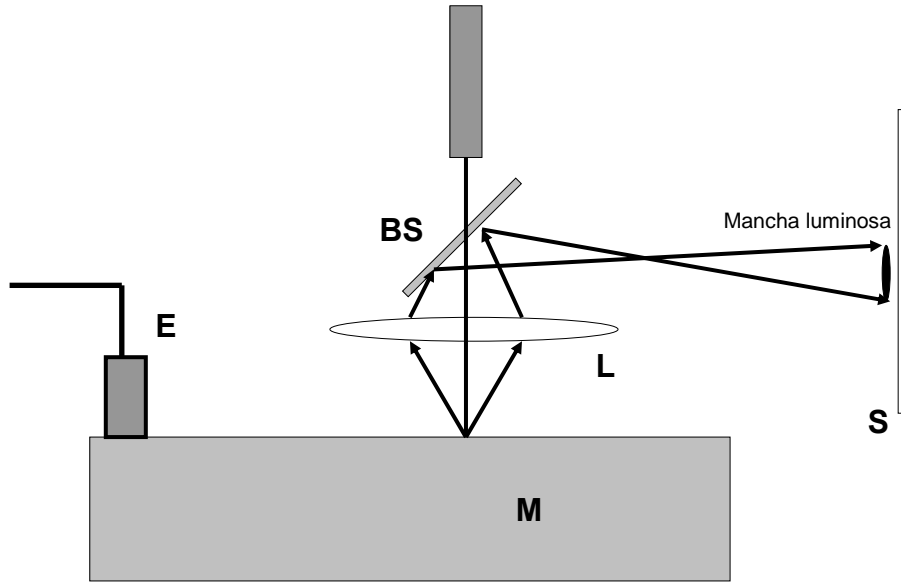


Figura 3 Esquema del montaje experimental utilizado para el estudio óptico de la vibración superficial de un gel.

Tratamiento de datos

Una vez obtenida la película del movimiento de la mancha luminosa se procede a calcular $x(t)$ e $y(t)$ ya que el movimiento de la superficie raramente es unidimensional. Para ello se utilizará el siguiente algoritmo: se asumirá como punto más representativo de la mancha luminosa el “centro de masas” de esta. Esto quiere decir que se hará un promediado bidimensional utilizando como función de densidad de probabilidad la intensidad de la imagen. Para esto se diseñó un software el cual calcula el valor medio de intensidad del fondo de la imagen (donde no está la mancha) y su desviación estándar. Se asumirá como luz proveniente de la superficie todo aquello que supere en intensidad una determinada tolerancia la cual será cuantificada en cantidad de desvíos estándar es sobre esta mancha que se calculará el centro de masas.

$$tol = \bar{I}_{BG} + N \cdot \sigma_{BG} \quad (15)$$

Es a partir de esta imagen filtrada que se calculará promediado bidimensional cuadro a cuadro.

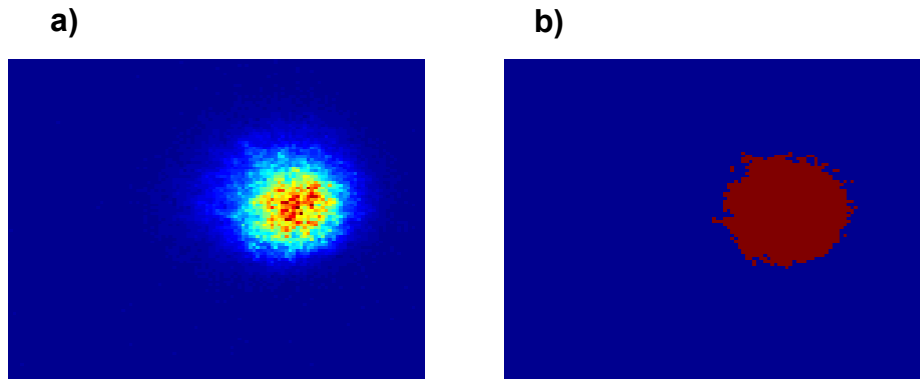


Figura 4 a) Cuadro adquirido a través de la cámara digital. b) Misma imagen luego de utilizar el algoritmo con una tolerancia de $N=40$ desviaciones estándar donde en rojo se muestra la mancha seleccionada.

Una vez seleccionada la zona se realiza el promediado. Este proceso se repite cuadro a cuadro obteniéndose los desplazamientos tanto verticales como horizontales.

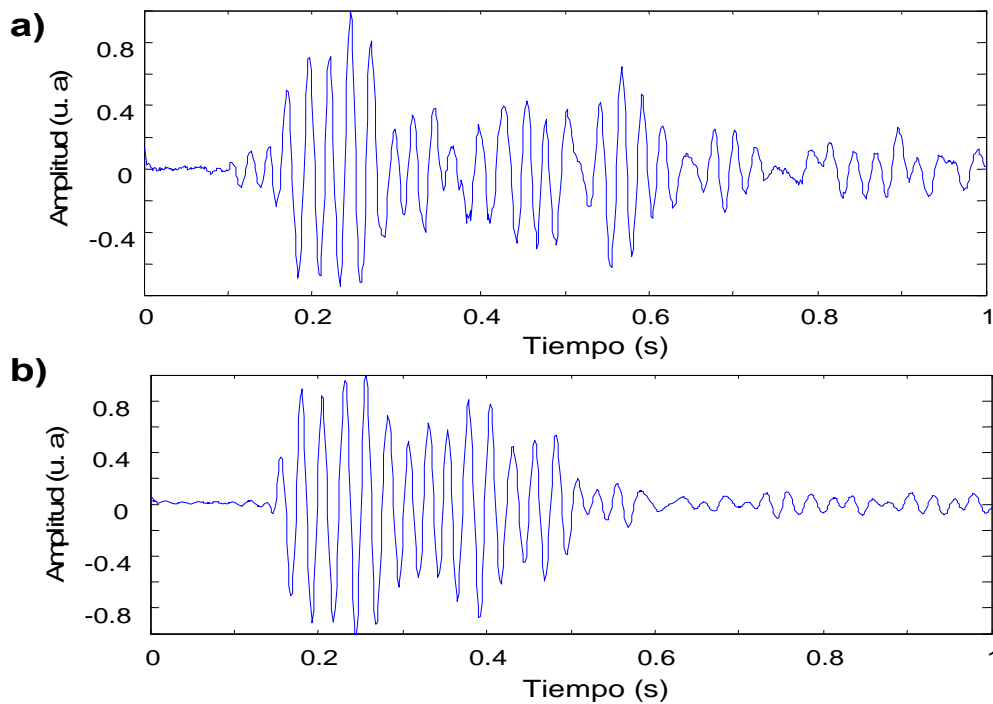


Figura 5 Desplazamientos del punto luminoso para una perturbación de cinco ciclos de senoide de 40 Hz de frecuencia. a) Desplazamientos en la dirección perpendicular a la propagación de la perturbación (eje x). b) Desplazamientos en la dirección de propagación.

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para una perturbación de cinco ciclos de senoide de una frecuencia de 40 Hz. Se excitó el medio con una barra de forma tal de crear ondas planas en la cercanía del punto luminoso. La dirección de propagación se buscó que sea perpendicular a la pantalla por lo que se espera que los

desplazamientos verticales ($y(t)$) sean mucho mayores que los horizontales ($x(t)$). Esto es lo que se observa en la Figura 5 si se compara con el nivel de ruido.

Para verificar que la frecuencia es la misma se calculó el espectro de ambas señales (Figura 6) teniéndose en ambos casos una frecuencia central de 40 Hz como era de esperar. Ya que el campo acústico está dominado principalmente por ondas de Rayleigh³ (a pesar de la presencia de ondas de volumen) que no son dispersivas y es lo que uno esperaría a partir de la ecuación (12). Es en esta figura donde se observa también que el movimiento en el eje perpendicular a la propagación es más ruidoso ya que ese ruido resulta en un espectro menos “limpio”.

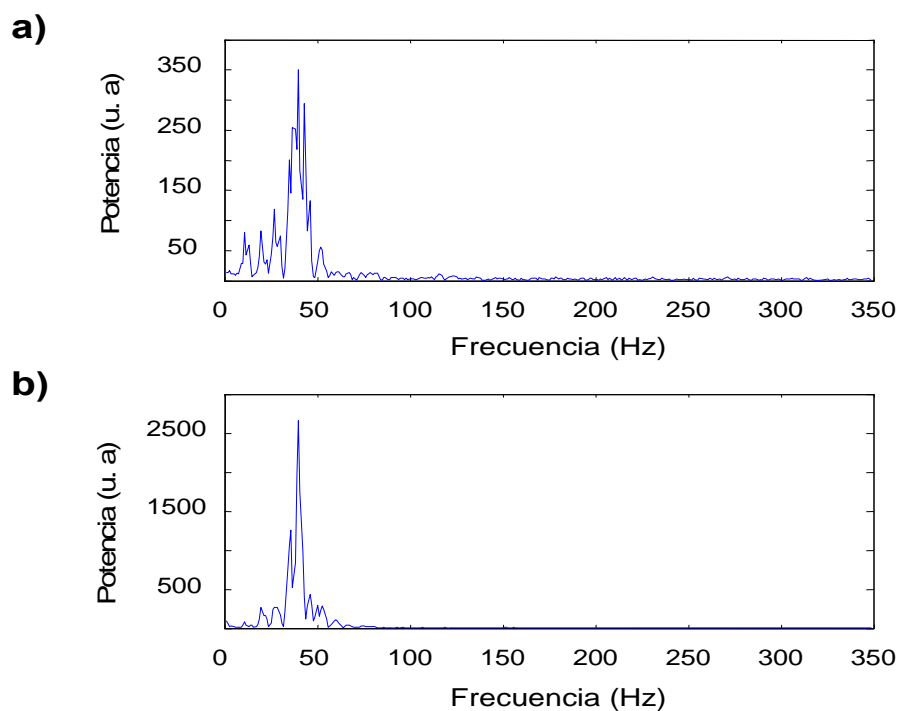


Figura 6 a) Espectro para los desplazamientos en la dirección perpendicular a la dirección de propagación. b) Espectro para los desplazamientos en la misma que la de propagación.

III.2 DESCRIPCION DE LA MEDIDA ACUSTICA

Utilizamos el US como patrón oro y para corroborar la teoría. Es decir por ultrasonido obtenemos una medida de los desplazamientos. Esta señal se compara con la obtenida a partir del método óptico de las ecuaciones (4) y (12) que relacionan derivada espacial de los desplazamientos con la señal obtenida ópticamente.

Para realizar la medida acústica de los desplazamientos se utiliza el mismo montaje experimental que para la medida óptica. Se retira el separador de haz y el láser y en su lugar se coloca un transductor de 10 MHz de frecuencia central PANAMETRICS V-

312. El transductor se coloca sobre el mismo punto que el punto luminoso del láser, perpendicular a la superficie de la muestra. Se busca la perpendicularidad maximizando el eco proveniente de la superficie del gel. Como medio acoplante entre el transductor y el gel se utiliza una capa de agua. La barra del shaker se mantiene en la misma posición.

Como emisor receptor de ultrasonido se utilizó el equipo CORELEC (Francia). Cada A-Scan es muestreado a una frecuencia de 40 MHz con una frecuencia de repetición de 1 kHz. Este emisor receptor está sincronizado con el generador de ondas arbitrario.

Para obtener el movimiento de la superficie del gel se sigue el movimiento del eco de la superficie mediante correlación⁴.

III.3 RESULTADOS Y DISCUSION

A continuación se compararán las mediciones ópticas con las acústicas. En este caso se enviaron 10 ciclos de senoide con una frecuencia de 60 Hz. La cámara registró a una frecuencia de 350 Hz.

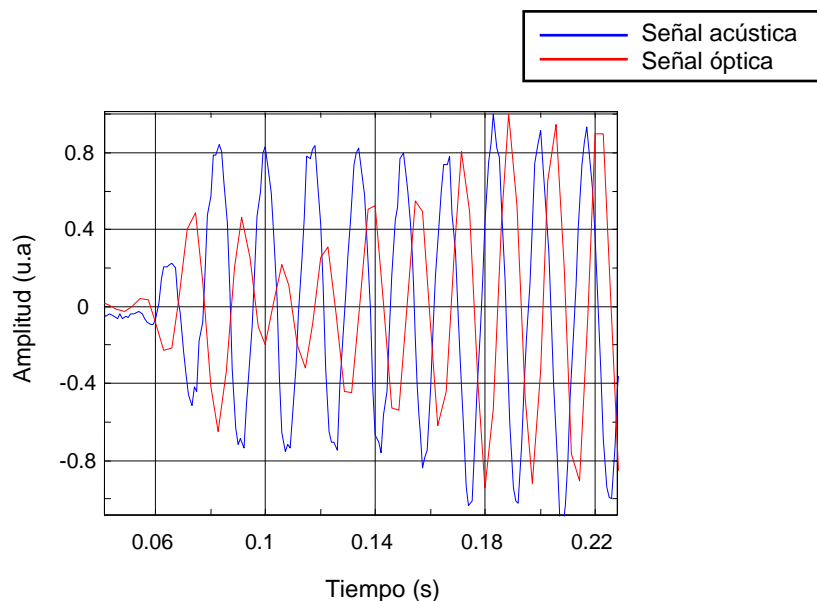


Figura 7 Comparación entre las señales ópticas y acústicas. Se observa a partir de 0.14 s un desfase de $\pi/2$.

En la Figura 7 se observa a partir de 0.1 segundos aproximadamente un desfase de $\pi/2$, ya que los máximos de la señal acústica coinciden con los ceros de la señal óptica. Esto es exactamente lo que prevé la teoría en las ecuaciones (12) y (13). Por ultrasonido se obtiene el desplazamiento de la superficie en un punto, mientras que ópticamente obtenemos la derivada espacial evaluada en un punto en función del tiempo. Si la señal es sinusoidal, derivando la señal óptica nuevamente deberíamos de obtener la señal

acústica, esto es lo que se muestra en la Figura 8. Se observa una excelente coincidencia entre ambas señales. Con este último resultado se concluye que mediante el método óptico se obtienen los mismos resultados que utilizando ultrasonido.

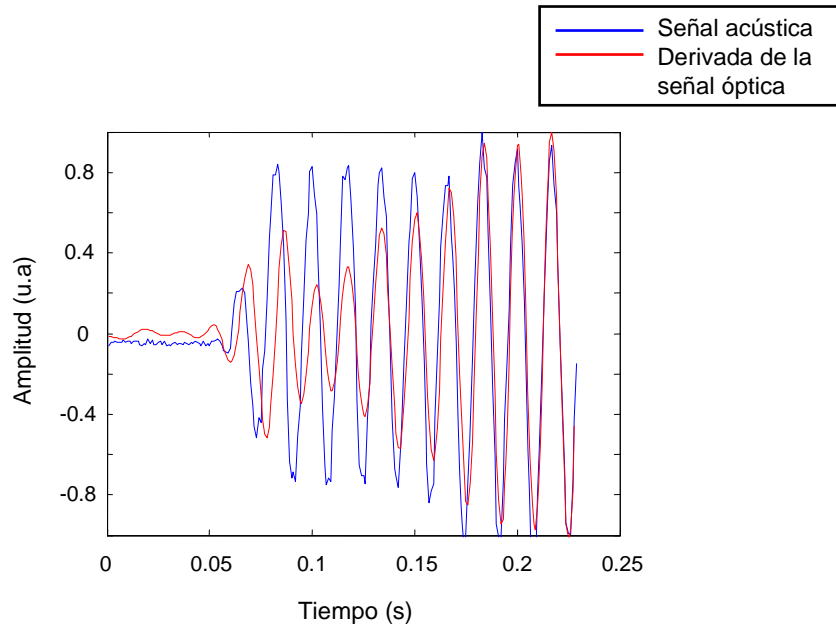


Figura 8 Comparación entre la señal acústica y la derivada de la señal óptica. Se observa una excelente coincidencia como indica la teoría.

III.4 CONCLUSIONES

Como primera conclusión se puso a punto un método óptico para poder medir vibraciones en superficies de medios viscoelásticos. Se utilizó ultrasonido como patrón oro obteniéndose por ambos caminos los mismos resultados.

El método óptico presenta sobre el acústico varias ventajas, la primera es su bajo costo. Para hacer la medida acústica es necesario un emisor-receptor de ultrasonido capaz de almacenar en memoria un conjunto de A-Scans. A su vez es necesario un transductor ultrasonoro de mediana frecuencia (> 5 MHz). En cambio para el método óptico solamente es necesario un láser, un lente, un separador de haz y una cámara digital cuyo precio es mucho menor al de un emisor-receptor ultrasonoro.

La segunda ventaja fue mostrada en la Figura 5, el método óptico es capaz de medir los desplazamientos en dos dimensiones mientras que acústicamente se obtienen solamente los desplazamientos normales al haz ultrasonoro.

La última ventaja es que no se necesita un medio acoplante para la medida óptica. En el caso del ultrasonido se utilizó agua como acoplante.

IV. COMPARACION CON UNA MEDIDA ACUSTICA DE BAJO COSTO

En el apartado anterior se comparó el método óptico con la medida por ultrasonido. En esta sección del trabajo se comparará el método óptico con una medida acústica utilizando un sensor piezoeléctrico de superficie. La ventaja de este sensor en comparación con el ultrasonido es que su implementación es de bajo costo, ya que el precio del sensor es bajo y para adquirir la señal es necesario solamente un osciloscopio.

IV.1 DESCRIPCION DE LA MEDIDA ACUSTICA

El concepto de trabajo es el mismo que en el apartado III. La idea es realizar la medida óptica y luego se coloca en lugar del láser el sensor de superficie (Murata PKS1-4A). Se busca que el haz del láser quede en el centro del sensor cuyo diámetro es de 2 cm. La adquisición de la señal acústica es realizada a través de un osciloscopio HP 54520A a una frecuencia de muestreo de 500 Hz. Este está sincronizado con la emisión del pulso de baja frecuencia a través del generador de pulsos arbitrario HP 33120A. Para esta serie de medidas se enviaron como excitación cinco ciclos de seno a una frecuencia de 50 Hz. La cámara adquirió a una frecuencia de 700 cuadros por segundo.

IV.2 RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura 9 se muestra una comparación entre la señal óptica y la acústica. Se observa una gran similitud entre ambas señales. Cabe destacar que la señal acústica aparenta más ruidosa, esto tiene explicación en que el contacto con la muestra debe ser bueno. En este caso se buscó que sea lo mejor posible pero no se pudo eliminar esa componente ruidosa.

Si se observa con detalle ambas señales se puede observar un desfase. Se midió la distancia entre la barra excitadora y el punto luminoso del láser correspondiente a 15 cm. A partir de la gráfica se puede estimar el tiempo de vuelo de la onda de superficie, siendo este de aproximadamente 148 ms. Esto arroja una velocidad de la onda de superficie de aproximadamente 1 m/s. El desfase ΔT calculado a partir de la Figura 10 es de 7.5 ms. Esto implica que a una velocidad de 1 m/s este desfase corresponde a una distancia de entre 8 mm y 11 mm que coincide con el radio del sensor.

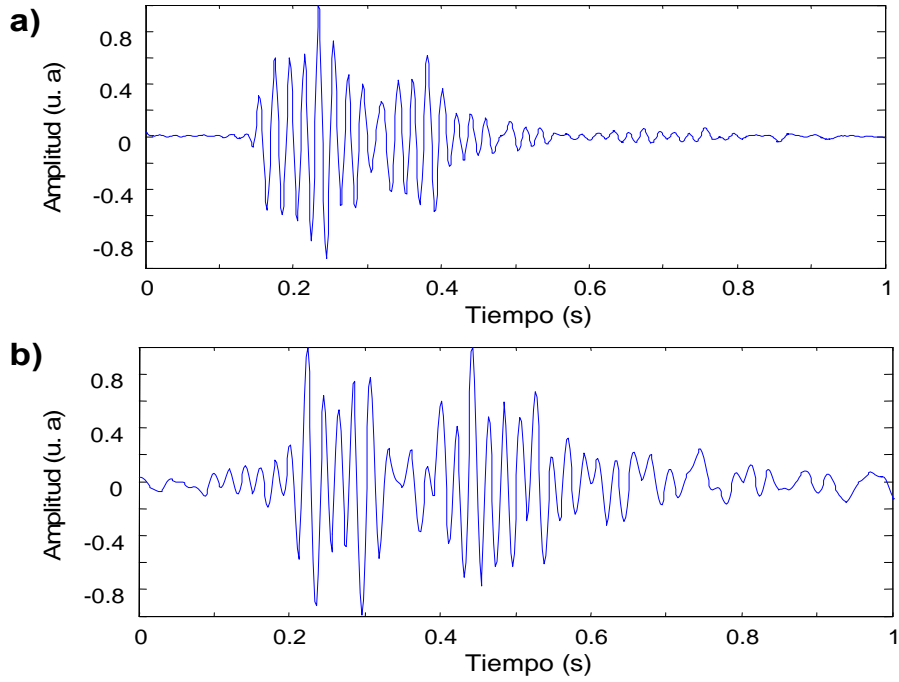


Figura 9 Vibración de la superficie de un gel de gelatina al 3% excitado con 5 ciclos de sinusoide de 50 Hz de frecuencia. a) método óptico. b) método acústico con sensor de superficie.

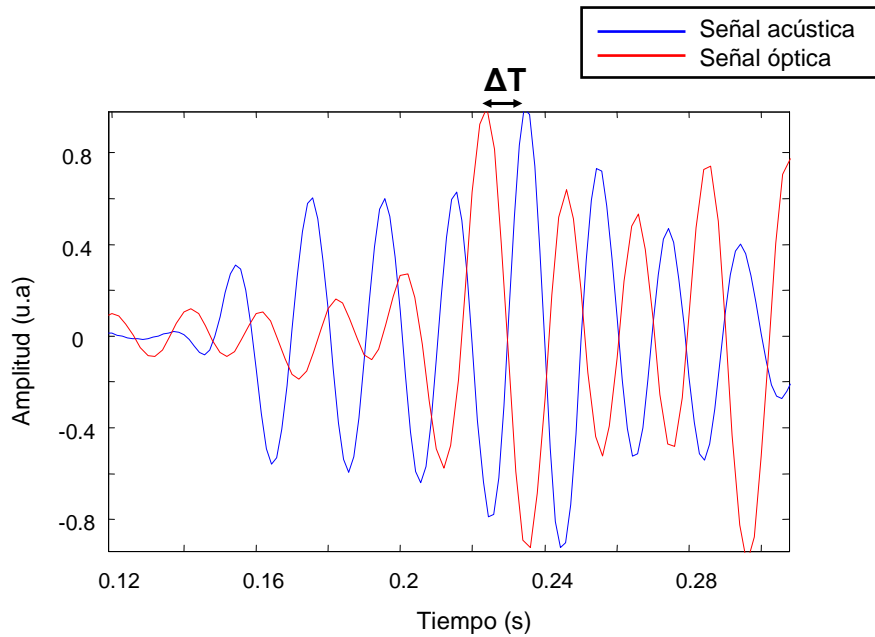


Figura 10 Medida de desfase entre la señal acústica (azul) y la óptica (rojo). Esta corresponde al radio del sensor de superficie.

IV.3 CONCLUSIONES

Se obtuvo nuevamente coincidencia entre las señales ópticas y acústicas. Se logró explicar con éxito el desfase entre ambas señales, concluyendo que el sensor acústico comienza a recibir señal cuando la perturbación llega a uno de sus bordes. Esta vez los

métodos de medida son ambos de bajo costo pero la medida óptica resultó ser más localizada que la acústica. El desfase de $\pi/2$ introducido debido a que el sensor pueda medir velocidad es despreciable frente al desfase introducido por el radio del sensor.

V. FUTUROS TRABAJOS

Actualmente se está diseñando un montaje experimental capaz de extender este método a dos puntos de medidas. La idea es utilizar el haz reflejado por el separador de haz que sale en dirección opuesta a la pantalla. A una distancia d del BS se coloca un espejo a 45° junto a otro lente colector de luz. De esta forma podríamos medir tiempo de vuelo en distancia tan cortas como el diámetro de los lentes y con una muy buena precisión espacial (tamaño de la mancha luminosa). Tampoco es necesario sincronizar la adquisición con el golpe de baja frecuencia. Este montaje podría tener aplicaciones en la medición *in Vitro* de la velocidad de onda de pulso (PWV) en arterias generadas por vibraciones del orden de los 100 Hz⁵.

Otro futuro trabajo es el de en lugar de emitir un haz puntual, extender mediante una lente cilíndrica el haz a una línea. Esto sería equivalente a tener “infinitas” fuentes luminosas. De esta manera podríamos ver como se deforma el frente de onda a medida que viaja por el medio. Esto tendría aplicaciones en una posible detección de defectos superficiales como pueden ser zonas de menor o mayor elasticidad². Si se coloca el haz a lo largo de la dirección de propagación se podría ver la velocidad del frente de onda, también con posibles aplicaciones a la medida de PWV.

REFERENCIAS

- ¹ I. Nuñez, J. A. Ferrari, “*Differential operator approach for Fourier image processing*”, J. Opt. Soc. Am. **24** (8), 2274-2279 (2007)
- ² N. Benech, I. Nuñez, C. Negreira, “*Elastographic parameters by surface wave analysis*”, Proceeding of the IEEE Ultrasonic Symposium 2005, 1364-1367 (2005)
- ³ J. Brum, S. Catheline, N. Benech, C. Negreira, “*Shear elasticity estimation from surface wave: the time reversal approach*”, J. Acoust. Soc. Am., aceptado (2008).

⁴ M. A. Lubinsky, S. Y. Emelianov, M. O'Donnell, "*Speckle tracking methods for ultrasonic elasticity imaging using short-time correlation*", IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control **46**, 82-96 (1999)

⁵ X. Zhang, J. F. Greenleaf, "*Noninvasive generation and measurement of propagating waves in arterial walls.*", J. Acoust. Soc. Am. **119** (2), 1238-1243 (2005)