MESA HOLOGRÁFICA PASIVA ULTRA-ESTABLE: ANÁLISIS DE VIBRACIONES

G. Muñoz H.
Departamento de Física, DCBI, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, DCNI, Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, 09340 México D.F., Ap. postal. 55-534, MEXICO
e-mail: gmunoz@correo.cua.uam.mx

C. García
Lab. de Óptica Cuántica, Depto. de Física, Universidad A. Metropolitana -Iztapalapa, 09340 México D.F., Ap. postal. 55-534, MEXICO
e-mail: loc@xanum.uam.mx

M. Muñoz H.
CIDEPRO SA de CV, Carr. Gómez Palacio-Tlahualilo, Km. 31 S/N, Glorieta, Mpio. De Gómez Palacio Durango, CP 3511
e-mail: cidepro@gmail.com

M. Fernández Guasti
Lab. de Óptica Cuántica, Depto. de Física, Universidad A. Metropolitana -Iztapalapa, 09340 México D.F., Ap. postal. 55-534, MEXICO
e-mail: mfg@xanum.uam.mx, url: http://investigacion.izt.uam.mx/mfg/

RESUMEN

Se estudian las frecuencias resonantes de una mesa holográfica diseñada y fabricada localmente. Dichas mesas son sumamente estables, bastante inmunes a las vibraciones externas y libres de mantenimiento. Se analiza el espectro de vibraciones de la mesa antes de colocar el material amortiguador para ubicar las distintas resonancias dependiendo del punto de excitación. Las excitaciones se realizaron en el cruce de las nervaduras y en el centro de los cuadrados delimitados por estas. La caracterización de los modos de vibración de la mesa es una referencia importante para posteriormente poder evaluar el factor de amortiguamiento así como el corrimiento de las resonancias.

Palabras clave: Mesa holográfica, mesa óptica, análisis de vibraciones.

1. Introducción

Se utilizan mesas estables para experimentación óptica, metrología y otras aplicaciones que requieren gran estabilidad. En la medida que distintos dispositivos han permeado en la industria, dichas mesas son necesarias en ambientes más adversos por ejemplo, naves industriales que utilizan rotulación o grabado con láser.

El primer problema a resolver en una mesa óptica es el aislamiento de las vibraciones provenientes del exterior, particularmente a través del piso que soporta a la mesa. Los soportes para mesas holográficas son pasivos o activos y usualmente contienen una cámara de hule con gas. Son activas si contienen un mecanismo de variación de presión para mantener el nivel de la mesa o pasivas si carecen de dicho mecanismo. El principal problema de los soportes es su mantenimiento. Las mesas ópticas difícilmente operan con el sistema flotado durante más de la mitad de su vida útil, ya que son frecuentes las fugas de gas, se requieren instalaciones especiales para su suministro y el hule de las cámaras envejece y se degrada.

La segunda parte a resolver en la construcción de una mesa óptica es la superficie que se coloca sobre los soportes de aislamiento. Los cuatro criterios principales a observar para la superficie son:

1. rigidez ante deformaciones

2. frecuencias de resonancia

3. amortiguamiento ante vibraciones

4. acoplamiento de monturas ópticas sobre la superficie

La rigidez se obtiene mediante una placa de un material duro suficientemente grueso que sin embargo puede resultar excesivamente pesado; tal ha sido el caso de las placas de granito o de acero con espesores considerables. Una solución para reducir el peso y mantener la rigidez ha sido utilizar nervaduras en la parte inferior de la superficie. La mayoría de las mesas comerciales utilizan una estructura tipo panal firmemente unida bajo la superficie plana, tanto en la parte superior como en la inferior, de la estructura.

Las frecuencias de resonancia de la superficie dependen de los modos de vibración. Para una mesa rectangular los modos longitudinales a lo largo y ancho de la superficie así como los modos torsionales son los primeros a considerar[1]. Se procura un diseño cuyos modos resonantes se encuentren lejos de las vibraciones comunes que afectan a los laboratorios y las áreas de trabajo. Las fuentes mecánicas de vibración en edificios[1,2] se ubican a frecuencias bajas, entre 4 y 100 Hz; éstas son bombas de vacío, elevadores, la descarga en sanitarios, compresores de aire, tráfico vehicular transmitido a los edificios entre otras. La mayoría de estos movimientos son trepidatorios aunque en los pisos superiores de edificios la vibración horizontal es considerable. El equipo eléctrico también es una fuente de vibración; los transformadores y los ventiladores producen vibraciones entre 50 y 400 Hz. Las vibraciones acústicas se ubican en frecuencias intermedias y altas, entre 100 y 15,000 Hz; de éste intervalo posiblemente las más nocivas, por su amplitud y probable acoplamiento con componentes ópticas, son las que se encuentran entre 200 y 2 kHz.

A pesar de los mecanismos de aislamiento, las mesas reciben remanentes que se transmiten a través de los soportes o del aire así como de los equipos que se encuentran sobre la mesa. Por ejemplo, en ocasiones es posible aislar la fuente eléctrica de un láser en un estante separado de la mesa; sin embargo, en muchos láseres la fuente está contenida dentro del cabezal y es deseable anclarlos a la mesa. Las vibraciones a través de los sistemas de enfriamiento son inevitables cuando se trabaja con láseres de potencias considerables. Por éstos motivos es muy importante incorporar en las mesas mecanismos de amortiguamiento de las vibraciones. Los sistemas comerciales ubican materiales compuestos en las zonas más críticas de las mesas para absorber las vibraciones y atenuarlas.

Finalmente para el acoplamiento de componentes, son óptimas las superficies que permiten el maquinado de cuerdas para atornillar firmemente o bases magnéticas en experimentos donde los campos magnéticos no son críticos. Para éstos propósitos las superficies de acero son, en la actualidad, el material empleado por excelencia; en algunos casos se utiliza un recubrimiento delgado de otro material con la finalidad de evitar la oxidación de la superficie.

El presente trabajo se centra en la caracterización de las frecuencias resonantes de la superficie de una mesa óptica diseñada y construida conjuntamente entre el laboratorio de óptica cuántica de la UAM-Iztapalapa en el Distrito Federal y el Centro de Investigación y Desarrollo de Productos (CIDEPRO SA de CV) ubicado en el municipio de Gómez Palacio Durango. Esta mesa, primera en fabricarse a raíz de éste desarrollo conjunto, actualmente se utiliza exitosamente para albergar un sistema de pulsos de femtosegundos cuyas exigencias de estabilidad son de 20 μrad en el direccionamiento del haz. Esto implica un desplazamiento máximo de 48 micrómetros en una distancia de 2.4 metros.

2. Respuesta ante impulsos

Antes de implementar el amortiguamiento de la mesa se analizaron tanto el decaimiento de vibraciones como las frecuencias de resonancia. La superficie de la mesa se encontraba ya con la estructura de nervaduras, que lleva en la parte interior, firmemente pegada.

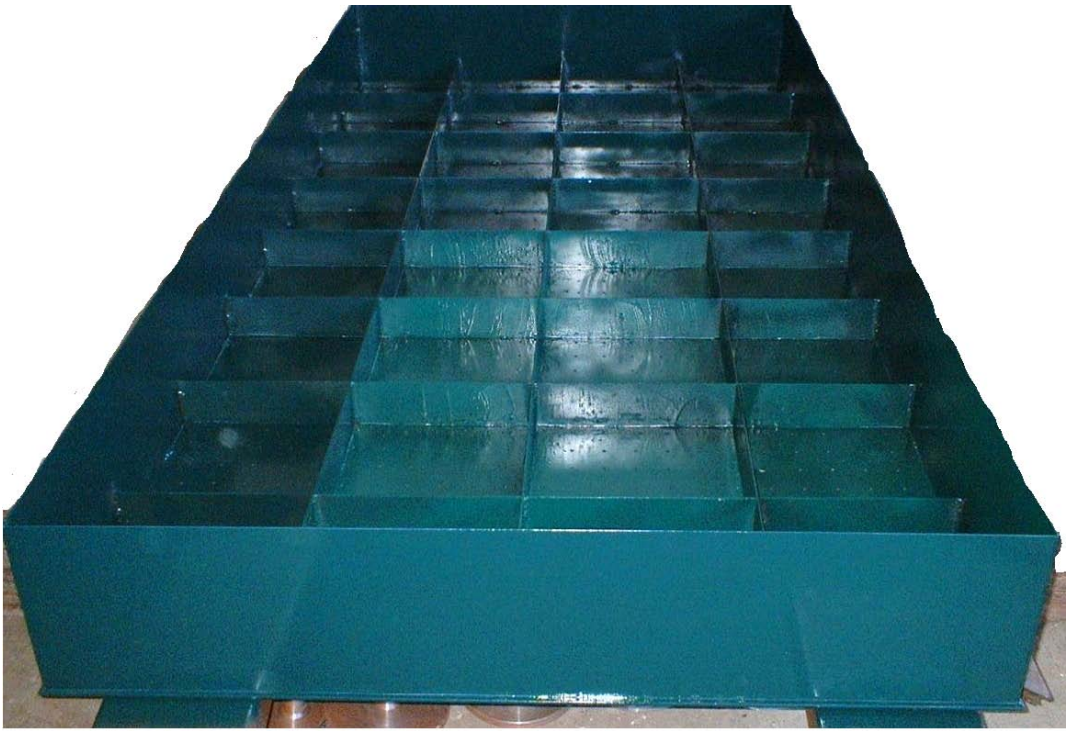

Figura 1: Fotografía que muestra las nervaduras, formando un cuadriculado, ubicadas en la parte inferior de la mesa para dar rigidez a la superficie.

Se aplicaron golpes con un cilindro de madera de 25 mm de diámetro y 30 cm de longitud; este fué empuñado y se dejo caer el brazo de una persona de complexión regular desde una altura de 25 cm golpeando con la punta de la madera. Se registró el sonido de respuesta de la superficie con el micrófono de un teléfono celular Nokia modelo 5130C. Se realizaron golpes en distintas posiciones sobre la mesa y se repitió el proceso de grabación para cada caso.

2.1 Respuesta temporal

El audio registrado con el teléfono se archiva en formato digital de audio AMR. Los archivos .amr se tradujeron a archivos de audio digital de disco compacto .wav con resolución de 44.1 kHz. Los archivos .wav se graficaron con el programa multiplataforma de código abierto audacity 1.3.12-beta[3]. La figura 2 muestra un registro típico de la respuesta a varios impulsos. Como se ve de la figura los golpes se realizaron cada segundo aproximadamente.

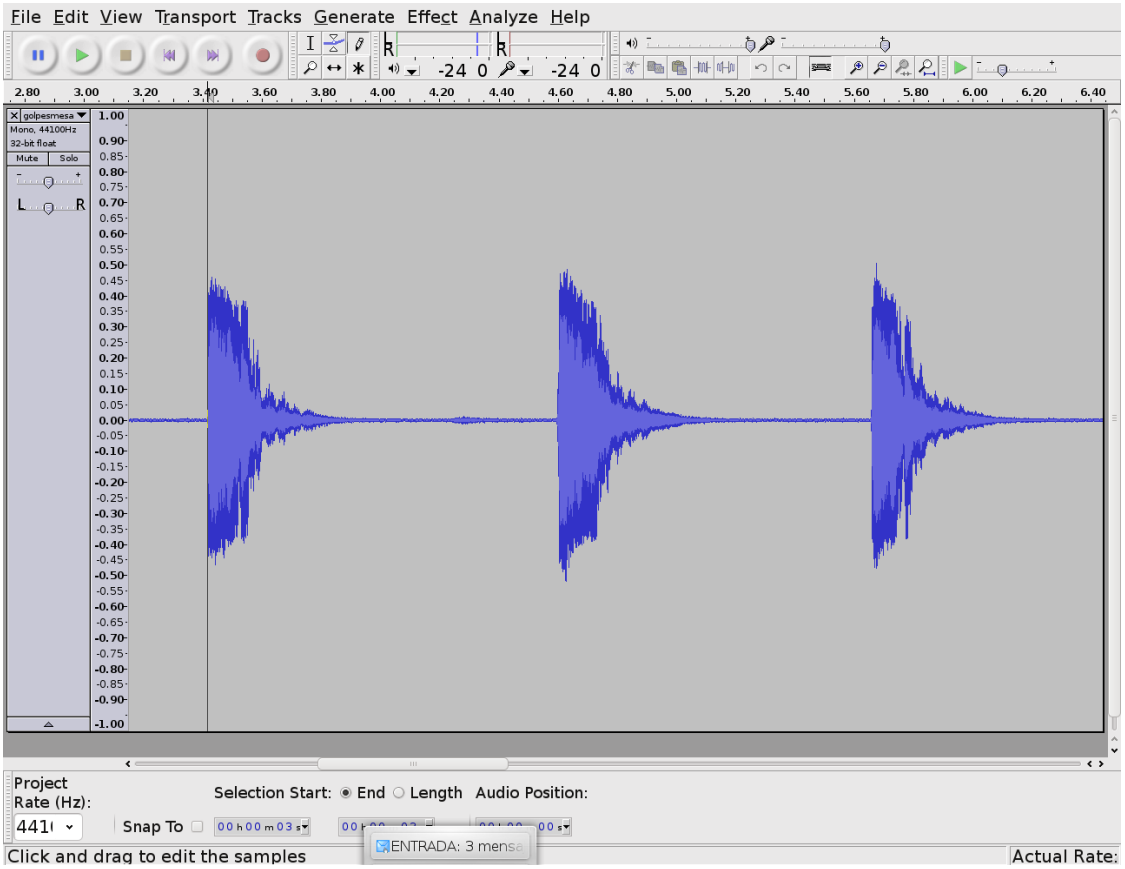

Figura 2: Impulsos sobre superficie, respuesta temporal. Escala de 3.2 segundos, se observa la respuesta a varios impulsos graficada con el programa de código abierto *audacity*.

En la figura 3 se muestra el pulso en escala total de 300 ms. Probablemente la primera parte densa entre 3.420 a 3.490 segundos corresponde al golpe de excitación mientras que la evolución subsiguiente a 3.490 es la del sistema libre. El tiempo de decaimiento de las vibraciones como se ve de ésta figura es del orden de 200 ms. La modulación en la amplitud sugiere la presencia de batido de ondas con frecuencias similares. Éste tiempo es similar al reportado en mesas comerciales con amortiguamiento pasivo[1]. Sin embargo, recuérdese que la respuesta temporal aquí reportada se registró antes de implementar el sistema de amortiguamiento.

[1] Ver por ejemplo la serie ST-UT2 de Newport Corp., o la serie UltraPlus de Thor Labs.

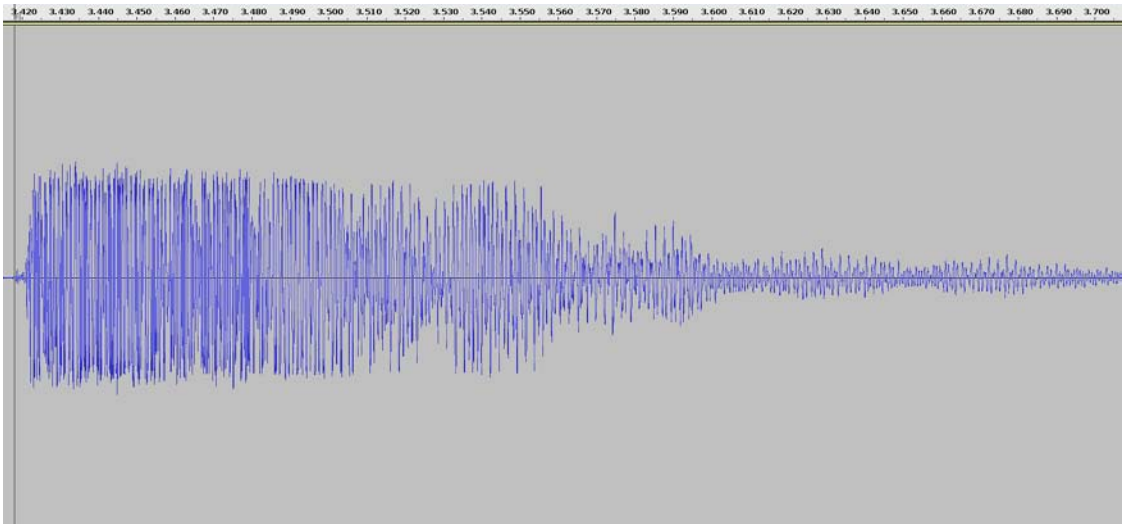

Figura 3: La respuesta de un sólo impulso en escala de 300 ms donde se comienzan a resolver las oscilaciones de audio. En la parte superior se muestra la escala temporal de la medición de 3.420 a 3.700 segundos. El eje de las ordenadas corresponde a la amplitud del registro de audio en unidades arbitrarias.

2.2. Análisis en frecuencia

El espectro de frecuencias se obtuvo digitalmente mediante la transformada de Fourier rápida realizada con el programa *audacity*. Una curva típica del espectro de frecuencias tanto de un solo impulso como del conjunto de 12 pulsos se muestra en la figura 4. Al realizar la transformada de Fourier de varios impulsos es equivalente a realizar un promedio que reduce el ruido pero mantiene las resonancias que se repiten en la serie de pulsos. Por este motivo, se favoreció trabajar con el conjunto de impulsos registrados en cada caso.

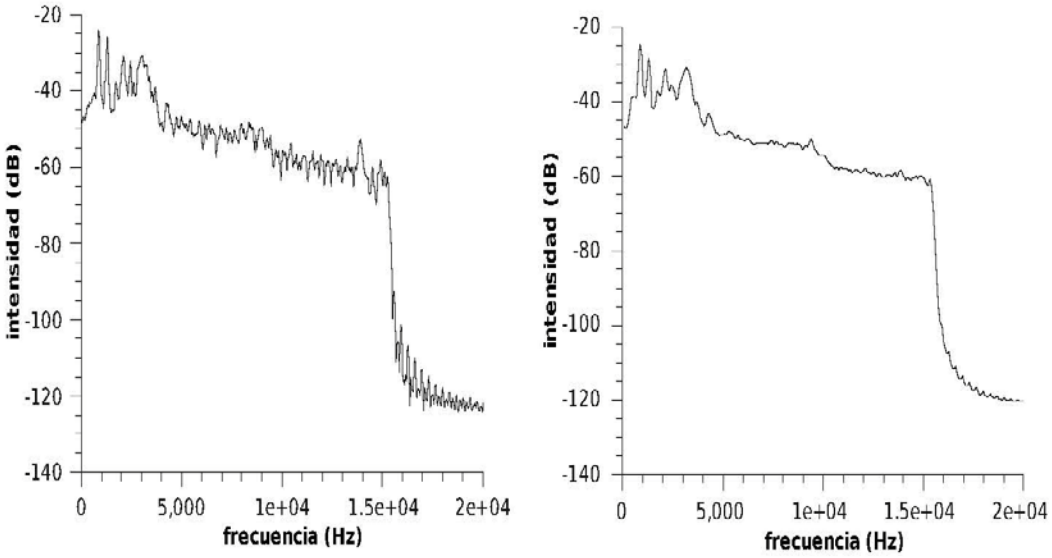

Figura 4. La gráfica de la izquierda muestra la transformada de Fourier de un solo impulso (o golpe) mientras que a la derecha se muestra la transformada de 12 impulsos. La caída drástica de intensidad a 16 kHz se debe a la respuesta limitada del micrófono de grabación.

Como mencionamos en la introducción, las frecuencias más nocivas para arreglos ópticos se encuentran entre 0 y 2 kHz. Asimismo, es en éste rango donde se observan las resonancias más notorias de la superficie de la mesa. Para recolectar la información sobre las resonancias en éste intervalo se utilizaron espectros con escala logarítmica de la frecuencia como se muestra en la figura 5. El programa permite ubicar la resonancia más cercana al cursor indicando su frecuencia e intensidad. Con éste procedimiento se ubicaron las diez resonancias más intensas de cada espectro y se registraron en una hoja de cálculo.

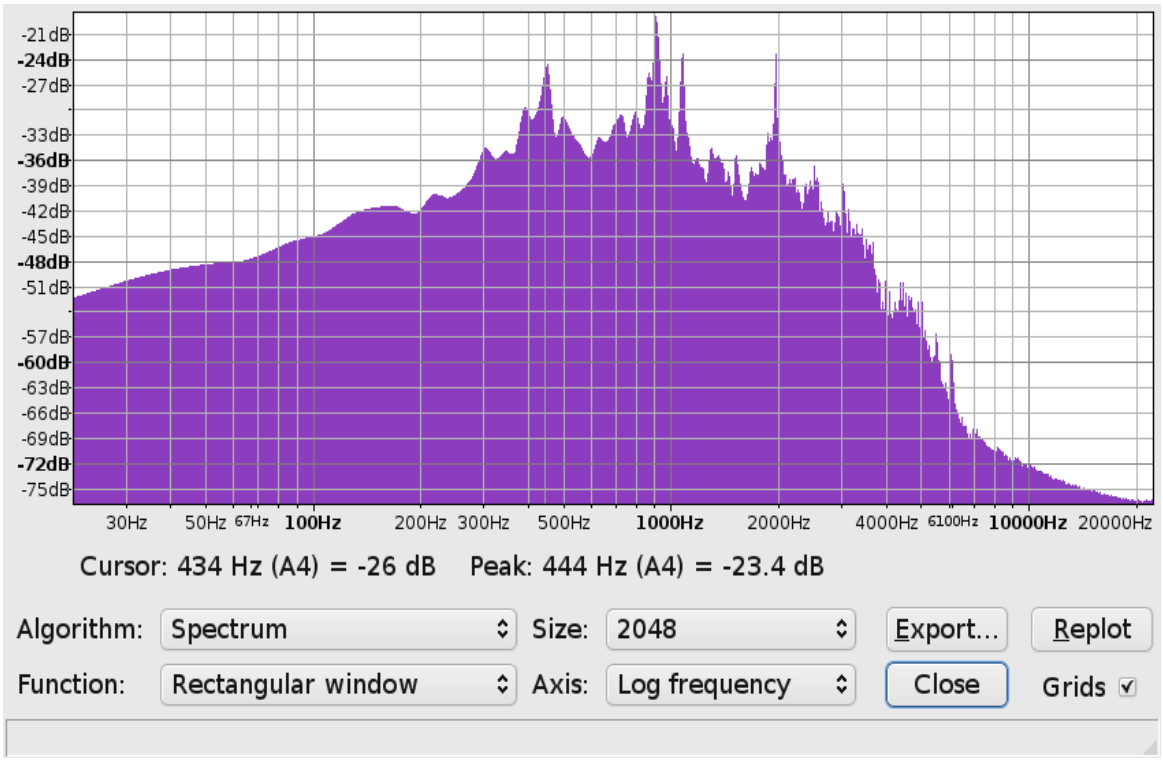

Figura 5: La transformada de Fourier se graficó con escala de frecuencia logarítmica para separar nítidamente las resonancias a baja frecuencia. Aquí se muestra el cursor en la vecindad de la resonancia de 444 Hz con intensidad relativa de -23.4 dB. Estos valores se registraron para las diez resonancias más intensas.

Se dividió la mesa en secciones de acuerdo a las nervaduras de la parte inferior. Se numeraron los cuadros delimitados por las nervaduras así como los cruces de las mismas como se muestra en la figura 6. Se realizaron varios golpes en cada posición y se registró el sonido producido. De ésta manera se obtuvieron 21+32 registros de audio. Para cada uno de los 53 registros se obtuvo la transformada de Fourier y se anotaron las 10 frecuencias resonantes más notorias y su intensidad relativa en cada caso. Las 530 parejas de datos se graficaron en dos grupos, uno cuando se excitó en las cruces y otra cuando se excitó en el centro de los cuadros.

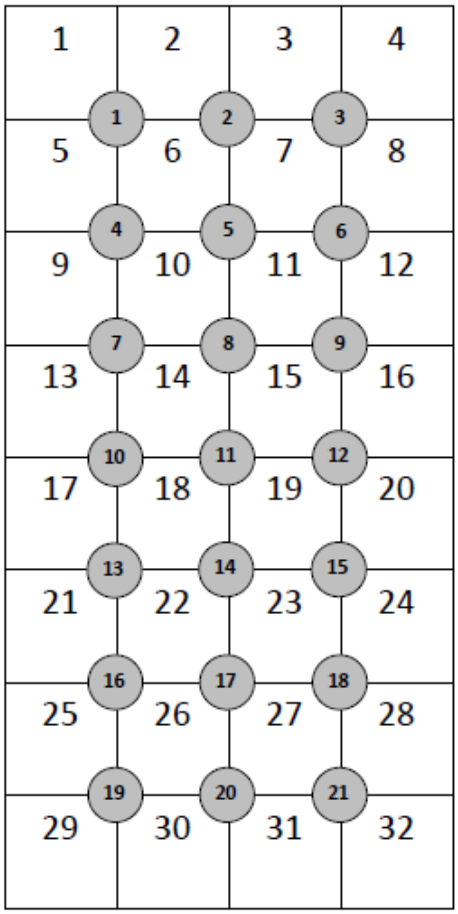

Figura 6. Esquema de secciones de la mesa

2.2.1 Excitación en cruces de nervaduras

Como es bien conocido, dependiendo del punto de impulso se pueden excitar o inhibir distintas frecuencias resonantes de una estructura. De ahí la importancia de evaluar la respuesta de la estructura ante el estímulo en distintos puntos. Las nervaduras, debido al aumento de rigidez que producen, son lugares donde se ubicarán los nodos de las ondas contrapropagantes. Al producir la excitación en las cruces de las nervaduras, se levanta ésta restricción de se forza a que éstos puntos, otrora nodos, oscilen inicialmente con máxima amplitud.

En la figura 7 se muestran las diez resonancias más intensas para cada uno de los puntos de excitación en las cruces. Un conglomerado vertical de puntos muestra que existe una misma frecuencia resonante para una multitud de puntos de excitación, es decir, una resonancia de la estructura. La figura 7 muestra un conglomerado centrado en 904 ± 10 Hz con intensidades relativas entre 1 y 8 dB. Existe una segunda resonancia menos intensa alrededor de 619 ± 17 Hz con intensidades relativas entre -2 y 4 dB. Por debajo de 500 Hz no hay resonancias bien definidas sino una dispersión de máximos locales para cada punto de excitación. Por debajo de 200 Hz las intensidades decrecen a menos de -15 dB y recordando que la escala es logarítmica los valores comienzan a ser despreciables. Para frecuencias arriba de 1 kHz hay dos pequeñas resonancias, una a 1058 ± 5 Hz, centrado en -4 dB y otra a 1306 ± 13 Hz centrado en -1 dB. Es necesario un análisis más profundo para ubicar los puntos de excitación que producen estas resonancias.

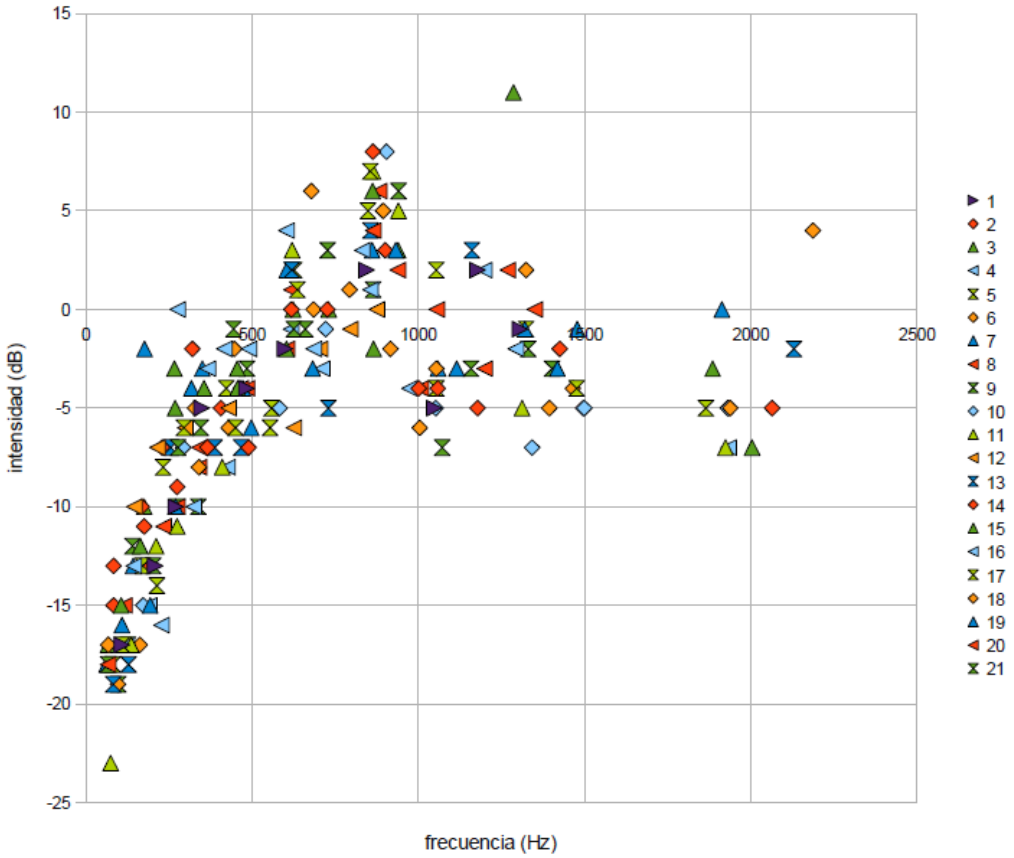

Figura 7. Resonancias producidas con impulsos sobre las cruces de las nervaduras. Se grafican las frecuencias resonantes en el intervalo de 0 a 2.5 kHz versus la intensidad relativa. El número de cada serie corresponde a la posición de la excitación (ver. fig.6). Los aglomerados verticales exhiben resonancias de la estructura.

2.2.2 Excitación en cuadros

Al aplicar la excitación en el centro de los cuadros se producen las resonancias mostradas en la figura 8 dependiendo del cuadro que se está excitando. Las líneas verticales que implican resonancias de la estructura son ahora más nítidas y más intensas. Este comportamiento es esperable pues corresponde a una excitación en los antinodos donde la amplitud será máxima. Tal es el caso del conglomerado de puntos alrededor de 908 ± 10 Hz y con intensidades relativas entre -1 y 10 dB. Ésta resonancia coincide con aquella que presenta la excitación en cruces. Se observa otra resonancia alrededor de 449 ± 15 Hz con intensidades entre -2 dB y 10 dB. No hay sino evidencia muy tenue de ésta resonancia en el caso de excitación de las cruces lo que sugiere que corresponde a un modo con nodos en algunas nervaduras. Hay otra resonancia muy cercana en 360 ± 16 Hz con rango de intensidades de -4 a 3 dB. Debido a la dispersión de los datos a bajas frecuencias es difícil concluir si hay otra resonancia alrededor de 240 Hz entre -10 y -5 dB.

Por otro lado, a frecuencias superiores a 1 kHz hay un pequeño remanente alrededor de 1060 Hz que podría coincidir con la resonancia de 1058 en la excitación de cruces. De manera mucho más clara se observan dos resonancias en las que participan un número menor de puntos de excitación, una en 1742 ± 30 Hz con intensidades entre -7 y 5 dB y otra en 1898 ± 29 Hz con -3 a 3 dB.

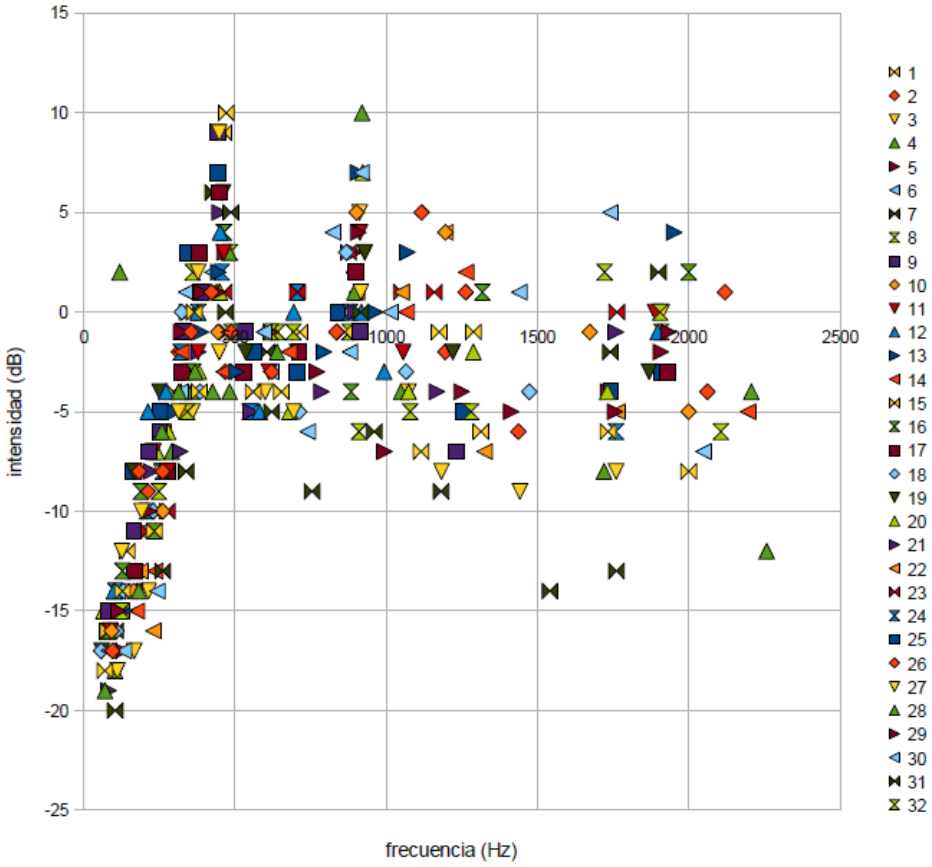

Figura 8. Resonancias producidas con impulsos sobre el centro de los cuadros acotados por las nervaduras (ver figura 6).

3. Análisis

La ecuación diferencial de un oscilador forzado con masa *m*, rigidez *k*, constante de amortiguamiento γ, frecuencia de resonancia $\omega_0=(k/m)^{1/2}$ y fuerza externa $F=F_0\sin(\omega t)$ es

$$x + x\ddot{} + \dot{k}x = F_0\sin(\omega t) \qquad (1)$$

. La 'conformidad' o flexibilidad del oscilador está dado por la razón del desplazamiento por unidad de fuerza. Para un oscilador armónico

$$\frac{x}{F} = \frac{1}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2+(\gamma\omega)^2}} \qquad (2)$$

que puede reescribirse como

$$\frac{x}{F} = \frac{k^{-1}}{\sqrt{\left(1-{\omega^2}/{\omega_{0j}^2}\right)^2+\left(2\zeta\frac{\omega}{\omega_{0j}}\right)^2}} \qquad (3)$$

Donde la razón de amortiguamiento es $\zeta = \gamma/\left(2\sqrt{km}\right)$ y se han permitido varias resonancias.

Las frecuencias $\omega_{0j} = 2\pi\nu_{0j}$ más intensas reproducibles con distintos puntos de excitación se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1. Principales frecuencias resonantes de la estructura

	Frecuencia ν_{0j}	**Intensidad media**	**Excitación en**
1	908 ± 10 Hz	5 dB	Cuadros y cruces
2	449 ± 15 Hz	4 dB	Cuadros
3	360 ± 16 Hz	0 dB	Cuadros
4	1058 ± 5 Hz	-1 dB	Cuadros y cruces
5	1742 ± 30 Hz	-1 dB	Cuadros
6	1898 ± 29 Hz	0 dB	Cuadros

Es posible que la frecuencias 2 y 1 correspondan a los primeros dos modos de una deformación pues la frecuencia 2 es el doble de la frecuencia 1. Sin embargo puesto que la mesa tiene el doble de longitud que de ancho también podrían corresponder a modos con flexión en la dirección a lo largo y ancho de la mesa. La frecuencia más baja, en este caso 360 Hz debería corresponder al modo de menor frecuencia que es aquel flexionado a lo largo de la mesa con amplitud máxima al centro y nodos en los extremos de la mesa. Sin embargo, estas posibilidades son especulativas en tanto no se realice un modelo teórico más refinado de los modos que exhibe la superficie.

4. Conclusiones

Se ha caracterizado la respuesta temporal y las frecuencias de resonancia de una superficie óptica desarrollada y construida en México. El decaimiento temporal es del orden de 200 ms antes de colocar los elementos de amortiguamiento. Las frecuencias de resonancia más intensas se ubican alrededor de 450 Hz y 900 Hz. Una vez que la mesa se encuentre amortiguada y montada será necesario evaluar con el mayor cuidado la estabilidad alrededor de éstas frecuencias.

Un corolario importante de éste trabajo es la delgada línea que puede existir entre la investigación básica y los desarrollos científicos aplicados. Las mesas holográficas se desarrollaron en el laboratorio de óptica cuántica como una necesidad para realizar hologramas y albergar distintos equipos ópticos. Las mesas fueron desarrollo colateral del tema de investigación que sin embargo ha cobrado importancia por la factibilidad de su fabricación en México.

BIBLIOGRAFÍA

1. http://www.thorlabs.com/tutorials/tables.cfm, **"***SOURCES OF VIBRATION, THEORY OF TABLETOP VIBRATION*", Copyright © 1999 - 2010 Thorlabs.

2. Hal Amick*, Michael Gendreau, Todd Busch, and Colin Gordon, " *Evolving criteria for research facilities: I – Vibration"*, Reprinted from Proceedings of SPIE Conference 5933: Buildings for Nanoscale Research and Beyond, San Diego, CA, 31 Jul 2005 to 1 Aug 2005, HA-MG-TB-CG: Criteria; SPIE 2005 Page 1 of 13.

3. http://manual.audacityteam.org/index.php?title=Main_Page, *"Audacity User's Manual (Beta release 1.3.12)"*, Julio 2010.