

# RESINTESIS DIGITAL DE SONIDO REALIZADA SOBRE LA BASE DE SEÑALES DE VIBRACIÓN MECÁNICA DE UN CUENCO TIBETANO

Guillermo Perna

Universidad Tecnológica Nacional

[guillermoluisperna@gmail.com](mailto:guillermoluisperna@gmail.com)

Pablo Paupy

Universidad Tecnológica Nacional

[pablo.paupy@gmail.com](mailto:pablo.paupy@gmail.com)

Darío Huggenberger

Universidad Tecnológica Nacional

[dhuggenberger@frd.utn.edu.ar](mailto:dhuggenberger@frd.utn.edu.ar)

## Resumen

La presente accesibilidad a los medios tanto de análisis como de producción de sonido a través de las computadoras pone al músico actual ante la posibilidad de construir un sonido eligiendo sus componentes y sus relaciones internas. El análisis espectral y la producción por síntesis de señales sonoras conforman una instancia en donde el arte y la tecnología se entrecruzan en una relación de mutua dependencia. Esta instancia se encuentra dentro del proceso creativo de una obra de arte, dentro de la estética de la música electroacústica u otras artes u otras artes que hagan uso de señales digitales como herramientas de expresión y producción de sonido. En el presente avance de investigación, como una primera aproximación al tema, se realizó la síntesis de un sonido a partir del análisis de vibración de una señal emitida por un cuenco tibetano. Para ello se ha aplicado un método combinado de análisis espectral exploratorio con un ajuste paramétrico de un modelo oscilatorio con decaimiento por medio de descenso por gradiente. A partir de los resultados del modelo se simuló el sonido por

síntesis aditiva. Se obtuvieron resultados satisfactorios y se propone el control digital de los parámetros del modelo para simular diferentes sonidos a partir de síntesis.

## **Vibraciones mecánicas, Síntesis aditiva, Análisis espectral**

### **1. INTRODUCCIÓN**

La síntesis aditiva de sonido consiste en sumar formas de ondas sonoras simples, en general sinusoidales, para generar formas de ondas sonoras complejas. En el campo digital, es una técnica de síntesis muy dúctil aunque como desventaja, frente a otros tipos de síntesis, es costosa en términos computacionales [11]. A través de ella, se puede conseguir la simulación de un sonido, del mundo físico real, que provenga de un objeto vibrante que irradie señales acústicas ([20], [2], [10], [12], [8]).

#### **ANTECEDENTES**

La resíntesis del sonido de una campana, a partir de datos previos, constituye una de las experiencias históricamente más destacadas en el ámbito de la síntesis de sonido, llevada a cabo por el físico J. C. Risset ([13], [14]) dentro de los laboratorios Bell. En general se desarrollan enfoques académicos de análisis desde una o más perspectivas, sea desde la música, la electrónica, la mecánica o la síntesis de audio ([22], [3], [5], [17], [18], [19], [1]).

En un análisis de un cuencos tibetanos Inácio [6] desarrolló un análisis modal a partir de una grilla de 120 puntos sobre tres cuencos tibetanos de mayor diámetro que el utilizado en el presente trabajo, con dos acelerómetros a una distancia angular de  $55^\circ$  en la cara interna. Detectó entre 5 y 7 frecuencias de resonancia con bajo decaimiento entre 4kHz y 6kHz.

Pudo detectar hasta siete modos radiales por medio de nodos azimutales pero ningún modo vertical diferente debido a la escasa profundidad de los cuencos. En todos los casos se detectó y modeló dinámicamente dobles de frecuencia modal en relaciones no enteras con la frecuencia fundamental pero similares entre cuencos de diferente diámetro. Otros fenómenos singulares se observaron en cuencos, como el que Terwagne [21] describe acerca del comportamiento de pequeñas gotas en la superficie libre de agua con la que se lo llena y luego se hace vibrar.

En el presente trabajo se resintetiza una señal acústica producida por medio de un cuenco tibetano desde la síntesis aditiva a partir de una serie de mediciones de aceleración en un punto de la superficie del cuenco. Estos resultados constituyen un primer avance en un intento de vincular la medición de vibraciones mecánicas, la simulación por medio de elementos finitos (en desarrollo), el análisis de la señal sonora captada por micrófonos (en proceso de análisis) y la reconstrucción modelada por síntesis aditiva de armónicos.



Fig. 1-a

Fotografía del cuenco y puja.



Fig.

1-b Vista lateral del cuenco.

## 2. METODOLOGÍA

Existen varios métodos para el estudio de los instrumentos de percusión [16]: elementos finitos. En estudios experimentales se procura detectar los modos normales de vibración por medio de acelerómetros, micrófonos, interferometría holográfica, acople de resonancia con fuentes de frecuencia conocida, descripción del campo sonoro y modelado numérico ( el cual presenta grandes dificultades debido al comportamiento no lineal de los instrumentos de percusión).

En este trabajo se presenta los resultados parciales de la metodología de análisis aplicada sobre los datos de vibración y su reconstrucción por medio de síntesis aditiva.

Los datos de vibración fueron medidos con acelerómetros (ver Datos). En una primera etapa de análisis, se identificaron las componentes armónicas presentes en la señal por medio de una transformada rápida de

Fourier, un barrido en frecuencias presentes en fragmentos temporales de la señal y un análisis espectral singular. En una segunda etapa, se modeló la suma de armónicos con decaimiento exponencial para diferentes frecuencias y fases por medio de componentes aditivas parametrizadas en términos de los resultados del análisis espectral preliminar. El ajuste final de los parámetros se hizo por medio de un descenso por gradiente.

El procedimiento de descenso por gradiente se realizó de acuerdo con las siguientes ecuaciones. Si el modelo oscilatorio es de la forma

$$X(t) = A * \exp(\lambda t) * \text{sen}(f/2\pi * t + \varphi_0)$$

donde A es la amplitud,  $\lambda$  es la constante de decaimiento exponencial, f es la frecuencia de vibración y  $\varphi_0$  es la fase inicial, la expresión

$$P_n = P_{n-1} - \partial X(t) / \partial P * V(n) * \epsilon$$

representa la ecuación genérica de ajuste iterativo de cada parámetro P (A,  $\lambda$ , f o  $\varphi_0$ ),  $\partial X(t) / \partial P$  expresa la derivada parcial de cada armónico modelado con respecto al parámetro en ajuste, V(n) la velocidad de ajuste y  $\epsilon$  es un parámetro que mide el error entre la señal modelada y la señal a modelar calculada como varianza residual de ajuste o error cuadrático medio.

Para la resíntesis ([7], [9], [11]) se utilizó el software libre C-Sound, un entorno de programación de alto nivel para la producción y procesamiento de señales sonoras. Para la realización, se tomaron las catorce frecuencias obtenidas del análisis de vibración presentado. A cada componente se le adjudicó una amplitud normalizada, proporcional a los valores de amplitud resultantes del modelo oscilatorio con decaimiento exponencial propuesto, cuyos parámetros se obtuvieron en forma empírica. Para las duraciones se tomó como modelo de trabajo los valores de tabla (Ver Tabla I) para la síntesis aditiva del sonido de una campana [15] ya que las características percusivas y la naturaleza del sonido del cuenco pueden ser comparables. El decaimiento, de acuerdo con los parámetros exponenciales empíricos, ajusta las duraciones.

Se han probado distintas duraciones y envolventes aplicadas a esas duraciones en busca de asimilar el sonido al del cuenco original. De

acuerdo con este método, el decaimiento no se ajusta por sí solo a las duraciones. Las sinusoides generadas son independientes y hay que ajustar una envolvente en forma empírica por cada una de ellas. De este modo, todas las sinusoides coinciden en el máximo de amplitud propio de cada parcial o componente (ataque), que ocurre a los 3ms en todos los casos, y luego todas decaen hasta el final de la duración de cada parcial. Por eso cada parcial tiene «diferentes» envolventes ya que luego del máximo cada una decae y dura un tiempo acorde a la duración del parcial en cuestión, si bien conserva las características generales (curva exponencial, etc.). En resumen, se ajustaron las duraciones de los parciales sobre la base de consideraciones empíricas y perceptivas.

Frecuencias (Hz)	Duración (s)
224	10
225	9
368	7,5
369	6,5
476	5
684	4,5
800	4
1096	3
1097,7	2,5
1200	1,5
1504	1
1628	0,7

Tabla

Frecuencias y duraciones propuestas por Risset para el sonido de una campana [15]

Para la resíntesis en C-Sound [4] se utilizó el GEN 10 que crea una tabla por suma de sinusoides en relación armónica, sin embargo para este caso sólo se le dio valor de amplitud al primer armónico. Se utilizaron también las unidades generadoras (UG) oscilli y transeg, para las frecuencias sinusoidales y envolventes de amplitud respectivamente.

Para la representación y suma de frecuencias sinusoidales (síntesis aditiva) fueron tomados en forma literal los valores en Hz provenientes del análisis de vibración (Ver Resultados). En relación a la amplitud de cada parcial, se realizaron pruebas diversas con curvas exponenciales para los segmentos de envolvente de amplitud para cada sinusoide, y se

determinó la apropiada en forma empírica. Cada parcial está afectado por una envolvente de amplitud de dos segmentos. En todos los casos la inicial es de 3 milisegundos, alcanzando en dicho lapso de tiempo el máximo de amplitud correspondiente para cada parcial. El segundo segmento, también para todos los casos, comienza en el pico de amplitud del parcial correspondiente, hasta la extinción del mismo. Los picos de amplitud de cada parcial mantienen la relación y proporción de los valores provistos por el análisis. Se desestimaron los valores de fases para la síntesis del sonido.

### 3. DATOS

Se utilizó un cuenco de bronce de 115mm de diámetro exterior y 110mm de diámetro interior, y 58mm de altura con una masa de 455g.

El proceso de medición se llevó adelante mediante un sistema de adquisición de datos desarrollado en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la Facultad Regional Delta.

El sistema consiste en un software que permite seleccionar hasta 8 canales de medición simultánea. En este caso particular se utilizó sólo un acelerómetro para interferir en el menor grado posible las características físicas del cuenco.

El sensor fue un acelerómetro Bruel & Kjaer 4374 de pequeñas dimensiones y masa despreciable frente a las características del cuenco a analizar.

Durante el proceso de medición se seleccionó la máxima frecuencia disponible en nuestro sistema de 20Khz a fondo de escala, lo que significa una frecuencia de muestreo de 51.282Khz.

De la misma manera se eligió un alto número de puntos (65536). lo que aporta un rango mayor a 30 segundos de medición, con lo que se consideró que las frecuencias fundamentales que se quieren medir para el presente estudio en base al test de impacto ya habrán decaído considerablemente.

Para el proceso de medición se colocó el sensor sobre la parte media del cuenco adherido mediante una grasa siliconada y apoyado el cuenco sobre una superficie rígida se percutió con un elemento sólido (la puja de madera del cuenco) para excitar las frecuencias naturales del elemento en estudio.

Se repitió el proceso varias veces para poder ajustar los niveles de ganancias necesarios en el software de adquisición de datos hasta conseguir los valores más representativos.

Los parámetros de configuración de la medición son los siguientes:

- NFFT: 4096
- Frecuencia de muestreo: 51282
- Frecuencia máxima: 20000
- Número de puntos: 524288
- Tiempo de registro: 10,223616s

## 4. RESULTADOS

En la figura 2 se presenta la serie completa de la señal registrada por el acelerómetro. Para su estudio se ha seleccionado los primeros cuatro segundos debido a que el resto de la señal se sumerge en un alto umbral de ruido. Esta señal se seleccionó con el objetivo de extremar la exigencia metodológica ya que contiene un patrón representativo típico de las vibraciones del cuenco en estudio.

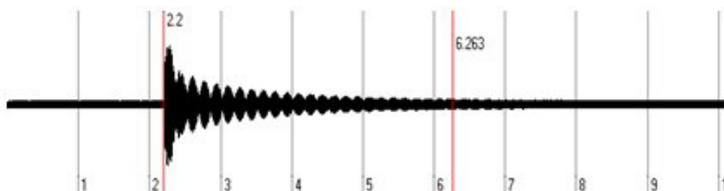


Fig. 2

Registro completo de la señal de aceleración.

En la figura 3 se muestra la selección de los primeros cuatro segundos de la señal. Puede verse la estructura compleja de los dos primeros patrones de batido con un fuerte decaimiento exponencial que no se observa en el resto de la serie.

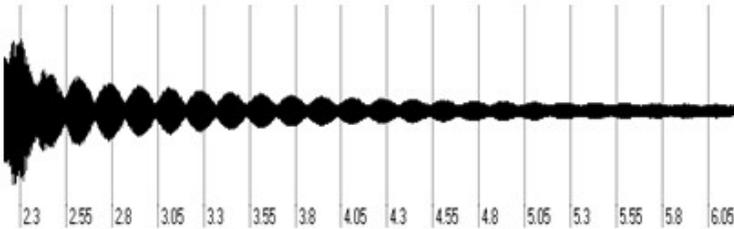


Fig. 3

Primeros cuatro segundos de la señal de aceleración.

En la figura 4 se presenta el primer segundo de la señal con seis batidos. Esto pone de relieve que la principal componente de largo decaimiento es un doblete con una diferencia de unos 6Hz.

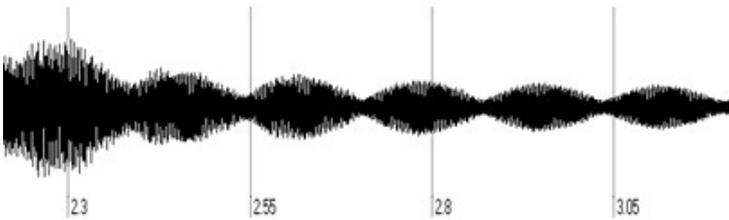


Fig.

4

Primer segundo de la señal de aceleración.

En la figura 5 se muestra el primer batido de la señal. Puede observarse el impacto, un primer proceso de decaimiento con un posible batido en altas frecuencias. El aspecto más interesante es observar que el máximo de amplitud se registra unas dos décimas de segundo después del impacto.

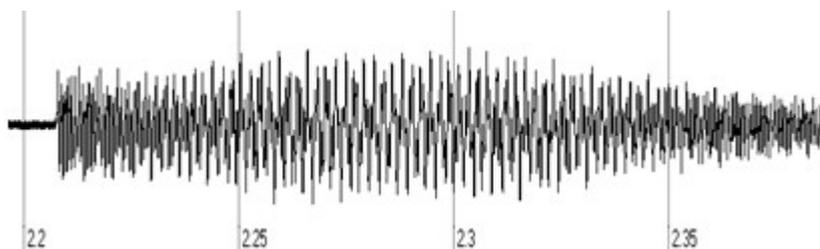


Fig. 5

Primer batido de la señal de aceleración.

En la figura 6 puede verse que durante el primer intervalo de batido, con una duración apenas menor que un sexto de segundo, predomina una frecuencia levemente superior a 1200Hz mientras que una segunda frecuencia dominante se encuentra en torno a los 450Hz. Un doblete puede verse en 2250Hz.

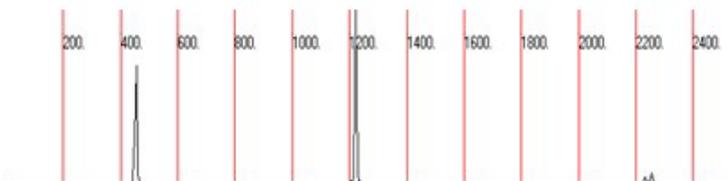


Fig. 6

Espectro del primer batido.

En la figura 7 en cambio puede verse que predomina el ciclo en torno a los 450Hz mientras que el de 1200Hz ha decaído rápidamente, pero el doblete en 2250Hz persiste.

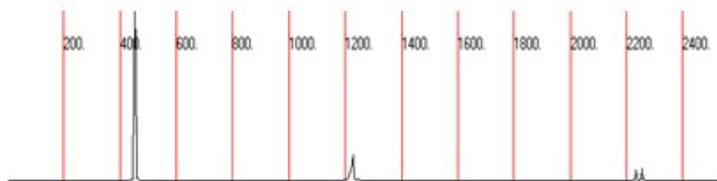


Fig. 7

Espectro del segundo batido.

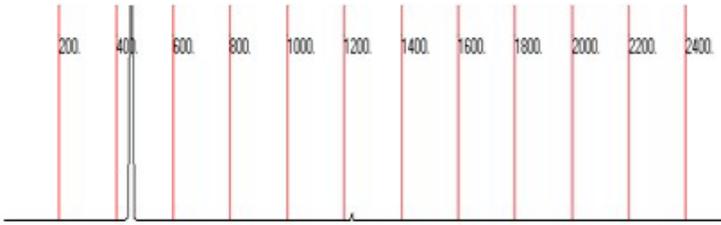


Fig. 8

Espectro del sexto batido.

En el sexto lóbulo de batido (Figura 8) sólo persiste el período de 450Hz y resulta muy débil el de 1200Hz. Puede notarse que la señal está compuesta por un ciclo en torno a los 450Hz que debería ser responsable del batido de 6Hz, por lo tanto debería contener un doblete en torno a esa frecuencia. El ciclo de 1200Hz tiene un rápido decaimiento y el doblete en 2200Hz es más persistente.

El análisis espectral sobre un segundo de la señal de vibración con mayor resolución en la baja frecuencia (figura 9) permite separar el doblete y determinar la relación de los máximos espectrales. Puede verse que la amplitud del primer máximo espectral es mayor que la del segundo.

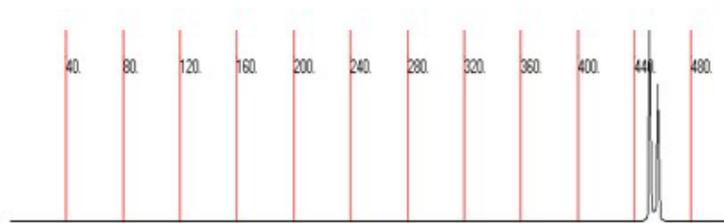


Fig. 9

Espectro del sexto batido.

Sin bien el análisis espectral de Fourier puede ofrecer los ángulos de fase de cada componente espectral, determinar la amplitud y en especial el factor de decaimiento exponencial es más difícil.

Para ello se ha propuesto un modelo configurado por dos señales senoides con decaimiento exponencial y un proceso de ajuste iterativo como el propuesto en la metodología. Se ha podido determinar que los

parámetros del modelo para el armónico mencionado son los expuestos en la Tabla 2a.

Arm	Amp	Lmb	Frec	Fase
1	15.814	0.627	450.84	-0.11
2	14.500	0.778	456.87	3.05

**Tabla 2a.**

Primero y segundo armónicos: amplitud ( $m/s^2$ ), constante de decaimiento exponencial (1/s), frecuencia (Hz) y fase (rad)

Estas frecuencias corresponden a sonidos que se encuentran a 21 y 33 centitonos sobre el La4 en el sistema de Yasser entre el La4 y el Sib4. En forma aislada debería ser percibidos los dos sonidos como diferentes, pero juntos se expresan como un batido de 6Hz con una frecuencia central de 453Hz. Se ha detectado así la posición de los armónicos con una precisión de dos decimales en la frecuencia. Una estimación conservadora, en función del proceso de convergencia, en el error de ajuste en frecuencia vale 0.02Hz, en fase 0.05rad, en amplitud  $0.05m/s^2$  y en decaimiento 0.051/s. La relación de amplitudes coincide con la relación de armónicos en el espectro. La diferencia entre frecuencias responde a 6.03Hz pero además se puede determinar que el armónico 1 tiene un decaimiento más lento que el armónico 2, lo que junto con la mayor amplitud impone una persistencia más prolongada y un desplazamiento del tono percibido a una frecuencia más baja a medida que transcurre el tiempo. El armónico 1 tiene una fase levemente negativa y el 2 de casi medio ciclo. Esto induce a pensar que el armónico 1 corresponde a la oscilación de la pared del cuenco donde se dio el golpe, probablemente la menos cóncava, con mayor amplitud, decaimiento menor y fase inicial casi nula. La otra cara, de concavidad mayor, debió responder a la flexión de la cara que fue golpeada pero desde el reposo con un máximo desplazamiento. Esta señal compuesta por las dos frecuencias en batido contiene el 71% de la varianza total durante los primeros cuatro segundos de la señal. De ellos corresponde el 44% al ciclo de 450.83Hz y el 27% al de 456.87Hz. La relación con el primer armónico da un valor de  $2.6931 \pm 0.0002$ , consistente con el valor de 2.8 correspondiente a un modelo anular proporcional a

$$j(j^2-1) / \sqrt{(j^2+1)}$$

[16], donde  $j$  es el número de componente a partir de 2, y resulta un 3.8% menor que lo esperado por el modelo.

En la figura 9 puede verse la señal reconstruida por medio del batido de los dos primeros armónicos. Se muestra los primeros dos segundos y medio a los fines de visualizar mejor la etapa inicial del proceso.

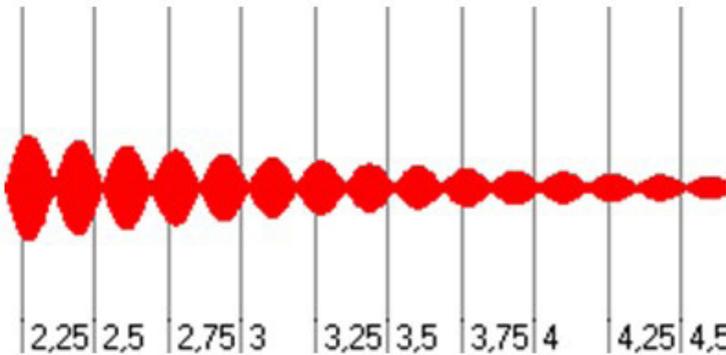


Fig. 9

Reconstrucción de la señal con las dos primeras componentes.

Arm	Amp	Lmb	Frec	Fase
3	26.72	6.14	1221.04	0.33
4	8.68	4.67	1223.33	-0.48

Tabla 2b.

Tercer y cuarto armónicos: amplitud ( $m/s^2$ ), constante de decaimiento exponencial ( $1/s$ ), frecuencia (Hz) y fase (rad)

El tercer y cuarto armónicos (Tabla 2b) contienen el 19.5% de la varianza con un rápido decaimiento de modo que en el primer lóbulo de batido estaban presentes pero se desvanecen a partir del segundo lóbulo. El componente 3 retiene el 17% de la varianza y el 4, el 2.5%. Corresponden a notas entre el Re5 y Mib5, 34 centitonos por encima del Re5 el tercer componente y el cuarto a 35 centitonos, auditivamente indistinguibles. Puede notarse que el análisis espectral no pudo distinguir el doblete de frecuencias, con un batido resultante en 2Hz. Es posible que parte de la señal que aún persiste en el ruido residual esté asociada

con este componente dado que se observa un máximo en amplitud medio segundo después del impacto (ver Figura 17). El rápido decaimiento de la señal no hubiese permitido obtener un registro más largo para la detección de las dos señales.

En la figura 10 se presentan el tercer y cuarto armónicos. Puede observarse el rápido decaimiento de la señal sin que resulte perceptible el efecto de batido. La relación con el primer armónico vale  $4.9572 \pm 0.0003$  mientras que la relación esperada para un modelo anular vale 5.42, por lo tanto un 8.5% menor que lo estimado.



Fig. 10

Reconstrucción de la señal con las componentes tercera y cuarta.

En la figura 11 se muestra la serie combinada de los primeros cuatro componentes.

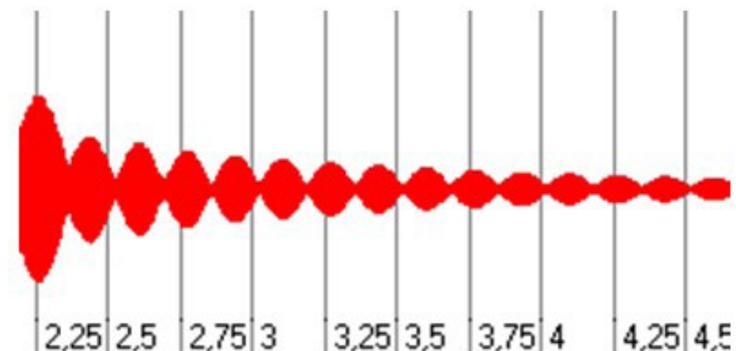


Fig. 11

Reconstrucción de la señal con las primeras cuatro componentes.

El doblete en torno a los 2200Hz presenta una diferencia de frecuencias de casi 20Hz con el 3.14% de la varianza (Tabla 2c). En la figura 12 puede verse el batido y rápido decaimiento de la señal. El quinto componente contiene el 1.42% de la señal y el sexto el 1.72%. Quizá por estar más distanciados resulta menor el acoplamiento de las señales en batido y más distinguibles en términos de varianza.

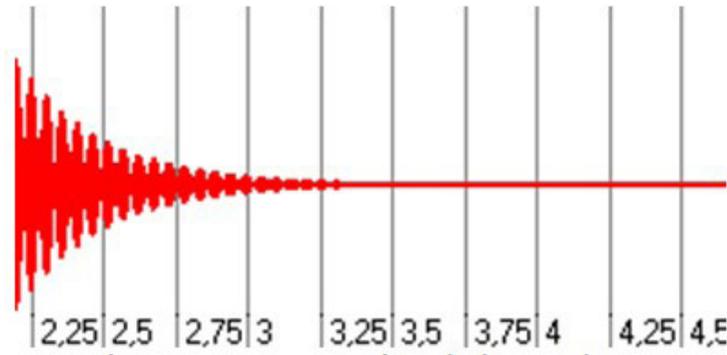


Fig. 12

Reconstrucción de la señal con componentes quinta y sexta amplificada por 5 en amplitud.

Las frecuencias corresponden a notas apenas 7 centitonos por encima del Do#6 el quinto componente y 14 centitonos la componente sexta, los que resultan dudosamente distinguibles al oído.

Arm	Amp	Lmb	Frec	Fase
5	6.865	3.503	2235.16	4.24
6	7.372	3.339	2254.03	4.29

Tabla 2c

Quinto y sexto armónicos: amplitud ( $m/s^2$ ), constante de decaimiento exponencial (1/s), frecuencia (Hz) y fase (rad)

En la figura 13 se observa la señal reconstruida por medio de los primeros seis componentes.

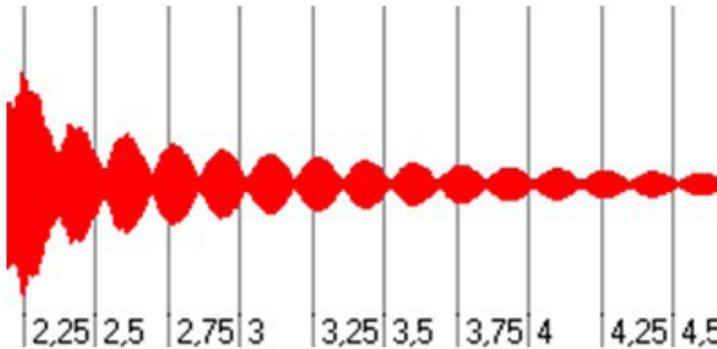


Fig. 13

Reconstrucción de la señal con las primeras seis componentes.

Un ciclo aislado en 3478.76Hz (Tabla 2d) contiene una variabilidad explicada del 0.12% y presenta un rápido decaimiento pero una amplitud inicial considerable. Corresponde a una nota musical que sólo dista 11 centitonos en defecto del La6. Debe mencionarse que, a pesar de la reducida amplitud y varianza explicada por el armónico cuarto a séptimo, se encuentran en una banda de máxima sensibilidad auditiva. La relación proporcional al primer armónico vale  $7.6828 \pm 0.0004$ , próxima a la esperada de 7.016 de la que difiere un 9.5% en exceso. En la figura 14 se muestra la señal aislada correspondiente a este armónico con una amplificación de factor 5 para que resulte visible.



Fig. 14

Reconstrucción de la señal con la séptima componente amplificada por 20 en amplitud.

En la figura 15 se observa la reconstrucción por medio de las primeras siete componentes.

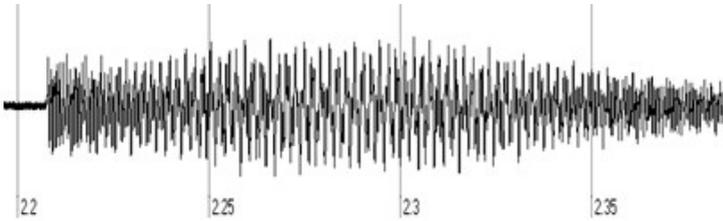


Fig. 15

Reconstrucción de la señal con las primeras siete componentes.

Arm	Amp	Lmb	Frec	Fase
7	2.296	4.834	3478.76	3.03

### Tabla 2d.

Séptimo armónico: amplitud ( $m/s^2$ ), constante de decaimiento exponencial ( $1/s$ ), frecuencia (Hz) y fase (rad)

En torno a los 6100Hz y 6200Hz se despliega un complejo conjunto de armónicos, de escasa amplitud y varianza, que apenas alcanza el 0.05% de la señal, pero de largo período de decaimiento. Si se considera una frecuencia central de 6150Hz, la proporción con el armónico principal vale 13.58 mientras que el valor esperado es 12.86, un 5.6% en exceso. La frecuencia de 6100Hz está 26 centitonos por encima de un Fa#8 mientras que la de 6200Hz apenas 10 centitonos por debajo del Sol8. El proceso de convergencia fue muy lento con este complejo de componentes de modo que se conserva la resolución en frecuencia pero en los otros parámetros se informa sólo el último decimal significativo y se asume como medida de error (Tabla 2e).

Arm	Amp	Lmb	Frec	Fase
8	0.24	0.5	6132.23	0.1
9	0.26	0.6	6134.89	3.5
10	0.20	0.1	6140.19	0.2
11	0.44	1.2	6153.85	2.9
12	0.265	0.89	6157.40	2.0
13	0.27	0.4	6162.02	1.3
14	0.39	1.1	6169.80	3.3

### Tabla 2e.

Octavo a decimocuarto armónicos: amplitud ( $m/s^2$ ), constante de decaimiento exponencial ( $1/s$ ), frecuencia (Hz) y fase (rad)

En la figura 16 se presenta el complejo de señal resultante de la superposición de los siete componentes (8 al 14) con una ampliificación en amplitud de 50.



Fig. 16

Reconstrucción de la señal con las componentes 8 a 14 amplificadas por 10 en amplitud.

El siguiente modo, en una relación del orden de 17.71, debería corresponder a una frecuencia en torno a los 8000Hz. La próxima banda se hallaría en una proporción de 23.30 con una frecuencia de unos 10500Hz. Ambas bandas están ausentes en la señal pero se observó un complejo de oscilaciones en torno a los 12000Hz mientras que la próxima señal esperada en el modelo de modo anular sería de 13400Hz. Es más convincente que las señales alrededor de 12000Hz estén vinculadas en forma armónica con las localizadas en 6000Hz y se asocien con modos de oscilación no anulares en el cuenco.

En la figura 17 (centro) se presenta la señal compuesta por los primeros catorce componentes. En la parte superior de la figura 17 se muestra la serie original y en la parte inferior la serie de residuos tras haber restado las componentes modeladas.

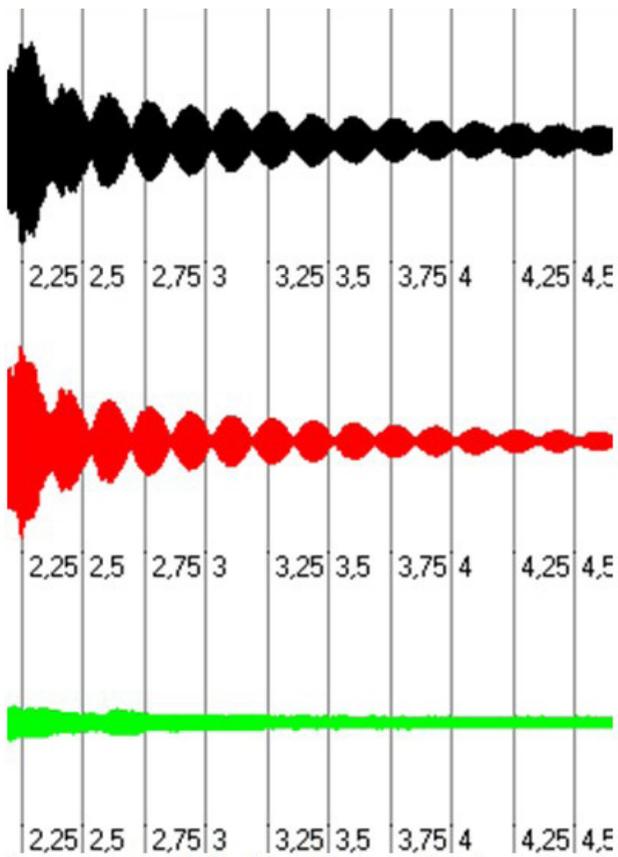


Fig. 17

Señal original (arriba), modelada con las 14 componentes (centro) y residuo de la señal tras la sustracción de las primeras catorce componentes (abajo).

Puede observarse en la serie de residuos que existen, al menos dos lóbulos aún no detectados en términos de su composición durante el primer medio segundo de la señal y que parece tener una frecuencia de batido del orden de los 3Hz.

Los modelos aditivos han explicado el 93.60% de la señal pero el 6.40% restante contiene prácticamente ruido blanco. El análisis espectral de los residuos muestra que queda del orden del 1% de la señal compuesta de 450/56Hz, el 3% de la señal en 1221/3Hz, el 0.5% en 2235Hz y el

0.6% en la de 2254Hz. Sólo el 0.03% de la señal queda en la componente de 3478Hz. En la banda de 6000Hz el problema es más complejo y sólo parece haberse detectado del orden del 50% de la variabilidad. En torno a los 12000Hz se manifiesta un complejo aún más extenso de componentes, quizá armónicos de las de 6000Hz, que no ha sido estudiado. El resto de la señal, con una varianza del orden del 5% del total, sería de ruido blanco originado mecánica o electrónicamente en el proceso de medición. Se estima que no ha podido ser modelado del orden del 1.5% de la señal genuina.

## 5. Conclusiones

Se ha modelado las componentes de vibración de un cuenco tibetano como respuesta a un impacto. La metodología propuesta de ajuste iterativo por descenso sobre el gradiente en términos de los parámetros del modelo permitió la detección de cinco modos de oscilación en catorce componentes con un alto grado de precisión en el ajuste de los parámetros del modelo. Sólo la frecuencia natural y la constante de decaimiento son propias del cuenco, pero la amplitud y la fase inicial dependen del modo de perturbación. Esto permite, en principio, superponer diferentes parciales para utilizar en una resíntesis de sonido y detectar cuáles son los que caracterizan la singularidad del sonido del cuenco a través de experimentos perceptivos.

Los resultados de la resíntesis del sonido a través de datos obtenidos de un análisis de vibración, para este caso de un cuenco tibetano, fueron satisfactorios. En esta primera etapa se pudo confirmar que en base al teorema de Fourier, al representar los datos del análisis por sonidos sinusoidales de determinada frecuencia la cualidad tímbrica del sonido del cuenco es ampliamente identificable. Esta confirmación, como primera aproximación en el avance de investigación, justifica continuar en la correlación entre análisis espectral desde el punto de vista de las vibraciones y el sonido. En etapas próximas se continuará en esta línea complementando con métodos de resíntesis a través de archivos de

audio digital que serán grabados al mismo tiempo que la medición de vibración. El control digital sobre los parámetros que determinan la amplitud y la fase permite experimentar en simulaciones, diferentes cualidades tímbricas del cuenco y, eventualmente, algunas que no podrían ser producidas sino por medio de síntesis de sonido.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Acero Martínez LV Bustos Ortiz CD Hermida Cadena LF (2009) Análisis Acústico de un Tiple Colombiano por medio de la obtención de la respuesta al impulse con método directo. Primeras jornadas regionales de Acústica AdAA 19 y 20 de noviembre de 2009, Rosario, Argentina.
- [2] Chafe C (1999) A Short History of Digital Sound Synthesis by Composers in the U.S.A. Creativity and the computer, Rencontres Musicales Pluridisciplinaires, Lyon, March 1999.
- [3] Chung SC Kong CD (1997) Dynamic and Acoustic Characteristics of Bell Type Structure Using Finite Element KSME International Journal, Vol. 11, N° 3, pp. 300-310. [4] Di LisciaP (2004) Generación y procesamiento sonido y música a través del programa C-Sound, Ed. Universidad Nacional de Quilmes.
- [5] Fischer MJ (2001) Vibration Modes of a C4 Handbell: Holographic Interferometry and Finite-Element Analysis. Proceeding of the National Conference on Undergraduate Research (NCUR) University of Kentucky, March 15-17, 2001 Lexington, Kentucky.
- [6] Inácio O Henrique LL (2003) The Dynamics of the Tibetan Singing Bowls (Enlarged version o the work presented at the 34<sup>th</sup> Spanish National Acoustic Congress and EEA Symposium (Tecnia-cústica 2003) and at the International Symposium on Musical Acoustic (ISMA2004), Japan.
- [7] Mathews M Pierce (1989) Current Directions in Computer Music, MIT Press.
- [8] Misra A Cook PR (2009) Toward Synthesized Environments: A Survey of Analysis and Syntesis Methods for Sound Designers and Composers. International Computer Music Conference.
- [9] Moore, Richard (1989), Elements of computer music, Ed.

Prentice Hall

- [10] Puckette M (2005) Some Mathematical Tools for Music-Making Art+Math Conference, Boulder, Co.
- [11] Pozzati G (2011) Sintesis Aditiva. Apuntes del Centro de Investigaciones y desarrollos computacionales en Musica «Francisco Kroepb», IUNA-DaMus, CABA.
- [12] Puckette M (2006) The theory and Technique of Electronic Music World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (Caps 9 y 10)
- [13] Risset JC (1969) Un Catalogo Introduttivo di Suoni Sintetizzati at Computer Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey.
- [14] Risset JC Mathews MV (1969) Analysis of Musical-instrument tones, Physics Today, 22(2):23-30.
- [15] Risset Jean Claude (1991) Additive Síntesis of Inharmonic Tones- Current Directions in Computer Music, M. Mathews y J. Pierce.
- [16] Rossing Th D (2000) The Science of Percussion Instruments, Singapore, World Scientific.
- [17] Rossing ThD (2001) Acoustic of Percussion Instruments: Recent Progress Acoustic Science & Technology 22,3 pp.177-188.
- [18] RossingThD (2004) Acoustic of Percussion Instruments: An Update Acoustic Science & Technology 22,3 pp.177-188.
- [19] RossingTh D Yoo J Morrison A (2004) Acoustic of Percussion Instruments: An update. Acoustic Science & Technology 25, 6 406-412.
- [20] Smith III JO (1991) Viewpoints on the History of Digital Synthesis Proceedings of the International Computer Music Conference, Montreal, pp. 1-10.
- [21] Terwagne D Bush JWM (2011) Tibetan Singing Bowls. Nonlinearity 24, R51.
- [22] Westcott W (1970) Bells and their Music (Cap 5, 1970) Putnam, New Yourk.

## Agradecimientos

Se agradece especialmente al Dr. José Ruzzante por habernos facilitado el cuenco con el que se realizaron las mediciones, al Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la FRD-UTN por habernos facilitado los instrumentos de medición y a Andrea Broggi por las fotografías del cuenco.