



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A172

Variaciones espectrales en la radiación sonora de las membranas circulares según su punto de excitación

Alan J. Chorubczyk^(a),
Ernesto Vaneskeheian^(a),
Pablo Kogan^(a).

(a) Ingeniería en Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero. Valentín Gómez 4828/38, Caseros, Buenos Aires, Argentina. E-mail: caseros@untref.edu.ar

Abstract

This paper studies the behaviour of circular membranes when stimulated by impact on different points. Taking into account properties of the excitation, patterns were searched between the oscillation of the membranes, hearing perception and changes in sound spectrum. For the development of this investigation, several instruments with circular membrane were used and their acoustic emission was recorded and analyzed. The results of this experiences showed that as closer to the perimeter the stimulation occurs, greater amount of vibration modes can be found and the oscillation pattern becomes less predictable. This causes in the sound spectrum an increase in number and levels in the superior partials.

Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento de las membranas circulares ante los estímulos provocados por impactos en diferentes sectores de las mismas. En función de las características de la excitación se buscaron relaciones entre la forma de oscilación de las membranas, su percepción auditiva y los cambios en su espectro sonoro. Para el desarrollo de la investigación se experimentó con varios instrumentos de membrana circular y su emisión acústica fue registrada y posteriormente analizada. Como resultado de la experiencia se halló que cuanto más cerca del perímetro son estimuladas las membranas, mayor cantidad de modos de vibración son excitados y la forma de oscilación se torna menos predecible. Esto provoca en el espectro un incremento en el número y los niveles sonoros de los parciales superiores.

1 Introducción y marco teórico

Al percutir una membrana circular en diferentes sectores, se distingue de forma inmediata que la percepción sonora varía. Los impactos en el centro se suelen calificar por su percepción como productores de un sonido “opaco” y “gordo”. En cambio, los impactos producidos cerca del perímetro se suelen identificar como “brillantes. ¿Hay explicación mediante el análisis espectral a esta diferencia? ¿Qué cambios en el espectro se producen al cambiar el lugar de impacto?

El estudio de las membranas circulares tuvo como principal exponente al físico y músico alemán Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827). Quien desarrolló una técnica para identificar los modos normales de vibración en una superficie mecánica mediante la continuación de la investigación realizada por Robert Hooke. Esta técnica consiste en la aplicación de arena fina sobre la superficie de una placa que luego será excitada mediante la inducción de vibraciones. Al ser excitada la placa se produce la acumulación de la arena en las líneas nodales, líneas que separan sectores vibrantes que oscilan en contraste. Éstas reproducen una serie de esquemas sobre la placa, llamados modos normales de vibración de Chladni (Figura 1). Cada modo corresponde a una determinada frecuencia de vibración. Los modos describen a simple vista los sectores oscilantes de la placa según la frecuencia en que ésta vibra. Con esta misma técnica se logran identificar modos de vibración para diferentes superficies, entre las cuales se incluyen las membranas circulares.

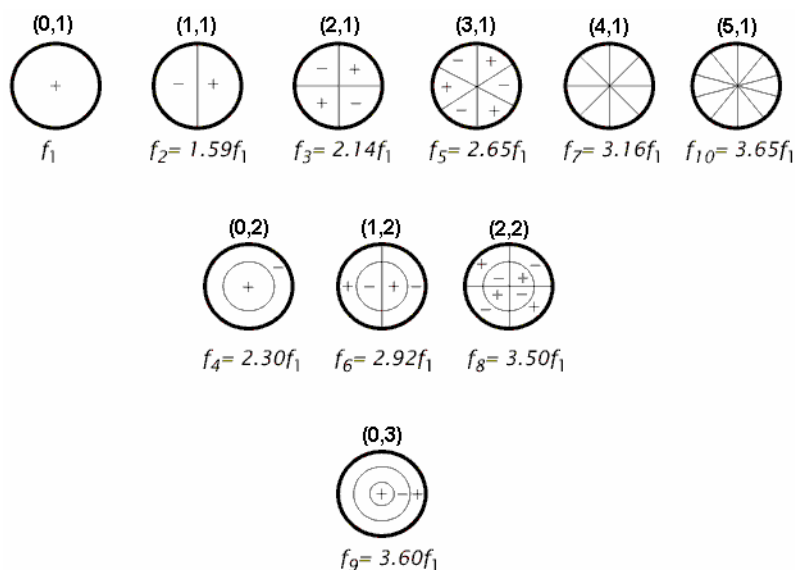


Figura 1. Primeros diez modos normales de vibración de una membrana circular y su respectiva relación con la fundamental f_1 . El par de números expuesto sobre cada modo, es la nomenclatura del mismo. El número de la izquierda hace alusión a la cantidad de líneas nodales axiales y el número de la derecha a la cantidad de líneas concéntricas; siendo la primera la del perímetro de la membrana.

Estos modos normales de vibración y sus respectivas frecuencias se pueden calcular de modo analítico. Para ello se supone una membrana circular delgada y uniforme con rigidez despreciable, que es perfectamente elástica sin amortiguamiento, y que vibra con

desplazamientos de amplitud pequeños. Tomando coordenadas polares y si el radio de la membrana es $r = a$ entonces la condición de frontera en la cual su movimiento es nulo es:

$$y(a, \theta, t) = 0 \quad (1)$$

entonces los modos normales de vibración de una membrana circular están dados por:

$$y(r, \theta, t) = A_{mn} j_m(k_{mn} r) \cos(m\theta + \gamma_{mn}) e^{j\omega_{mn} t} \quad (2)$$

Donde intervienen los enteros $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ y $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, el ángulo de fase azimutal γ_{mn} que determina las direcciones en que, para cada modo normal, aparecerán líneas nodales, $A = A_{mn} \exp(j\gamma_{mn})$ y la constante $k = \omega/c$ en la cual:

$$c = \sqrt{\tau/\rho_s} \quad (3)$$

τ es la tensión en la superficie de la membrana por unidad de longitud y ρ_s a densidad superficial de la misma (masa por unidad de área).

Además, $k_{mn} a = j_{mn}$ y por consiguiente las frecuencias naturales son:

$$f_{mn} = \frac{1}{2\pi} \frac{j_{mn} c}{a} \quad (4)$$

El movimiento físico de los modos normales designados por los enteros (m, n) está dado por la parte real de la función (2):

$$y(r, \theta, t) = A_{mn} j_m(k_{mn} r) \cos(m\theta + \gamma_{mn}) \cos(\omega_{mn} t + \phi_{mn}) \quad (5)$$

2 Metodología de la Investigación

Para el análisis del comportamiento espectral de las membranas se procedió a registrar muestras de la emisión acústica producida por impactos en las mismas. Para el proceso de registro se utilizaron instrumentos de membrana circular con perímetro fijo, cuyo criterio de selección fue su cotidianeidad de utilización. Se utilizó un tambor redoblante marca “Mapex Chromium” de 14” de diámetro y 6,5” de profundidad, con una membrana circular (parche) marca “Evans Genera HDD” de 14” de diámetro y 0,008” de espesor; y un tom “Mapex” de 13” de diámetro y 10” de profundidad, con una membrana circular “Remo Weatherking Pinestripe” de 13” de diámetro y 0,007” de espesor. Por otro lado, se seleccionó un elemento percutor (baqueta) de madera y de punta redonda, rígida y pequeña (1 cm de diámetro), a fin de obtener impactos rápidos y ricos espectralmente. Con respecto al tamaño del extremo del palillo, éste sólo puede excitar modos que tengan líneas nodales separadas por una distancia mayor que la superficie de contacto; lo que influye en la cantidad de parciales generados.

Para el registro de las muestras se utilizó el estudio de grabación de la Escuela Técnica ORT, cuyas dimensiones son 4m x 3m x 2,80m. El sistema de grabación del estudio consta de una consola analógica de grabación Makie 32-8, un procesador iMac G5, una placa de audio Digi 002 Rack, software de grabación Pro Tools LE y un micrófono de condensador omnidireccional AKG C414 LTD (figura 2). Debido a las limitaciones del instrumental

empleado y de la sala, las que distan de ser condiciones de laboratorio, se mantuvo invariante la posición del micrófono. Por otro lado, como consecuencia del tipo de micrófono empleado los espectros obtenidos son válidos sólo a fines comparativos entre ellos mismos.

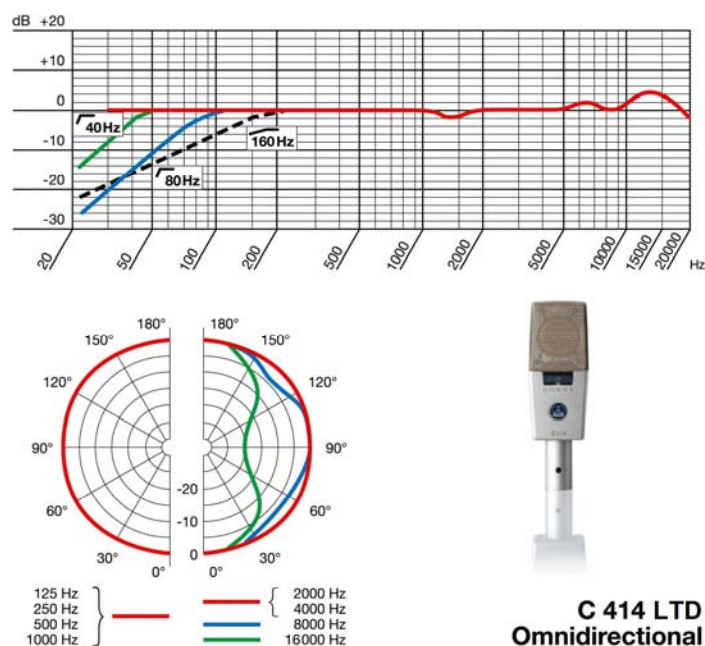


Figura 2: Patrón direccional brindado por el fabricante del micrófono. Micrófono de condensador profesional con 2 cápsulas gradientes.

Las muestras fueron tomadas impactando sobre tres lugares diferentes de cada membrana de los instrumentos elegidos. Se tomaron impactos en el centro de la membrana, en un punto correspondiente a un cuarto del diámetro y a 2 cm del perímetro. Para la obtención de una muestra apropiada y debido a que no se contó con una herramienta de impacto automatizada se tomaron tres muestras en cada posición, separadas entre sí por un lapso de tiempo tal que la emisión sonora precedente ya no fuera perceptible. El micrófono y los instrumentos fueron ubicados en el centro del recinto. La distancia entre la respectiva membrana y el micrófono se fijó en 40 cm.

Adicionalmente, se tomaron muestras de la emisión sonora de impactos sobre las membranas utilizando el método anteriormente descrito, pero con la aplicación de resistencias de uso cotidiano sobre las membranas para el análisis del efecto de estas en el espectro. Las aplicaciones utilizadas fueron una cinta adhesiva con algodón situada en la cuarta parte del diámetro de la membrana y, en el redoblante, una bordona (se tomaron muestras con combinaciones, bordona, cinta y ambas). Estas muestras se tomaron con el objetivo de agregar otras condiciones al análisis de la variación espectral en la radiación sonora de las membranas circulares según su punto de excitación a fin de extender la validez de los resultados.

Luego de registrar las emisiones sonoras se prosiguió con el análisis espectral. Se compararon las tres muestras de cada modo de impacto y se eligió la más apta para el análisis. El criterio de elección de la muestra radicó en la definición obtenida en el impacto y en su nivel sonoro respecto a las demás pruebas, los que se procuraron que sean los más similares posible. Luego se compararon las muestras elegidas entre sí distinguiendo las frecuencias principales de los parciales resaltados, sus tiempos de extinción y su desarrollo en el tiempo.

Para este proceso se utilizaron software como, el Sound Fourge 9.0, el WaveLab 5.0.0.221, el SpectraLab 4.32.0.17 y el Microsoft Office Excel 2007.

3 Resultados y Análisis

Los datos obtenidos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla comparativa de los valores obtenidos por el análisis espectral mediante *software*. Los parciales son los de mayor relevancia en el espectro según amplitud y duración, ordenados según su valor de nivel de presión sonora (*NPS*) de mayor a menor. D = tiempo de extinción.

| Instr. | Resist. | Lugar de Impacto | D Tot. (ms) | Fundamental | | Primer Parcial | | Segundo Parcial | | Tercer Parcial | | Cuarto Parcial | |
|--------|---------|------------------|-------------|-------------|--------|----------------|--------|-----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|
| | | | | F [Hz] | D [ms] | F [Hz] | D [ms] | F [Hz] | D [ms] | F [Hz] | D [ms] | F [Hz] | D [ms] |
| Redo. | ----- | Centro | 570 | 200 | 453 | 500 | 370 | 460 | 570 | 340 | 330 | ----- | ----- |
| Redo. | ----- | 1/4 diám. | 793 | 200 | 379 | 460 | 793 | 340 | 689 | 580 | 360 | 300 | 400 |
| Redo. | ----- | 2 cm per. | 950 | 200 | 416 | 450 | 950 | 570 | 775 | 330 | 900 | 300 | 420 |
| Redo. | Cinta | Centro | 385 | 200 | 385 | 480 | 287 | 580 | 350 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Redo. | Cinta | 1/4 diám. | 800 | 200 | 370 | 440 | 370 | 340 | 800 | 300 | 322 | ----- | ----- |
| Redo. | Cinta | 2 cm per. | 1.050 | 200 | 490 | 580 | 800 | 340 | 1.137 | 440 | 550 | 300 | 510 |
| Redo. | Bord. | Centro | 580 | 200 | 454 | 340 | 430 | 435 | 580 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| Redo. | Bord. | 1/4 diám. | 722 | 200 | 390 | 480 | 722 | 340 | 390 | 600 | 550 | ----- | ----- |
| Redo. | Bord. | 2 cm per. | 960 | 200 | 270 | 580 | 960 | 460 | 820 | 300 | 380 | 340 | 515 |
| Redo. | B y C | Centro | 590 | 200 | 550 | 340 | 312 | 290 | 190 | 620 | 590 | ----- | ----- |
| Redo. | B y C | 1/4 diám. | 534 | 200 | 534 | 440 | 517 | 340 | 362 | 580 | 328 | ----- | ----- |
| Redo. | B y C | 2 cm per. | 847 | 200 | 475 | 580 | 847 | 300 | 300 | 440 | 520 | ----- | ----- |
| Tom | ----- | Centro | 2.215 | 100 | 2.215 | 185 | 990 | 270 | 425 | 410 | 236 | ----- | ----- |
| Tom | ----- | 1/4 diám. | 2.700 | 100 | 2.545 | 200 | 1.950 | 120 | 2.750 | 250 | 610 | ----- | ----- |
| Tom | ----- | 2 cm per. | 3.645 | 100 | 2.505 | 190 | 1.485 | 130 | 3.645 | 250 | 955 | 310 | 454 |
| Tom | Cinta | Centro | 2.255 | 100 | 2.255 | 185 | 830 | 325 | 297 | 270 | 391 | 475 | 195 |
| Tom | Cinta | 1/4 diám. | 2.385 | 105 | 2.285 | 125 | 2.385 | 195 | 580 | 250 | 450 | 150 | 290 |
| Tom | Cinta | 2 cm per. | 3.405 | 105 | 2.253 | 200 | 864 | 128 | 3.405 | 250 | 930 | ----- | ----- |

En primer lugar, se observa para cada condición analizada en la tabla 1 que al cambiar el punto de impacto la frecuencia fundamental y la frecuencia de los parciales que contienen un mayor nivel de presión sonora (*NPS*) se mantienen dentro de cierto rango.

Comparando las figuras 3, 4 y 5, correspondientes al análisis del redoblante sin cinta y sin bordona se observa que, yendo hacia el borde con los impactos, se presenta un aumento en el tiempo de extinción y el *NPS* de los parciales más altos del espectro (teniendo en cuenta que el rango en el que aparecen parciales resaltados en todas las muestras de los instrumentos analizados va desde 90 Hz hasta 700 Hz, aproximadamente). Por otra parte, se observa una disminución progresiva del tiempo de extinción de la fundamental hacia las orillas.

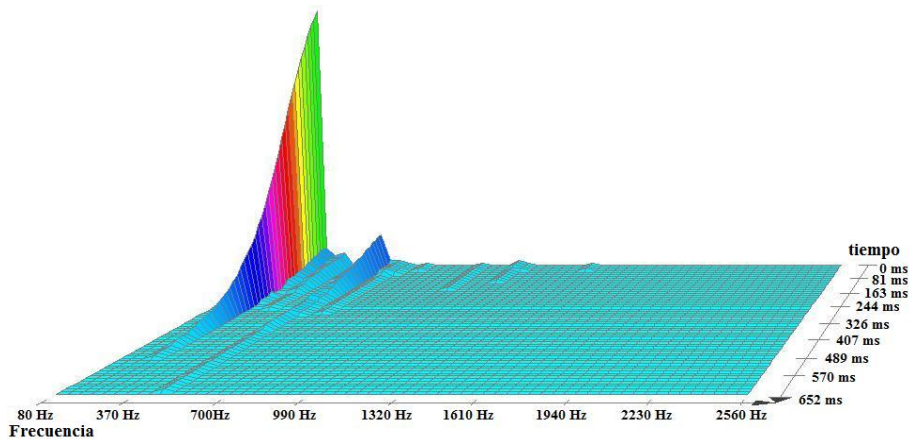


Figura 3: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto en el centro de la membrana del redoblante sin bordona y sin cinta.

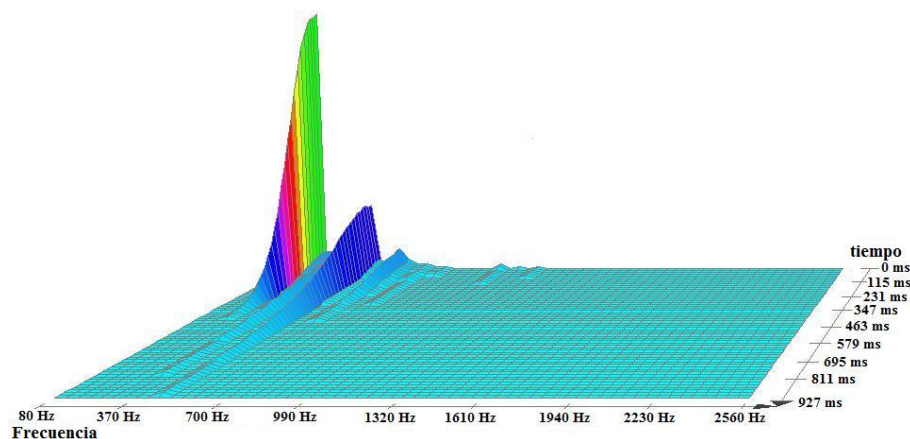


Figura 4: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto en la cuarta parte del diámetro de la membrana del redoblante sin bordona y sin cinta.

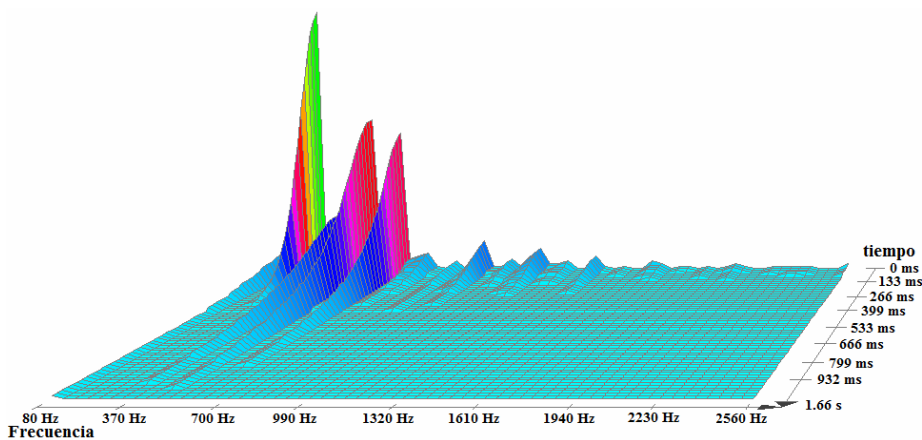


Figura 5: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto a 2 cm del perímetro de la membrana del redoblante sin bordona y sin cinta.

Con respecto a la aplicación de la cinta (figura 6), se presenta en los resultados un notorio cambio en la amplitud, pero no de la duración total de los parciales de alrededor de los 450 Hz y en algunos otros parciales superiores. Sin embargo no cambia ni el *NPS* ni la duración de la fundamental. En los impactos en el centro de la membrana se ve una falta de parciales y se presenta una fundamental más firme.

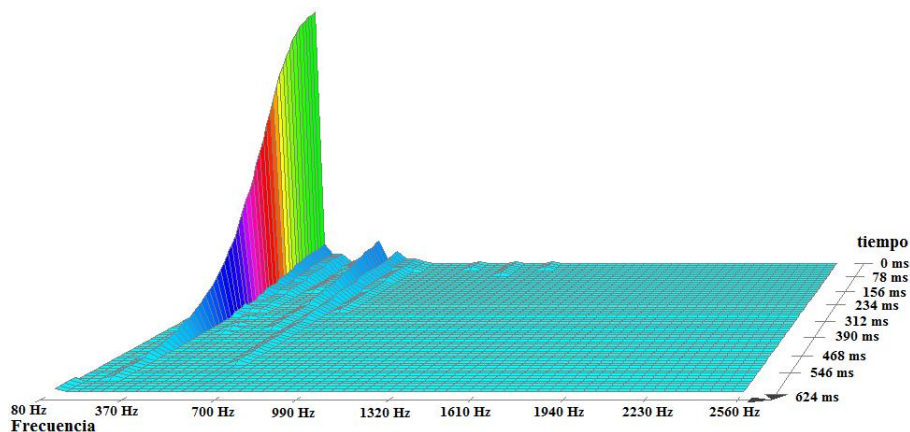


Figura 6: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto en el centro de la membrana del redoblante con cinta y sin bordona.

Comparando los impactos sobre el redoblante con y sin bordona se obtuvo un aumento en la complejidad del espectro de la emisión sonora del impacto con bordona, como se observa en la figura 7. Además se presenta un aumento en el nivel de ciertos parciales pero se ve reducido el tiempo de duración de los mismos y por consiguiente del espectro total.

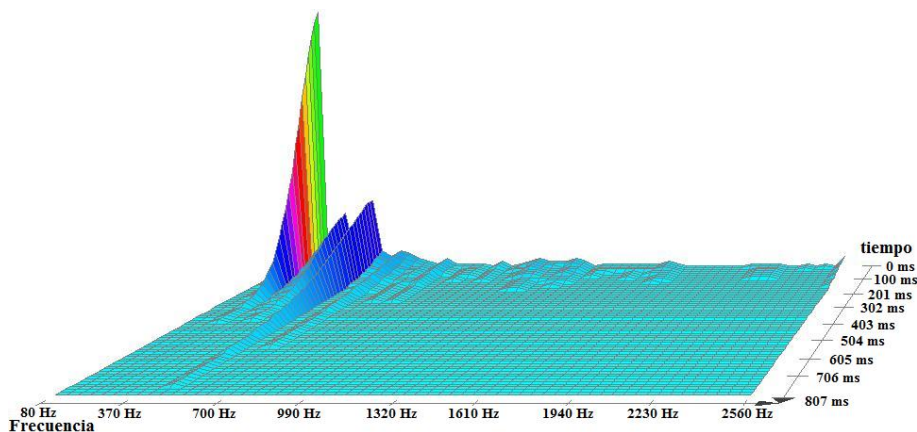


Figura 7: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto en la cuarta parte del diámetro de la membrana del redoblante con bordona y sin cinta.

Como contraste entre el redoblante con bordona y con bordona y cinta (figura 8), se obtuvieron disminuciones en tiempo de duración y *NPS* en los parciales superiores a 2cm del borde y a un cuarto del diámetro del parche; sin embargo, del impacto en el centro y de la fundamental, no se pudieron sacar conclusiones.

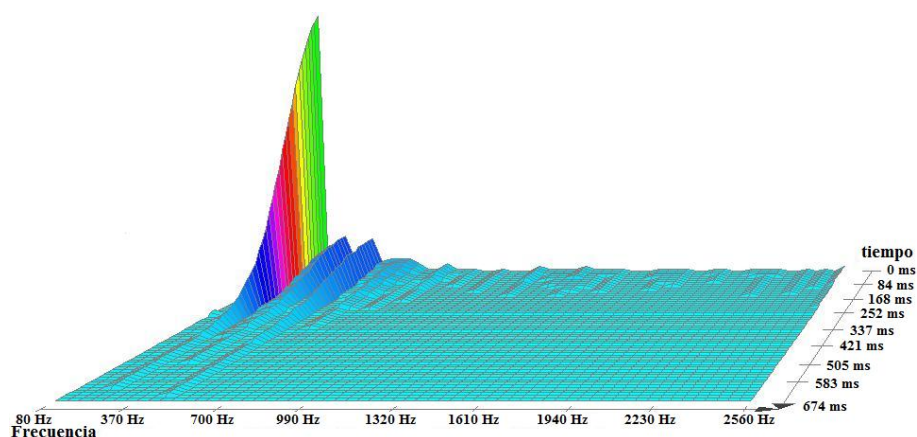


Figura 8: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto en la cuarta parte del diámetro de la membrana del redoblante con bordona y cinta.

Por otra parte, en la comparación de las grabaciones del tom, se puede apreciar un comportamiento similar en donde al acercarnos al centro del parche se reducen los parciales de la parte superior del espectro en duración y *NPS*. Al igual con respecto a la cinta; hay una notoria atenuación del espectro superior. Este análisis se ve explícito en las figuras 9 y 10.

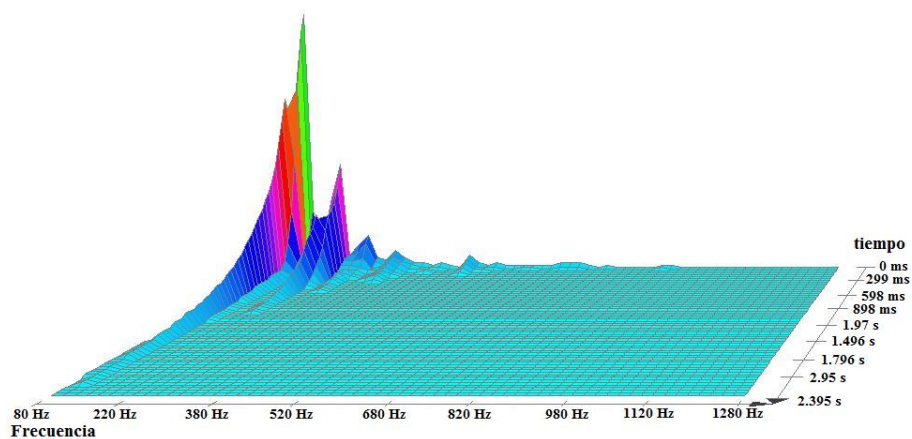


Figura 9: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto en centro de la membrana del tom.

4 Conclusiones

Al llevar el impacto hacia el perímetro de las membranas circulares, si bien se mantiene cierta relación en las frecuencias de los parciales, aumenta la complejidad en los parciales superiores y su duración. También aumenta la duración del sonido total, pero disminuye levemente el tiempo de extinción de la fundamental. Esto se debe a que al acercar los

impactos al perímetro se excita una subdivisión más compleja de la membrana, compuesta de varios de los modos de vibración ya mencionados. En cambio, más cerca del centro de la membrana se hace notar el primer modo de oscilación debido a que toda línea nodal axial, o bien llamada diametral, tiene paso por el centro de la membrana. Impactar la membrana en su centro produce que los modos que contienen estas líneas nodales no sean excitados. Por lo que en el espectro sonoro tampoco aparecerán sus respectivas frecuencias. Esto último tiene relación perceptual con un sonido más opaco debido a la débil presencia de parciales superiores.

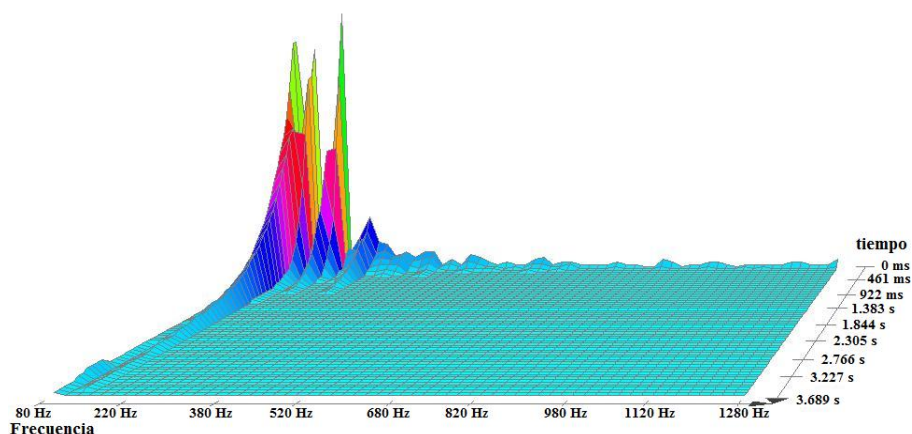


Figura 10: Desarrollo en el tiempo del espectro de la emisión sonora producida por un impacto a 2 cm del perímetro de la membrana del tom con cinta.

Cuando se incluye cinta en las membranas se reducen considerablemente los parciales superiores del espectro en todos los casos, así como la duración total de la toma. Esta atenuación se observa claramente en los impactos a 2 cm del perímetro y a un cuarto del diámetro total de la membrana, debido a la mayor presencia de parciales superiores. Sin embargo, ya que no cambia el *NPS*, el tiempo de extinción de la fundamental, ni su frecuencia, la aplicación de la cinta presenta una fundamental firme en el espectro y por consiguiente no se percibe un cambio significativo en la emisión sonora. La segunda modificación consistió en la activación de la bordona. En el caso del redoblante con bordona se observa un aumento en la complejidad espectral, realzándose los parciales. Sin embargo, al igual que con la cinta adhesiva, se ve reducido el tiempo de extinción. Las reducciones en la prolongación del tiempo de extinción se deben a que la cinta y la bordona funcionan como una resistencia a la oscilación de la membrana. La complejidad adquirida en el espectro al aplicar la bordona, se debe a la cantidad de puntos de contacto de la misma sobre la membrana, produciendo de esta forma nuevos modos de vibración.

Agradecimientos

A la Escuela Técnica ORT.

A la Universidad Nacional de Tres de Febrero.

Al Ing. Jorge Petrosino.

Al Ing. Alejandro Bidondo.

A los profesores de la UnTreF.

Referencias

Escuela Universitaria de Música, Montevideo, Uruguay:

<http://www.eumus.edu.uy/eme/cursos/acustica/apuntes/instr2/instr2.html>

Massmann, Herbert; Ferrer Rodrigo (1985). "Instrumentos musicales, Artesanía y Ciencia". Editorial Dolmen Estudio, Buenos Aires, Argentina.

Universidad de Sevilla, España: <http://euler.us.es/~plopez/vibracion-de-una-membrana-circular.htm>

Raichel R. Daniel (2000) "The Science and Applications of Acoustics". Edit. Springer, New York, USA.

Recuero López, M. (1999). "Ingeniería Acústica". Editorial Paraninfo, Madrid, España.