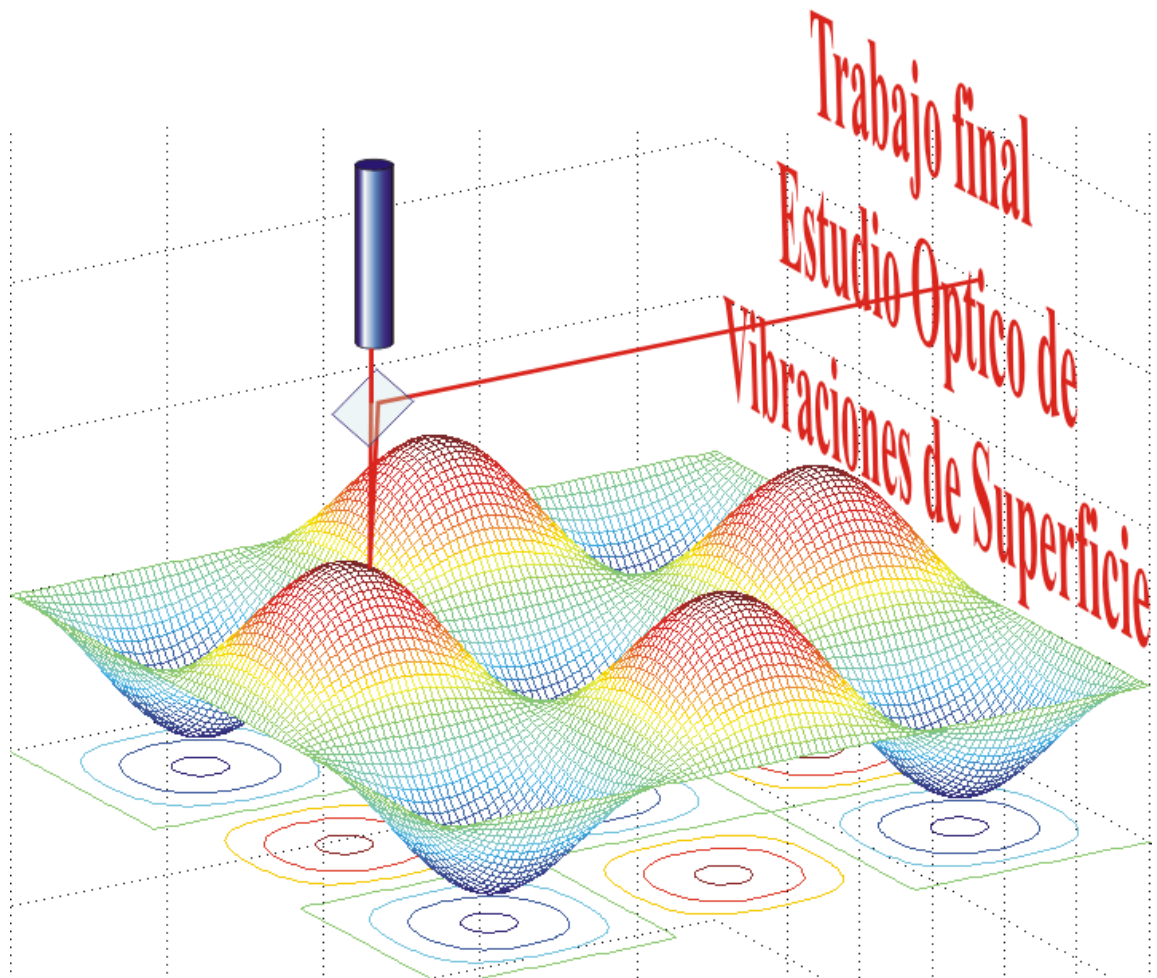


**UDELAR
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE FISICA**

POSTGRADO EN FISICA



MSc. Alicia Arzúa

Lic. Guillermo Balay

**Docente:
Dr. Ismael Núñez**

Agosto 2008

Introducción.....	3
1. Método de la deflexión del haz.....	3
1.1 Fundamento teórico.....	3
1.2 Montaje experimental.....	6
1.3 Calibración del método óptico.....	6
1.3 La cámara CCD.....	8
1.4 Relación entre FPS y ROI.....	8
1.5 Trigger de la cámara.....	9
1.6 Algoritmos empleados.....	9
1.7 Datos experimentales.....	10
2. Método de Ultrasonido.....	15
2.1 Montaje Experimental.....	16
2.2 Trigger Externo y Matlab.....	16
2.3 Algoritmos empleados.....	18
2.4 Datos experimentales.....	18
3. Validación del método óptico.....	20
4. Conclusiones.....	21
5. Posibles trabajos futuros.....	21
Bibliografía.....	22

Introducción

En el presente trabajo nos proponemos validar el método óptico de **estudio de vibraciones de superficie por deflexión de un haz de luz** comparándolo con la determinación del movimiento de la superficie por ultrasonido.

1. Método de la deflexión del haz

Este es uno de los métodos estudiados en el curso. A diferencia del método de Moiré, que consiste en la proyección de un patrón sobre **una región** de la superficie estudiando su deformación, el método empleado sólo proporciona información de **un punto** de la superficie.

1.1 Fundamento teórico

a) Superficie especular

Como se ve en la Fig.1, un haz laser vertical atraviesa un divisor BS: parte de haz sigue su camino y se refleja parcialmente en la superficie de un gel en P. El haz reflejado es desviado 90° para incidir horizontalmente en una pantalla S a una distancia l del haz. Cuando la superficie está en reposo, el punto P' (imagen de P) ubicado en S es considerado el origen de un sistema cartesiano de coordenadas: Ox horizontal, Oy vertical.

Cuando la superficie cambia su inclinación (se deforma con la presencia de una vibración) en un ángulo α hacia la **izquierda** el haz reflejado se desvía 2α del incidente y el punto imagen se desplaza un segmento y hacia **abajo** sobre el eje vertical de la pantalla S.

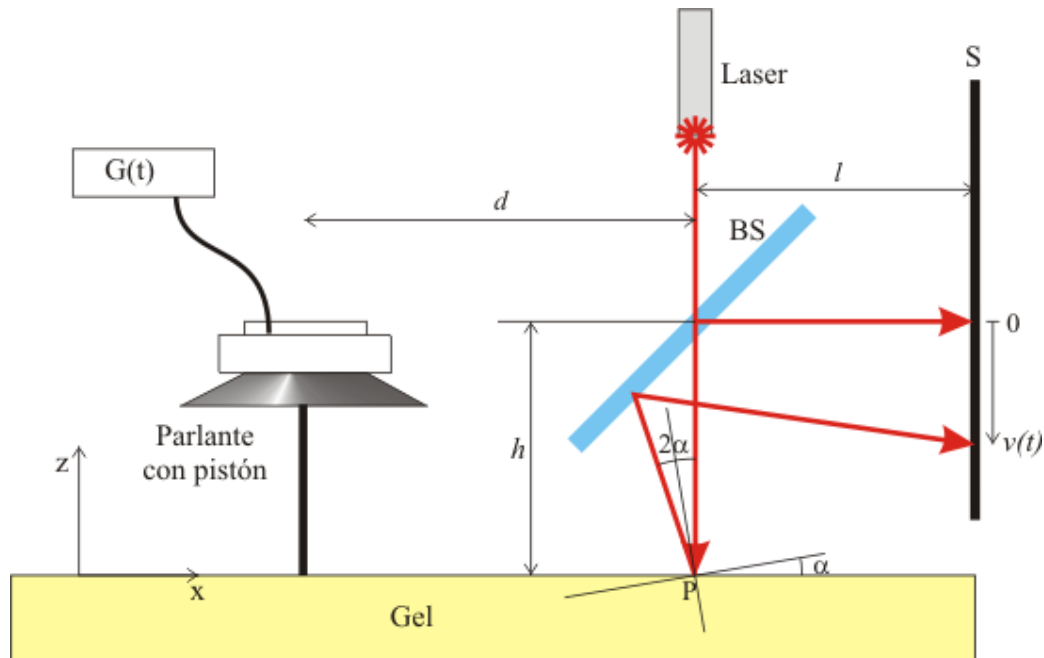


Fig.1 Montaje óptico para detectar el movimiento de un punto de la superficie en la pantalla S a una distancia $l+h$ de P cuando el pistón excita el gel con $G(t)$.

Se verifica entonces la relación:

$$\operatorname{tg} 2\alpha(t) = \frac{v(t)}{h+l} \quad (1)$$

Si el ángulo α es pequeño, se puede aproximar la tangente al arco:

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

Donde se ha definido el **factor de calibración del sistema** entre el ángulo en el plano Oxz y el desplazamiento vertical en la pantalla $v(t)$:

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

Veremos que **este factor debe determinarse empíricamente** pues depende del ángulo del BS, que se supuso a 45° respecto a la superficie, condición muy difícil de lograr en el caso real. Se puede definir análogamente un factor de calibración entre el ángulo β de inclinación en el plano Oyz y el desplazamiento horizontal $h(t)$ en la pantalla.

Si $z(x,t)$ es el desplazamiento vertical del punto de coordenada x en el instante t medido desde la posición de equilibrio, la inclinación del plano tangente para ángulos pequeños es:

$$\alpha \approx \text{tg } \alpha = \frac{\partial z}{\partial x} \quad (4)$$

empleando la (2) tenemos:

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

Podemos escribir la perturbación $z(x,t)$ como un paquete de ondas viajando hacia la derecha:

$$z(x,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \cdot e^{j(k(\omega)x - \omega t)} d\omega \quad (6)$$

sustituyendo en (5) tenemos

$$q \cdot v(t) = j \int_{-\infty}^{+\infty} k(\omega) \cdot A(\omega) \cdot e^{j(k(\omega)x - \omega t)} d\omega \quad (7)$$

Tomando el punto P como origen de coordenadas, sin perder generalidad tenemos

$$z(0,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega) \cdot e^{-j\omega t} d\omega \quad (8)$$

$$q \cdot v(t) = j \int_{-\infty}^{+\infty} k(\omega) \cdot A(\omega) \cdot e^{-j\omega t} d\omega \quad (9)$$

Aplicando la transformada inversa de Fourier a (9):

$$A(\omega) = -\frac{jq}{2\pi \cdot k(\omega)} \int_{-\infty}^{+\infty} v(t) \cdot e^{j\omega t} dt \quad (10)$$

Sustituyendo esta en (6) tenemos:

$$z(x,t) = -j \frac{q}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v(t') \frac{e^{jk(\omega)x}}{k(\omega)} e^{-j\omega(t-t')} dt' d\omega \quad (11)$$

Si el pulso introducido por el pistón es de una frecuencia conocida ω_0 entonces

$$v(t') = v_0 e^{-j\omega_0 t'} \quad (12)$$

y la (11) queda:

$$z(x,t) = -jq \frac{v_0}{K} e^{j(Kx - \omega_0 t)} \quad (13)$$

donde definimos $K = k(\omega_0)$ y hemos usado la relación:

$$\int e^{j(\omega - \omega_0)t'} dt' = 2\pi \cdot \delta(\omega - \omega_0) \quad (14)$$

Tomando la parte real de (12) y (13):

$$v(t) = |v_0| \cos(\varphi - \omega_0 t) \quad (15)$$

y los desplazamientos verticales de la superficie serán:

$$z(x, t) = q \frac{|v_0|}{K} \sin(Kx - \omega_0 t + \varphi) \quad (16)$$

Donde $K = \frac{\omega_0}{c}$ es el número de onda y c la velocidad de propagación para las ondas de superficie de frecuencia ω_0 .

b) Superficie del gel

La superficie del gel no es lo suficientemente especular como para que la luz difundida forme una mancha definida, por lo que se necesita una lente convergente (de distancia focal f) entre la superficie y el divisor BS de la figura 1. En la figura 2 vemos el efecto de la lente al colocar la pantalla luego de la imagen real P_0 de P ya que $s > f$ [4].

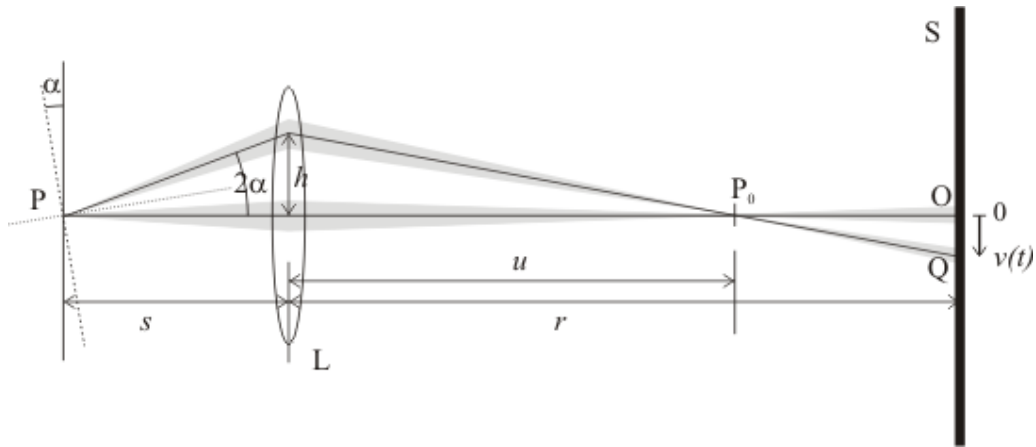


Fig.2 Efecto de la lente convergente L para formar una imagen P y desenfocarla sobre la pantalla S en el punto Q.

En esta figura omitimos el BS, ya que su única utilidad es desviar los rayos 90° sobre la pantalla. Esta debe colocarse a una distancia $r > u$ para asegurarnos que Q **se mueva**. De lo contrario, como P se mueve muy poco hacia O (amplitud de la vibración) y mucho menos hacia los lados (desplazamiento longitudinal en el gel), tendríamos un punto Q fijo en S.

Empleando la igualdad de los ángulos opuestos en P_0 tenemos que:

$$q = \frac{u}{2s(r-u)} \quad (17)$$

La ecuación de la lente:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f} \quad (18)$$

nos permite eliminar u de (17) dando:

$$q = \frac{1}{2} \frac{f}{((r-f)s - rf)} \quad (19)$$

que sustituyendo en la (2):

$$v(t) = \frac{\alpha(t)}{q} = 2 \left(\frac{r}{f} - 1 \right) s \alpha(t) - 2r \alpha(t) \quad (20)$$

Las variaciones δv de la posición de la mancha Q en S dependen de las variaciones del ángulo de la superficie del gel $\delta\alpha$ y del desplazamiento de P en la dirección del eje óptico δs :

$$\delta v \approx \frac{\partial v}{\partial s} \delta s + \frac{\partial v}{\partial \alpha} \delta \alpha = 2\alpha(t) \left(\frac{r}{f} - 1 \right) \delta s + 2 \left(\left(\frac{r}{f} - 1 \right) s - r \right) \delta \alpha \quad (21)$$

Dado que en nuestro caso $f < s$, $\alpha \approx \delta\alpha$, $\delta s \ll f$ y $\delta s \ll r$ vemos que el primer sumando del segundo miembro es de segundo orden comparado con el restante y por lo tanto la variación de la posición de la mancha en la pantalla es despreciable respecto a la variación en s de la posición de P. Podemos concluir que **el método es indiferente respecto al movimiento de P, no así al cambio en la inclinación del plano tangente a la superficie en P.**

1.2 Montaje experimental

Para el montaje óptico descrito, conectamos los elementos como se muestra en el siguiente circuito:

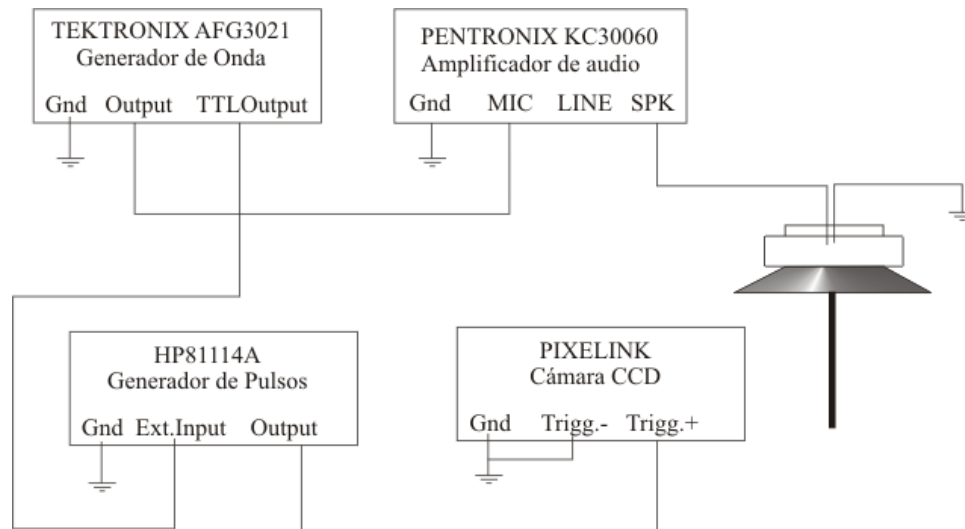


Fig. 3 Diagrama para el método óptico

Nótese que se gatilla al oprimir "Manual" en el generador Tektronix y éste gatilla el HP, que controla los fotogramas de la cámara. De esta forma sólo se genera un trigger para el parlante pues si se conectan en otro orden no se logra un solo "burst", sino varios.

1.3 Calibración del método óptico

Una forma sencilla de calibrar el sistema óptico es, luego de adquirir las imágenes en la pantalla, fotografiar (sin mover nada) una regla horizontal y otra vertical adosadas a la pantalla tal que se observen las separaciones milimétricas.

Con dichas fotos se puede calcular la cantidad de píxeles correspondientes a cada milímetro y usando (1) calcular α .

Pero en ocasiones, para lograr mayor sensibilidad es necesario **prescindir de la pantalla** y usar la cámara (enfocada en infinito) directamente. En este caso **es imprescindible** una calibración directa, para lo cual **construimos** el artefacto de la figura 4.

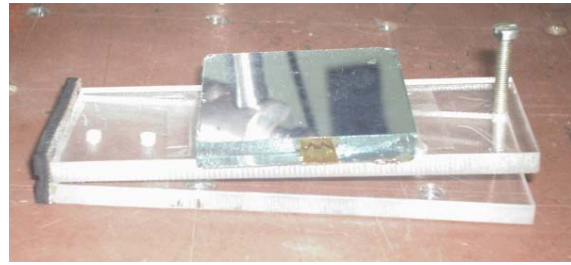


Fig.4 Calibrador del método óptico. La cara superior soporta el espejo y constituye el cateto adyacente del triángulo recto. Un tornillo milimétrico en una distancia a de la bisagra (izq.) es el cateto opuesto b al ángulo α .

Consiste en 2 planos unidos por una bisagra. En el plano superior se coloca un tornillo perpendicular al mismo, de 0.5 mm/vuelta. Contando el número de vueltas al tornillo se calcula el ángulo formado entre ambos planos ya que, si b es el largo del tornillo en cada foto y a la distancia del tornillo a la bisagra:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a} = \frac{0.5 \text{ mm} \times \text{nro.vueltas}}{94.55 \text{ mm}} \quad (22)$$

Sobre el plano superior (móvil) se adosa un espejo plano de 1ª superficie que desvía el haz incidente. El plano inferior se coloca a la altura de la superficie a estudiar, orientado perpendicular al soporte del pistón y se toman fotos de la pantalla S (o sin ella) para distintos valores de b (vueltas al tornillo). De esta forma se obtiene por ajuste lineal $q = \alpha/v$ para el eje vertical.

Sin embargo, el error al medir las distancias involucradas en (19) es importante (>10% debido a la complejidad de acceder a las medidas), por lo que usaremos el **píxel** como unidad de medida de $v(t)$ y $h(t)$.

Con el dispositivo fabricado efectuamos las siguientes calibraciones:

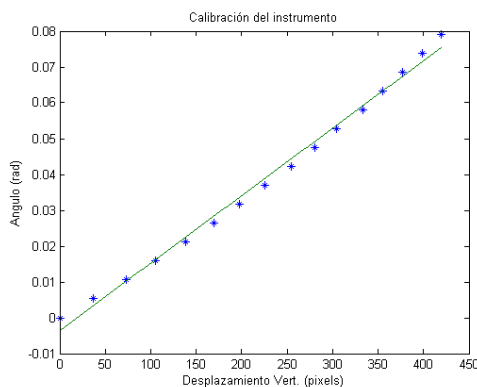


Fig.5 Determinación de la correspondencia ángulo/píxeles del eje vertical.

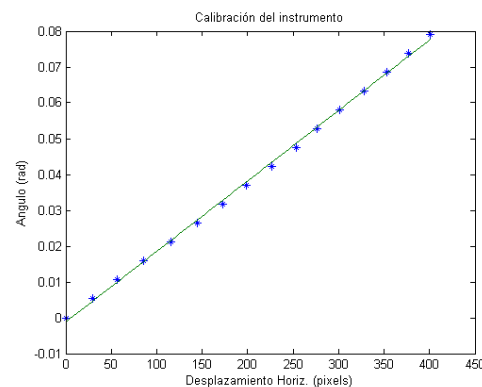


Fig.6 Determinación de la correspondencia ángulo/píxeles del eje horizontal.

Para el eje vertical se obtuvo $\alpha = 1.8866e - 004v - 0.0036$ con un coeficiente de correlación $R = 0.9969$, donde v se expresa en píxeles y α en radianes (figura 5).

Luego se gira el calibrador 90° sobre el plano horizontal y se repite el procedimiento, para dar una recta como se ve en la figura 6. Se obtuvo $\alpha = 1.9709e - 004v - 0.0013$ con un coeficiente de correlación $R = 0.9994$.

Se observa una **concordancia** entre ambos factores de proporcionalidad y una fuerte correlación, como era de esperarse pues el sistema óptico planteado es lineal.

1.3 La cámara CCD

Para registrar las imágenes necesarias empleamos la cámara Pixelink PL-A780 de 6.6 megapixels, que se conecta mediante puerto USB al PC. La cámara puede manejarse por una interfase gráfica o bien ser comandada externamente por un conector trasero.

Un parámetro importante es la Región de Interés (**ROI**) que especifica cuáles píxeles de la cámara serán usados para registrar. La ROI tiene coordenadas de comienzo y dimensiones (ancho y alto). La interfase permite determinar los cuadros por segundo (**FPS**) y el tiempo de exposición (**Exposure Time**), que es el tiempo durante el cual se integra la cantidad de luz en cada píxel.

La cámara necesita 25ns para leer cada píxel y 7.3µs de retardo por fila, mas un tiempo de 10 píxeles de separación entre cada una. Además necesita un tiempo para borrar cada fila antes de comenzar a integrar la luz del nuevo fotograma.

El primer paso en la adquisición es determinar la ROI (filas y columnas) tal que abarque todo el movimiento del punto en la vibración.

1.4 Relación entre FPS y ROI

Una vez fijada la ROI (rows,cols), debe determinarse el máximo FPS compatible con la ROI (máxima frecuencia de muestreo). Para ello debimos escribir el programa “**pixelink.m**”:

```

%*****
disp('Todos los tiempos están en segundos!')
rows=72                                % (pixels) Parámetro
cols=192                                % (pixels) Parámetro
ExposureTime=0.063e-3                  % (segundos) Parámetro
RowResetTime=3.55e-6                   % dato fijo
MinRowReadoutTime = 1e-6*(7.3 + (25*(cols+10)/1000))
MinROIReadoutTime = rows*MinRowReadoutTime
MaxFrameInterval = 0.8192e-3 * rows    % tiempo maximo entre frames.
MinFrameInterval = ExposureTime + RowResetTime*rows + MinROIReadoutTime
MaxFPS=1/MinFrameInterval              % frame rate maximo
%*****

```

La frecuencia a usar en el trigger externo **no debe exceder** el valor calculado MaxFPS, de lo contrario el tiempo entre fotogramas del archivo generado es irregular y produce resultados incorrectos en el cálculo de frecuencias.

1.5 Trigger de la cámara

Ya que no se pudo adquirir en plaza un conector apropiado para poder introducir a la cámara la señal de trigger (parte posterior), debimos **construir** uno modificando un cable de "mouse" con conector PS2 para que coincidieran sus patas. Para futuros usos se especifica aquí la correspondencia de colores usada:

Pin en conector trasero	Nombre	Color
1	Power	
2	Trigger+	Azul
3	Trigger-	Rojo
4	Ground	Negro
5	GP1	Marrón
6	GP2	Naranja

En el otro extremo del cable le conectamos un terminal tipo BNC de la siguiente forma:

Trigger+ (pin 2 cámara) _____ Vivo del BNC
 Trigger- (pin 3 cámara) _____ Tierra del BNC
 Ground (pin 4 cámara) _____ Tierra del BNC

El conector BNC se conectó a la salida del generador de pulsos HP, de tal forma que entregue 5 V (high) todo el tiempo excepto cuando se desee tomar un fotograma. En ese instante debe pasar a 0 V (low), es decir en "lógica negativa". El diagrama de tiempos debe ser de la siguiente forma ^[3]:

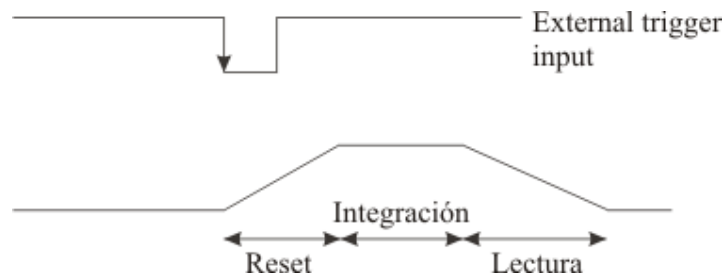


Fig.7 Diagrama de tiempos para el trigger externo de la cámara CCD.

Nótese que si llega un 0 lógico en el trigger **antes** de que se pueda leer la ROI completa, éste será ignorado por la cámara. Es recomendable generar una cantidad de pulsos (0 lógicos) igual a la cantidad de fotogramas a tomar (interfase gráfica). De esta forma, **si por algún motivo** no se completa la adquisición es porque se han omitido pulsos y **debe bajarse la frecuencia del generador**.

1.6 Algoritmos empleados

Para procesar los fotogramas obtenidos en cada experimento, se emplearon dos métodos. El primero, propuesto por J.Brum determina en cada imagen los píxeles donde ocurren los máximos de luz en cada fila. Luego se promedian para determinar la coordenada

promedio X del máximo. El proceso se repite para las columnas. El resultado (X,Y) se almacena en una matriz. Lo denominamos Mean(Max) en lo que sigue.

El segundo, propuesto por G.Balay se basa en la idea de ponderar la posición por la intensidad de la luz $I(x,y)$, calculando:

$$\langle x \rangle = \frac{\iint x \cdot I(x,y)^2 dx dy}{\iint I(x,y)^2 dx dy} \quad \langle y \rangle = \frac{\iint y \cdot I(x,y)^2 dx dy}{\iint I(x,y)^2 dx dy}$$

A este método lo llamamos $\langle \text{fi} | R | \text{fi} \rangle$ en lo que sigue.

1.7 Datos experimentales

En primer lugar generamos con el Tektronix 3021 una excitación senoidal de 20 ciclos y de una frecuencia fija de 40 Hz, la cual aplicamos al parlante colocado de modo de producir ondas viajeras en el **eje horizontal de la pantalla**, como se ve en la figura 8a.

Se estableció la ROI de 336 columnas por 144 filas. Usando el programa **pixelink.m** calculamos $\text{MaxFPS} = 348.3 \text{ Hz}$ por lo que empleamos un $\text{fps}=200 \text{ Hz}$.

Es decir que fijamos el generador de pulsos HP 8114A en 200Hz y lo conectamos como trigger externo de la cámara (ver fig.3).

El paquete de ondas (“burst” de 5 ciclos) generado por la superficie plana del pistón, viaja hacia la derecha con velocidad c y pasa por debajo del punto P del laser sobre el gel (Fig.8a). La filmación termina antes de que el burst se refleje en el borde derecho de la cubeta y regrese al punto P.

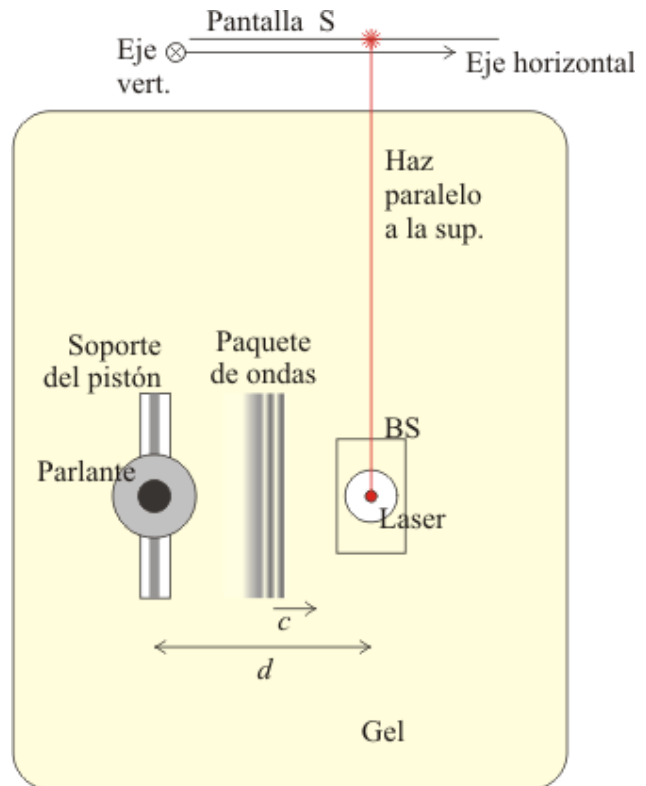


Fig.8a. Montaje inicial donde se excitan ondas paralelas al largo de la superficie. Se observa un movimiento básicamente horizontal de la mancha laser Q en la pantalla.

Lo mismo sucede para eventuales ondas propagándose en la dirección transversal (largo), lo cual permite suponer al gel como de **dimensiones infinitas**. Es esperable que la mayor deflexión del haz sobre la pantalla para este montaje sea en el eje horizontal.

Los resultados para 40 Hz se muestran en las siguientes figuras.

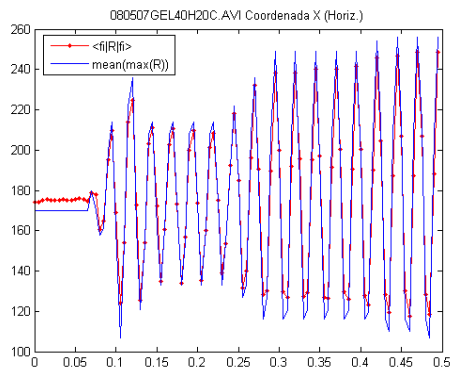


Fig.8b Movimiento de la mancha calculado por el método Mean(Max) y $\langle fi|R|fi \rangle$ para la coordenada horizontal de la imagen, es decir, es decir en el sentido de las ondas viajeras. Nótese que el video termina antes de que acabe el burst.

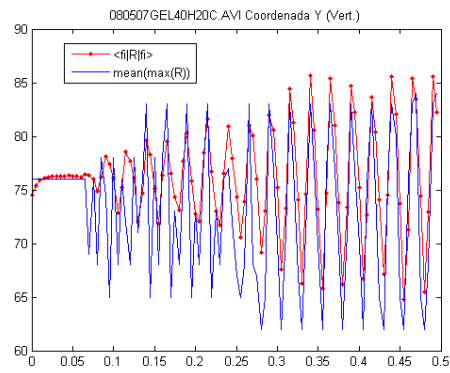


Fig.8c Movimiento de la mancha calculado por el método Mean(Max) y $\langle fi|R|fi \rangle$ para la coordenada vertical, es decir en el sentido transversal a las ondas viajeras.

Calculamos el espectro del movimiento de la mancha en cada eje para cada uno de los métodos:

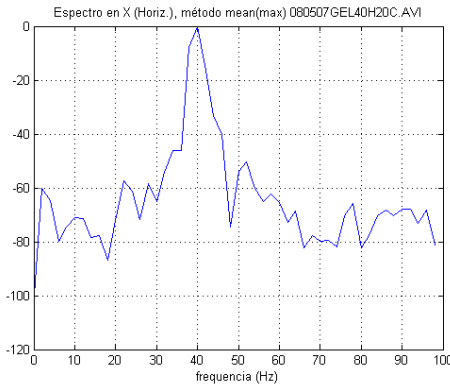


Fig.9a Espectro horizontal método Mean(Max)

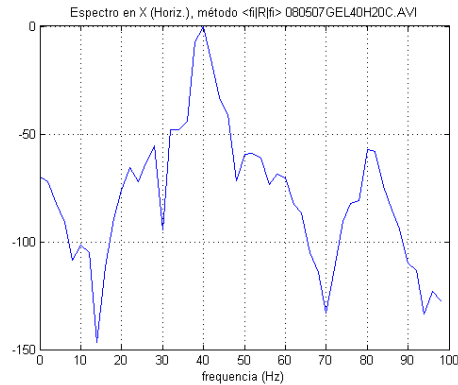


Fig.9b Espectro horizontal método $\langle fi|R|fi \rangle$

Nótese que en el método $\langle fi|R|fi \rangle$ aparece el primer armónico que no se ve en el método del máximo.

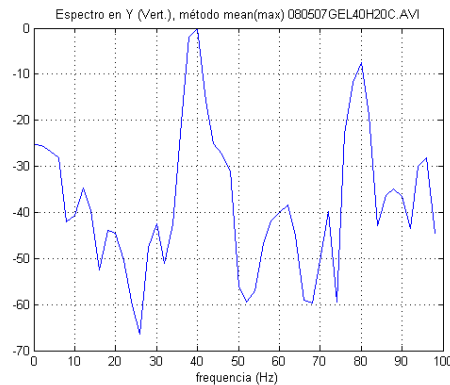


Fig.9c Espectro vertical método Mean(Max)

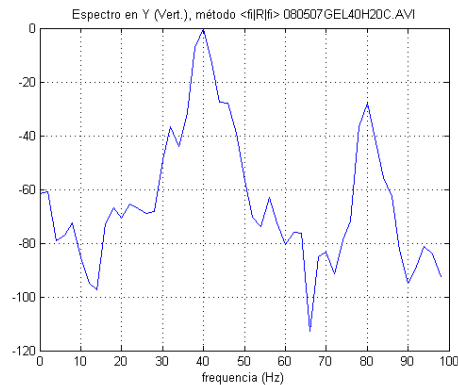


Fig.9d Espectro vertical método $\langle fi|R|fi \rangle$

Luego repetimos el experimento para el intervalo 10 a 110 Hz, en incrementos de 10 Hz y seleccionamos el pico en cada espectro para cada uno de los métodos. El resultado se muestra en las siguientes figuras.

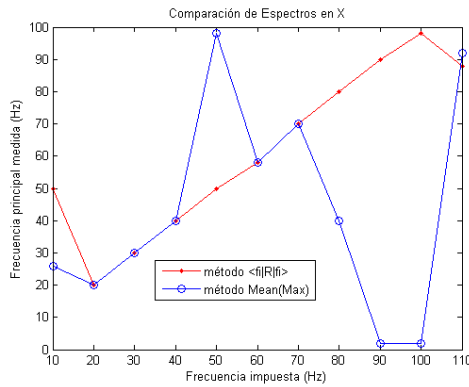


Fig.10a Comparación entre ambos métodos para el espectro horizontal.

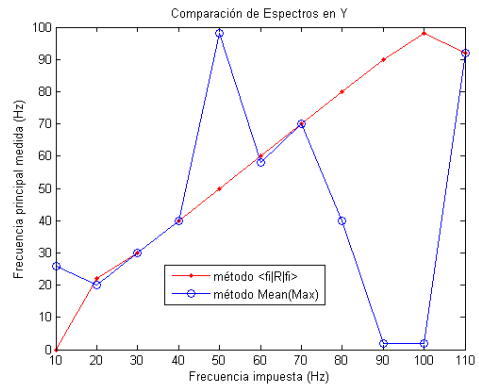


Fig.10b Comparación entre ambos métodos para el espectro vertical.

Para lograr un **mayor tiempo** de vuelo del paquete de ondas, construimos una cubeta rectangular de 60*10*5 cm. Allí preparamos un gel al 3% de gelatina (de menor concentración que el anterior), como se ve en la figura 11a.

A continuación generamos un “burst” de 5 ciclos senoidales, con una frecuencia fija. En ese montaje y para cada frecuencia entre 5 y 60 Hz tomamos un video con un fps=200 Hz.

Como se ve en la figura 11, es de esperar que la onda de superficie sea plana y paralela al lado angosto de la cubeta, por lo que la vibración en el eje vertical de la pantalla será mucho más acentuada que la del eje horizontal (contrariamente al experimento anterior).

A modo de ejemplo, mostramos en la fig.12 el resultado del procesamiento de uno de los videos, para un burst de 5 ciclos senoidales de 25 Hz de frecuencia.

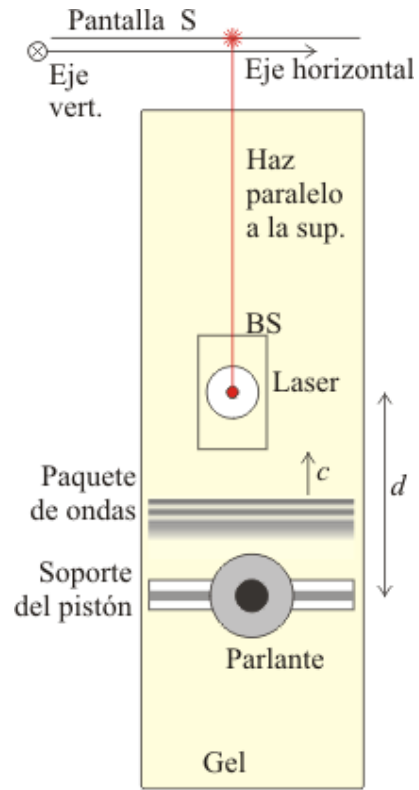


Fig.11 “Guía de ondas” para producir ondas a lo largo de la cubeta, deflectando la mancha principalmente en el eje vertical de la pantalla S.

En la figura 12a se observa una vibración vertical de más de 15 píxeles de amplitud, mientras que en la fig.12b se observa una vibración horizontal de 5 píxeles, como era de esperarse.

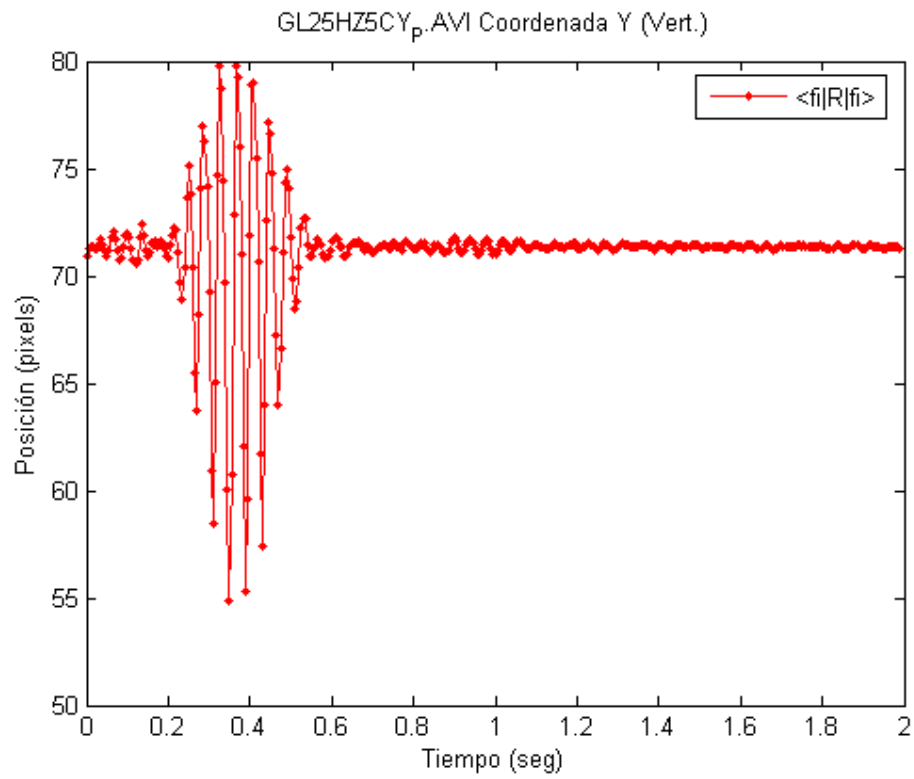


Fig. 12a. Movimiento vertical de la mancha en el gel largo, con 5 ciclos de 25 Hz.

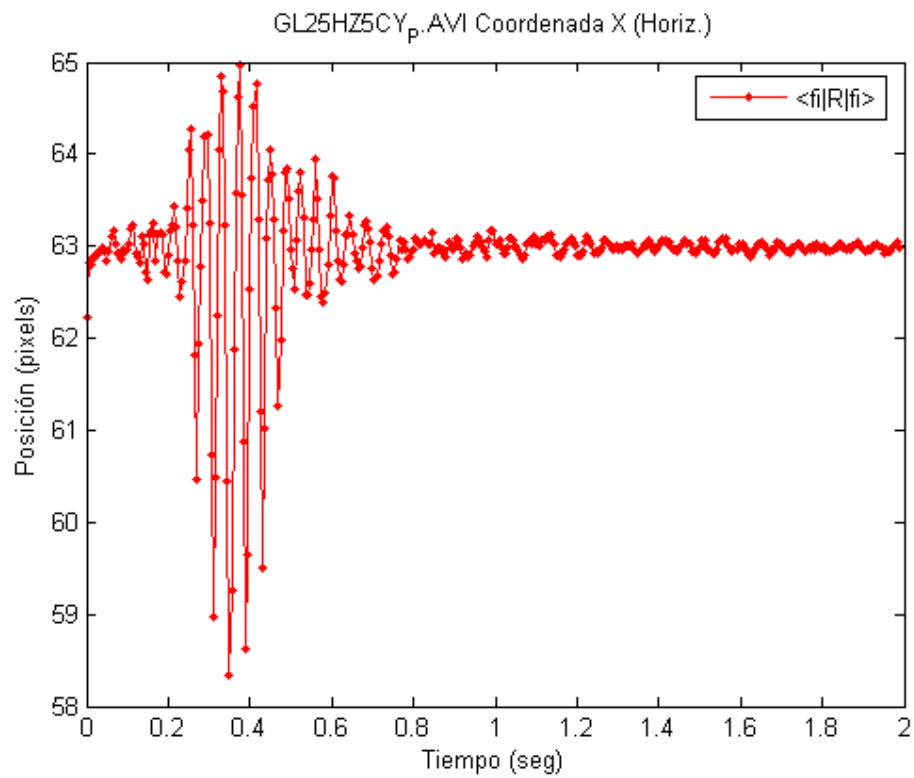


Fig. 12b. Movimiento horizontal de la mancha en el gel largo, con 5 ciclos de 25 Hz.

A partir de estas gráficas podemos ver que el tiempo de propagación del paquete de ondas, desde el pistón hasta el haz laser, es de 0.225 segundos. La distancia mide $d=175$ mm, por lo que su velocidad de propagación es aproximadamente $c_{sup}=0.778$ m/s.

En el espectro vemos que la frecuencia central de 25 Hz se manifiesta por igual en ambas direcciones de movimiento.

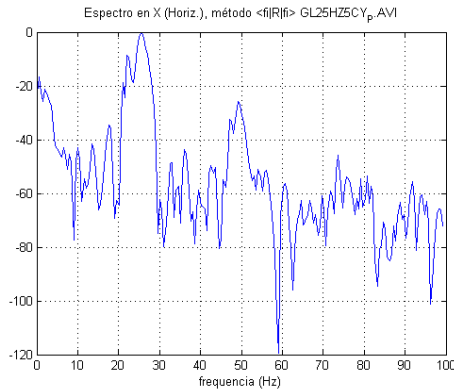


Fig.13a Espectro para movimiento horizontal del burst a 25Hz.

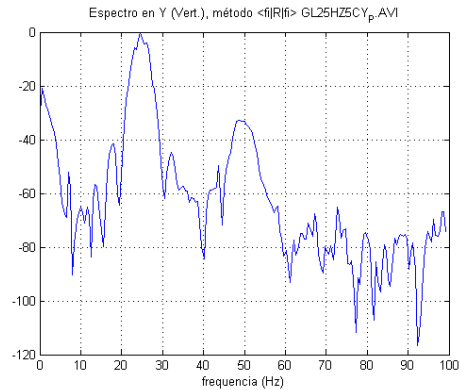


Fig.13b Espectro para movimiento vertical del burst a 25Hz.

Seleccionando los máximos de cada espectro obtuvimos las siguientes respuestas en frecuencia:

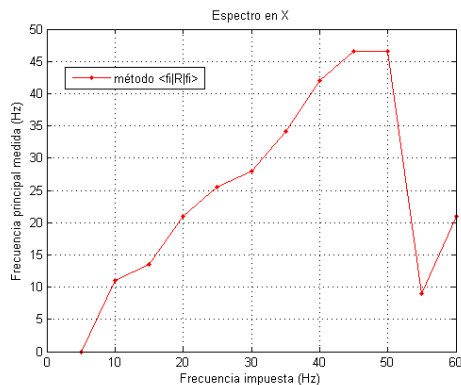


Fig.14a Respuesta en frecuencia del gel para el movimiento horizontal.

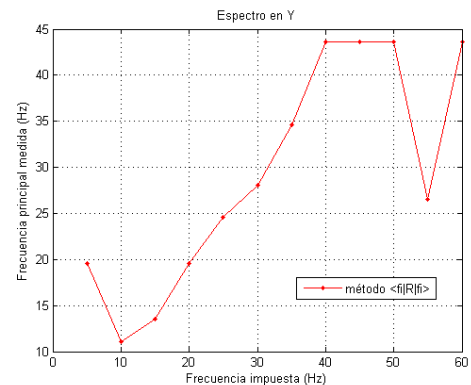


Fig.14b Respuesta en frecuencia del gel para el movimiento horizontal.

Como vemos en la fig.14b, a partir de 45 Hz la frecuencia principal medida por el método óptico se aleja (en ambos ejes) de la generada por el Tektronix e impuesta por el parlante/pistón. Esto puede deberse a que el algoritmo $\langle fi|Rfi \rangle$ pierde efectividad o bien que el parlante no responde linealmente en frecuencia, a efectos disipativos en el gel que atenúen la vibración antes de que llegue al laser. Podría deberse a efectos de “aliasing” pues estamos trabajando con $fps=200Hz$ (4 veces la frecuencia a estudiar).

Como veremos más adelante, también el método ultrasonoro sugiere este comportamiento. Esto puede ser un tema a investigar en futuros trabajos.

2. Método de Ultrasonido

Para comparar los resultados con el método óptico se procedió a determinar el movimiento vertical de la superficie por el método de ultrasonido. El mismo consiste en determinar, conociendo la velocidad del sonido en el agua, la distancia la superficie del gel a partir de su eco.



Fig.15a Se muestra la “guía de ondas” rectangular. El pistón apoyado en una barra de acrílico sobre la superficie del gel para no dañarlo. En el punto donde se encuentra el transductor incidía el haz laser antes de agregarle agua.

Se emplea un dispositivo que dispara pulsos regulares de ultrasonido a un transductor, el cual registra los ecos obtenidos durante un tiempo dado.

A cada serie de datos correspondiente, al eco de un pulso se le llama **AScan**. Se registran varios AScans y se obtiene la posición $z(t)$ de la superficie. Para poder comparar ambos métodos es necesario sincronizar el generador de la excitación del parlante con el comienzo del AScan mediante un trigger.

Ante la dificultad inicial de acceder al dispositivo CORELEC (en uso en otro experimento), el cual permite adquirir varios AScans con 1 ms de intervalo, **generando un trigger interno** para sincronizar el generador de la vibración, **debimos desarrollar un método de trigger externo** para usar el dispositivo USBOX.

Para ello aprovechamos la entrada de micrófono (MIC) existente en todo PC y el evento “trigger” de Matlab. Pero dado que esa entrada **sólo admite** señales de -1 a 1V y que las señales de trigger son siempre TTL (0/5V) **diseñamos** el circuito de la figura 15b, que adapta los voltajes.

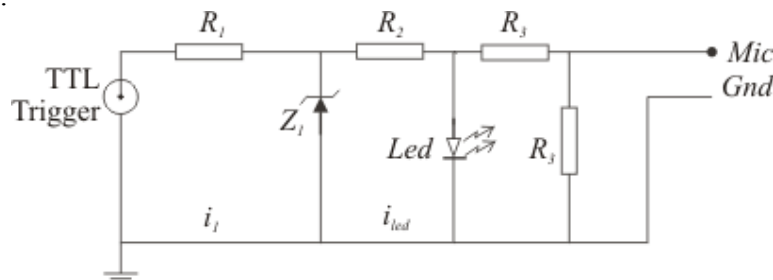


Fig.15b Circuito de adaptación de un trigger TTL a un voltaje apto para la entrada MIC de un PC.

Usamos un diodo Zener Z_1 de 3.3 V y calculamos R_1 para que la corriente en él no supere^[2] los 10 mA:

$$i_1 = \frac{5 - 3.3 \text{ V}}{R_1} = 9 \text{ mA} \quad \text{dando} \quad R_1 = 180 \Omega$$

Luego, medimos el voltaje en $Z_1 = 2.5 \text{ V}$. Deseamos contar con un led rojo **que se encienda cuando se produce el trigger**. Ya que un led produce una caída aproximada de 2V y disponemos de varias resistencias de 180 ohms, calculamos^[2] la corriente en el led, la cual debe ser menor a 10 mA:

$$i_{led} = \frac{2.5 - 2 \text{ V}}{180 \Omega} = 2.7 \text{ mA}$$

Medimos la caída de voltaje en bornes del led cuando se enciende, dando 1.6 V. Para lograr una tensión de salida menor a 1V alcanza con dividirla por 2 con la ayuda de las R_3 , que las elegimos de 1 K Ω . Se probó el circuito con señales de **hasta 15V** y de **10 a 100 KHz**, generando una tensión máxima de 800mV a la salida y **sin deformar** el pulso de entrada hasta 250 KHz.

Finalmente todo el circuito se armó en una caja con un conector BNC de entrada y un cable blindado con plug RCA de salida, para conectar a la entrada MIC de un PC cualquiera. Llamamos a este dispositivo “**Adaptador TTL/MIC**”.

2.1 Montaje Experimental

Mostramos el circuito necesario para medir con ultrasonido empleando el Adaptador TTL/MIC y el dispositivo USBOX. Se usó el transductor de 20 MHz pues brindaba un eco mejor definido debido a la reducida distancia a la que se debió colocar (ver Fig.11).

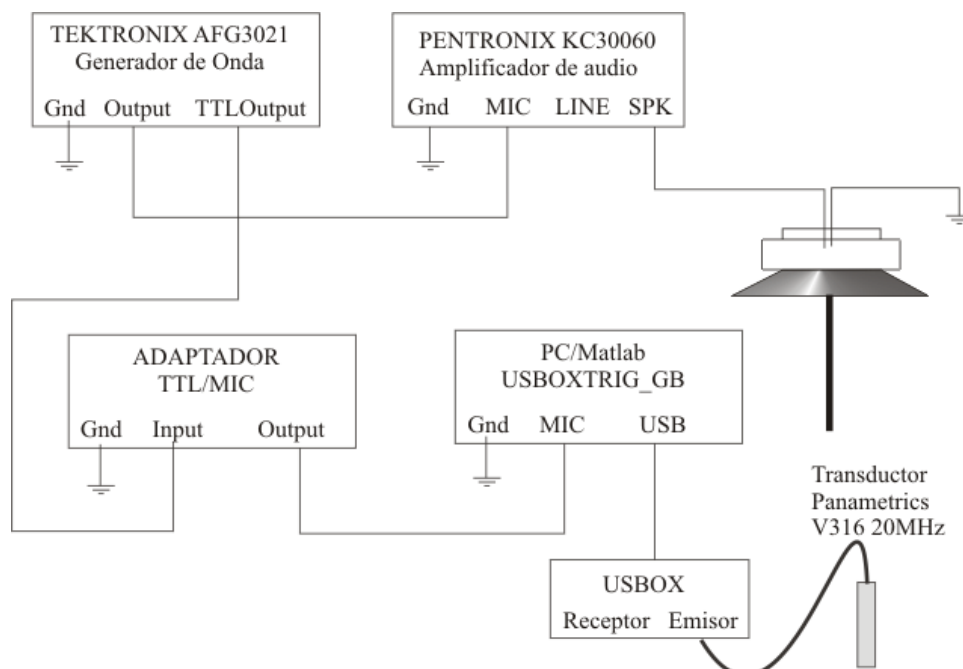


Fig. 16 Circuito para el método de ultra-sonido.

2.2 Trigger Externo y Matlab

Para poder usar un trigger con el dispositivo USBOX se escribió un conjunto de rutinas de Matlab que permiten programar un “evento trigger” para “escuchar” la entrada de micrófono del PC.

Cuando se detecta el evento se llama a una rutina que lo atiende. Estos programas se agregaron al que ya usábamos con USBOX y ahora se llama “**usboxtrig_gb.m**”. En la última columna de la fig. 18 se muestran estos nuevos controles que permiten programar el evento.

Rampa del Trigger: Se detecta el trigger si la señal va “subiendo” o “bajando”.
 Nivel de Trigger: El voltaje que debe superarse para que haya trigger (-1 a 1V).

Delay post Trigger: Tiempo en segundos que se espera luego del trigger para comenzar a tomar Ascans. 0=Sin delay.

Ascans a guardar post Trigger: Cantidad de Ascans a agregar en la memoria de Matlab una vez detectado el evento.

Tiempo entre Ascans: Tiempo en segundos que se espera entre cada Ascan. 0=inmediato.

Si se ingresa 0 en “Tiempo entre Ascans” no se impone ningún retardo y el tiempo entre cada uno **dependerá de la velocidad** de la CPU/Sistema Operativo. En nuestro caso dio 0.01053seg., lo que equivale a una $f_{\text{sample}} = 94.93 \text{ Hz}$, unas 10 veces mas lento que el CORELEC.

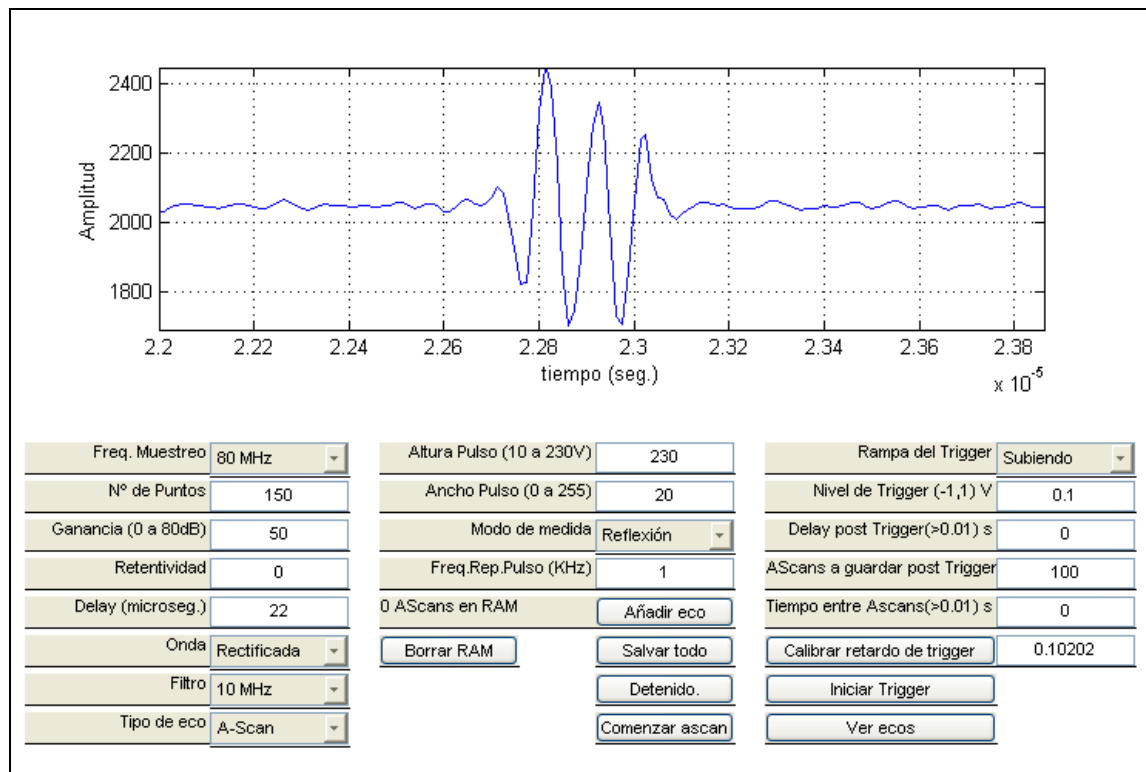


Fig.17 Interfase del programa de Matlab “usboxtrig_gb.m” que permite tomar N Ascans usando el trigger externo diseñado. El botón “Calibrar retardo de trigger” calcula para 50 iteraciones el retardo de Matlab entre que se produce un evento trigger interno y la rutina que lo atiende. En este caso dio 0.10202 segs.

El botón “Calibrar retardo de trigger” ejecuta una rutina que genera 50 veces un trigger y promedia el tiempo que le lleva a Matlab atender el evento. En nuestro caso dio 0.10202 seg. Tanto este tiempo como el anterior son tenidos en cuenta por el programa “usboxtrig_gb.m” en el vector de tiempo devuelto.

El operador no necesita hacer ningún cálculo adicional: con sólo oprimir “**Iniciar Trigger**”, una vez que se produce el trigger TTL, el programa agrega a la memoria los N AScans a intervalos regulares y registra el instante de comienzo de cada uno.

Con el botón “**Ver ecos**” se procesan los AScans (ver 2.3), se muestra la “película” obtenida y su espectro.

2.3 Algoritmos empleados

En este método, ensayamos tres métodos de determinación de la posición del eco: el máximo de la señal propuesto por A. Arzúa, el $\langle f_i | R | f_i \rangle$ y el de **correlación** entre los Ascans.

En este caso, dado que el gel **no** contiene difusores, se correlaciona sólo el eco producido por la superficie. Sucede que al usar una frecuencia baja de muestreo (MIC/USBOX), el método de correlación no resulta apropiado pues “pierde el rastro” cuando la superficie vibra rápido comparado con la f_{muestreo} .

En la siguiente sección se comparan los tres métodos.

2.4 Datos experimentales

Las siguientes figuras muestran los resultados del movimiento de la superficie determinado por ultrasonido, al excitar con un burst de 5 ciclos y 25 Hz por los tres algoritmos.

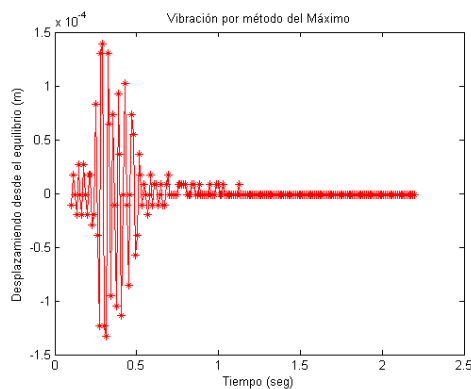


Fig. 18a Vibración por el método del Máximo en la señal de US.

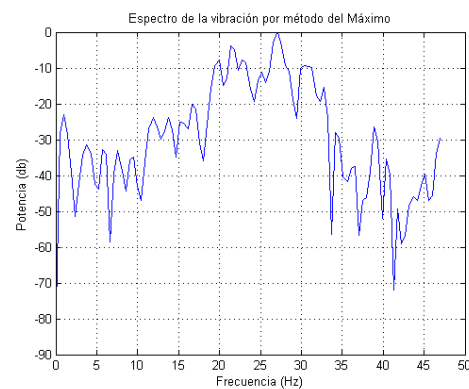


Fig. 18b Vibración por el método del Máximo en la señal de US.

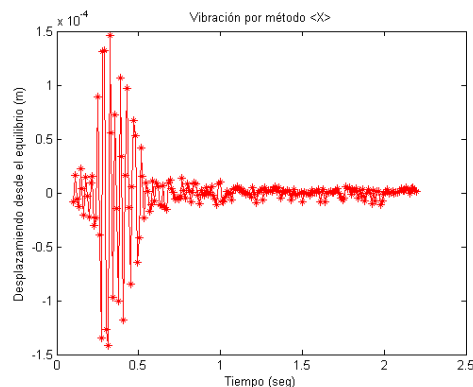


Fig. 19a Vibración por el método <X> en la señal de US.

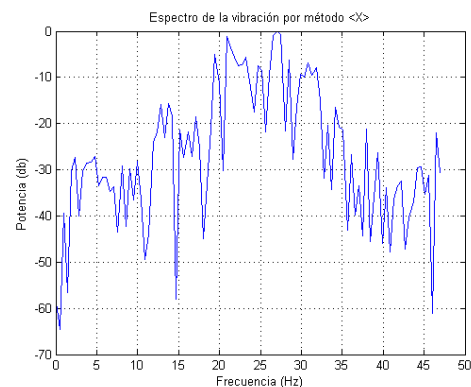


Fig. 19b Espectro del método <X> en la señal de US.

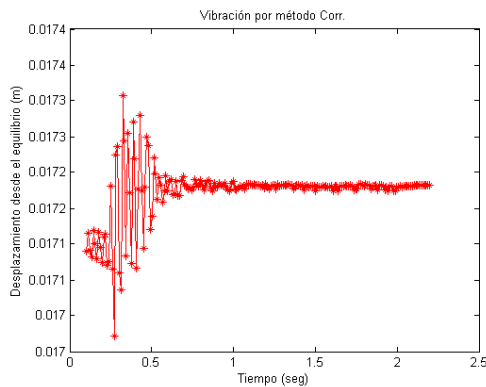


Fig. 20a Vibración por el método de correlación en la señal de US.

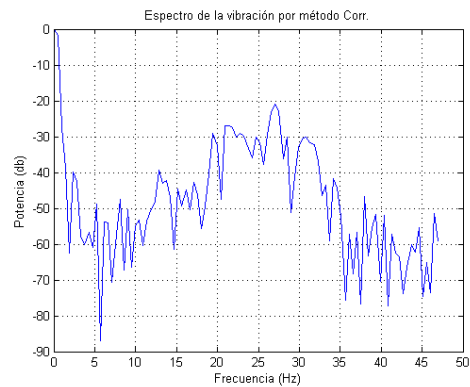


Fig. 20b Espectro del método de correlación en la señal de US.

A partir de las figuras 18a, 19a y 20a podemos ver que el tiempo de propagación del paquete de ondas (desde el pistón hasta el haz laser) es de 0.228 segundos, en concordancia con el resultado óptico, ya que el transductor se colocó sobre el punto donde incidió el laser y la distancia al pistón es la misma.

Luego repetimos el experimento con bursts de 5 ciclos a distintas frecuencias entre 5 y 40 Hz y obtuvimos los siguientes resultados:

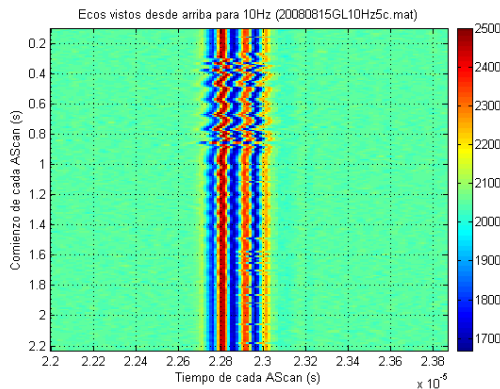


Fig.21a BScan para vibración con 5 ciclos a 10 Hz.

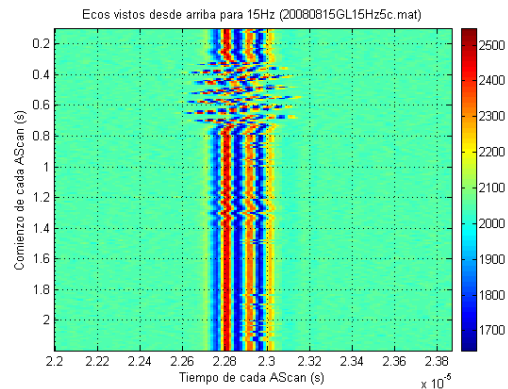


Fig.21b BScan para vibración con 5 ciclos a 15 Hz.

Vemos en la figura 22 que el método de correlación no es apropiado para estudiar la señal.

Una posible explicación es que la frecuencia de adquisición de los Ascans es insuficiente para que el algoritmo correlacione un eco con el siguiente, cuando la amplitud de la vibración es importante.

Esto no sucede con los otros dos métodos que parecen ser equivalentes, aunque el método del máximo es el más sencillo y rápido de los tres.

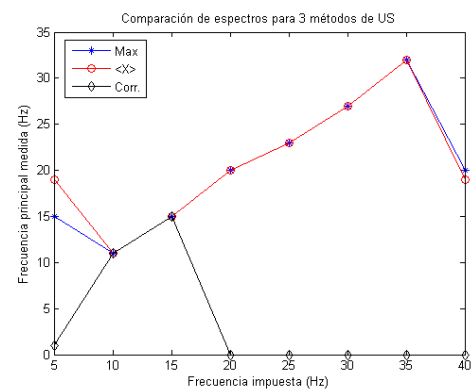


Fig.22 Comparación de las frecuencias principales de los Ascans determinadas por 3 métodos.

3. Validación del método óptico

Comparamos la señal de ultrasonido adquirida con el CORELEC a 600 Hz para una vibración producida por un burst de 5 ciclos de senoide de 25 Hz, con la adquirida por el método óptico en el mismo montaje (fig.11).

En la figura 23 vemos el movimiento de la superficie al mostrar 200 Ascans tomados con una $f_{rep}=1\text{KHz}$ con el CORELEC.

En la figura 24 vemos la posición normalizada de la interfase obtenida por el método del máximo.

Filtramos la señal del método de ultrasonido con un filtro pasabajos de 35 Hz de corte, como se ve en las siguientes figura 24.

Si comparamos la figura 23 con la fig.21b, vemos la ventaja de emplear una mayor f_{rep} para la validación del método.

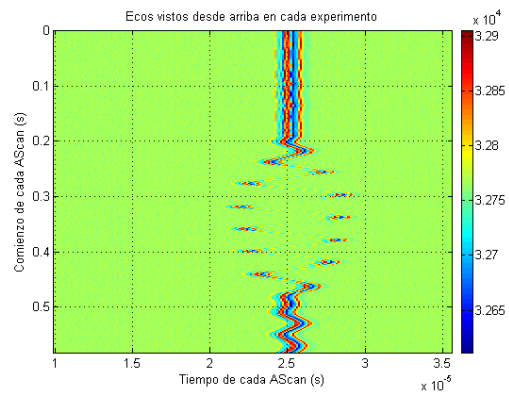


Fig.23 Bscan de la superficie al ser excitada con un burst de 5 ciclos a 25 Hz obtenido con el CORELEC a 1 KHz de f_{rep} .

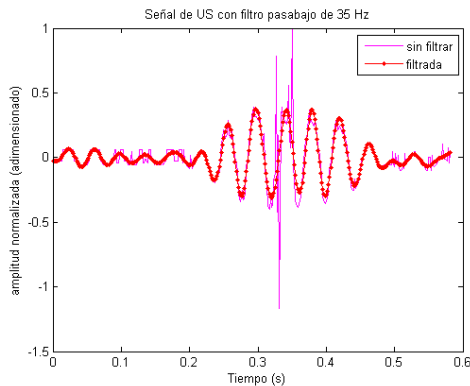


Fig.24 Posición de la interfase obtenida por el método del máximo a la señal tomada con el CORELEC para la vibración de 25 Hz y la misma señal filtrada con pasabajos de 35 Hz.

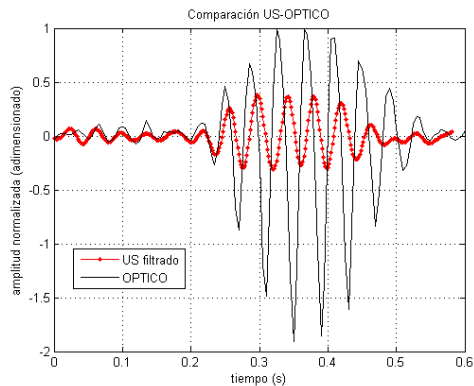


Fig.25 Posición de la interfase obtenida por el método óptico para la vibración de 25 Hz y la señal obtenida por ultrasonido (filtrada a 35 Hz). Ambas normalizadas en amplitud.

Finalmente comparamos la derivada numérica de la señal filtrada del método de ultrasonido con la señal del método óptico **sin cambiar los orígenes de tiempo**, pues ambas fueron tomadas a la **misma distancia d** de propagación, en el mismo gel (fig.15a) y gatilladas por el mismo trigger.

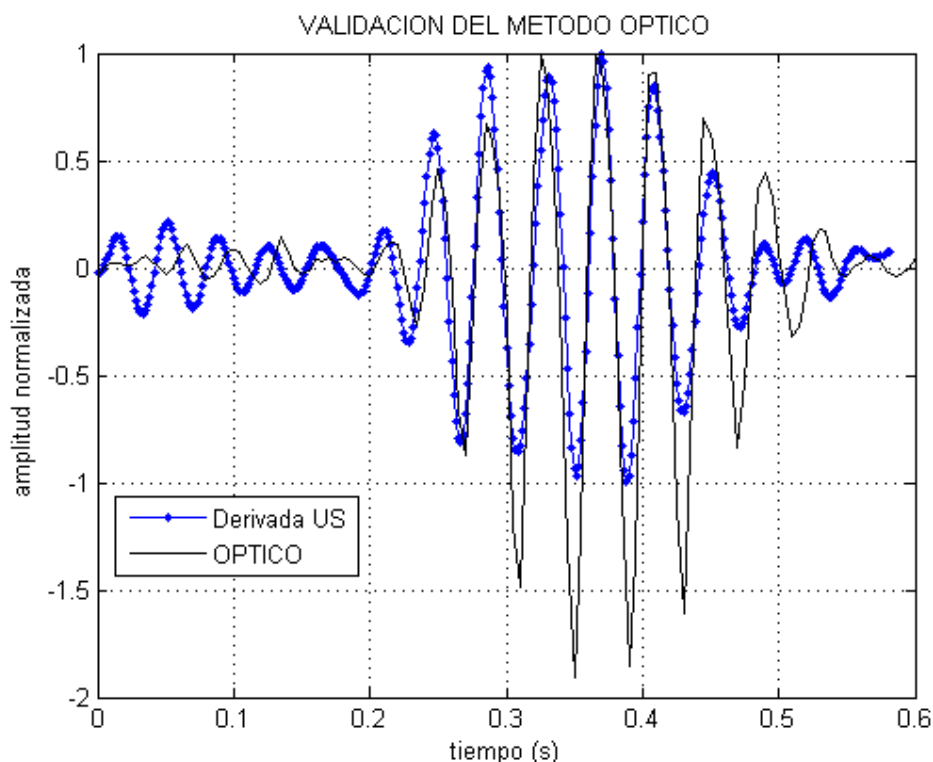


Fig. 26 Comparación entre la derivada de la posición vertical determinada por el método de ultrasonido y la posición vertical en la pantalla.

Nótese que una derivación de una señal casi sinusoidal respecto de la variable espacial es equivalente a su derivada temporal a menos de un factor constante. La derivada debe quedar desfasada en $\pi/2$. Se observa una concordancia elevada entre ambas señales en la zona de la excitación externa, como se esperaba.

4. Conclusiones

El método óptico resultó ser válido para el estudio de perturbaciones de la superficie y mostró (como predice la teoría) ser más sensible a pequeñas variaciones de la pendiente de la superficie que a los cambios en su posición vertical.

El método de correlación no resultó apropiado para la determinación de la posición del gel cuando la superficie vibra con amplitud importante debido a que la onda reflejada sale del haz direccional del transductor y cambia mucho de un Ascan al siguiente.

5. Posibles trabajos futuros

El método permite estudiar vibraciones en dos dimensiones y podría emplearse para estudiar la superposición de ondas viajeras en distintas direcciones, lo que constituye una ventaja respecto al método de ultrasonido empleado (sin speckles).

En medidas preliminares (que no se incluyen) se ha observado al excitar el gel en uno de sus vértices con una senoide de 20 Hz, un patrón en el movimiento de la mancha de tipo “8” lo cual sugiere la presencia de una frecuencia en X doble de la Y. A su vez se ha observado una “resonancia” indicada por un súbito e importante aumento en el “diámetro” del movimiento del punto Q en la pantalla, al efectuar un barrido en frecuencia de 10 a 50 Hz.

Bibliografía

- [1] Pixelink PL-A780 System Guide Doc.No 04646-01
- [2] Diode Tutorial www.mayothi.com/diodes.html
- [3] IIDC 1394-based Digital Camera Specification
- [4] Ismael Núñez, “Estudio óptico de vibraciones de superficie adaptado para medios viscoelásticos”, Lab. de Acusto Óptica – F.Ciencias, 2008

