

# Nuevas tendencias en acústica musical

## **Gustavo Basso**

Prof. a cargo de la materia Acústica Musical de la Facultad de Bellas Artes de la UNLP

**E**n los últimos años se observa un cambio radical en la concepción de la ciencia del sonido, la acústica. Este cambio afecta a la casi totalidad de sus campos de aplicación: el estudio y diseño de instrumentos musicales, espacios de audición y salas de espectáculo; la concepción de nuevas estrategias creativas en composición musical; la comprensión de los mecanismos y procesos propios de la percepción auditiva, y una gran cantidad de procedimientos en el campo digital que están en plena etapa de desarrollo. ¿Cuál es la esencia de esta transformación? En el presente artículo intentaremos describir en qué consiste la sustitución de los viejos modelos acústicos por los actuales, resumiremos algunos de los avances más significativos en aquellas áreas relacionadas con la música, y describiremos sintéticamente la contribución efectuada desde la Facultad de Bellas Artes cuando resulte pertinente.

### **Modelos acústicos dinámicos**

El primer gran cambio que se advierte al observar el estado actual de la disciplina es la paulatina sustitución de los modelos acústicos

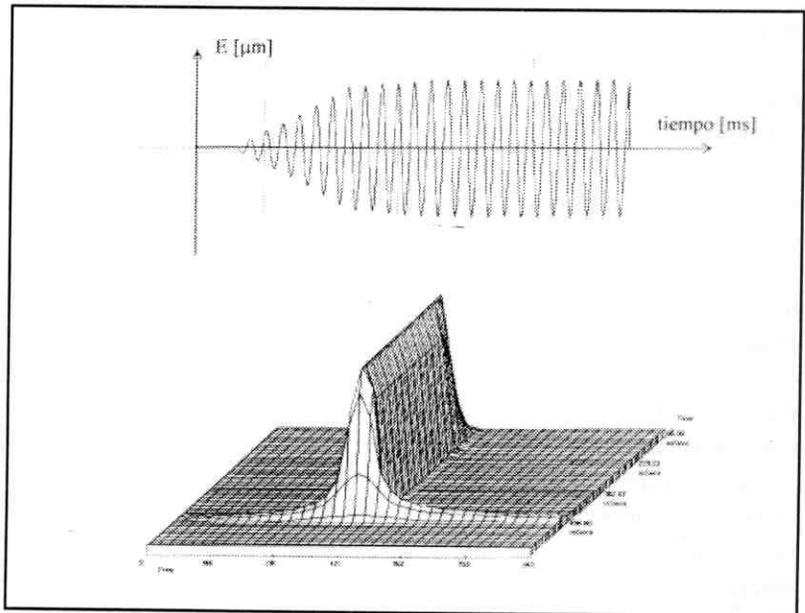
estáticos por los denominados modelos dinámicos. Los modelos estáticos, que permitieron cimentar la teoría de armónicos -de enorme importancia histórico-musical-, aparecieron en la antigüedad clásica pero fueron perfeccionados recién a principios del siglo XIX a partir de los trabajos de Jean Baptiste Fourier. Se emplearon para describir los mecanismos y dispositivos de generación de señales periódicas, similares a las características de algunos instrumentos de música; y permitieron fundamentar las dos primeras grandes etapas del estudio de la percepción auditiva -que ocurrieron en el último tercio del siglo XIX y en el período de entreguerra en el siglo XX. Estos modelos presuponen un mundo ideal en el cual no tiene cabida prácticamente ninguno de los sonidos que realmente se emplean como material musical. El empleo abusivo de péndulos, diapasones, sistemas resonantes de un solo grado de libertad y -si nos referimos a los instrumentos musicales- del órgano para ejemplificar los fenómenos acústicos se debe a esta polarización del modelo, que evita cualquier referencia a las transformaciones dinámicas propias de las señales reales. El acento está puesto en la

física de vibraciones y la percepción aparece como un agregado menor que completa pero que no determina la primera parte del estudio, la propia de la acústica física. Sin embargo, estrictamente consideradas, todas las señales acústicas son transitorias: las señales periódicas sobre las que se basan los modelos estáticos sólo existen como centro de una especulación teórica. El estado transitorio -y con él el tiempo como parámetro esencial- es directamente ignorado.

Los nuevos modelos dinámicos,<sup>1</sup> que definen un marco conceptual radicalmente distinto, también tienen su punto de partida en trabajos que publicó Fourier a principios del siglo XIX. Fourier desarrolló un método de transformación matemático que no le exigía a las funciones un comportamiento estrictamente periódico. El método, hoy conocido como Transformada de Fourier, habilita un fino análisis de casi cualquier señal acústica y permite observar sus fases no estacionarias. De él se deduce sin fricciones el Principio de Indeterminación Acústico, introducido a comienzos del siglo XX por Werner Heisenberg en el marco de la teoría cuántica.<sup>2</sup> A partir de los modelos dinámicos se pueden integrar con facilidad los procesos de cambio y variación necesarios para comprender, por ejemplo, la causa de las diferencias tímbricas entre sonidos. O el porqué de las características peculiares del perfil dinámico de una señal acústica determinada.<sup>3</sup>

Un ejemplo que ilustra las diferencias entre los modelos estáticos y los dinámicos es el siguiente: cuando se secciona bruscamente una señal estática -por ejemplo una porción de la onda generada por una flauta- aparece un "click" muy conocido por cualquier persona dedica-

da a operar con señales de audio. Este click no tiene ninguna explicación en el modelo tradicional estático, pero se comprende perfectamente cuando se lo analiza desde el dinámico: la corta transición temporal de la extinción forzada exige, al mediar el principio de indeterminación acústico, la aparición de la gran banda de frecuencia que provoca el ruido -el click- percibido. En la figura adjunta se pueden ver los gráficos temporales y tridimensionales correspondientes a este ejemplo:



**Gráfico temporal y tridimensional (TEF) de una señal acústica seccionada**

El "click" se pone claramente de manifiesto en el gráfico tridimensional en la forma de la gran banda de frecuencias que aparece en el punto de corte de la señal. Sin embargo nada hace sospechar su existencia en el diagrama temporal previo, y tampoco se lo vería en un gráfico espectral estático.

Aunque las herramientas matemáticas propias de los modelos dinámicos son relativamente compli-

cadas, en la práctica se las emplea de manera generalizada a partir del uso de las computadoras personales.<sup>4</sup> Hoy en día cualquier paquete de software de cierto nivel destinado al análisis de señales de audio las usa para generar sus gráficos espectrales. Muchos músicos y técnicos de grabación utilizan estos gráficos de manera más o menos intuitiva, pues la ausencia de una comprensión profunda de sus prin-

cipios les impide beneficiarse de todas las ventajas potenciales que presentan.

## **Estímulos físicos y representaciones perceptivas**

La segunda clave que permite entender el cambio operado en la acústica contemporánea la aporta el nuevo rumbo que ha tomado el estudio de la percepción auditiva. Las nuevas teorías cognitivas, junto a la batería de pruebas experimentales que parten de los modelos acústicos dinámicos y las modelizaciones caóticas del comportamiento neuronal, han modificado nuestras ideas sobre la naturaleza de las representaciones mentales y la relación que mantienen con los estímulos físicos externos. Hasta no hace mucho los experimentos psicoacústicos de laboratorio se enfocaban sobre un limitado número de parámetros musicales, anulando el resto en la medida de lo posible para eliminar variables y evitar ambigüedades. O utilizaban sólo estímulos extremos -en registros, sonoridades o duraciones- para tantear los límites de nuestra capacidad perceptiva.

La sustitución de las tradicionales señales sinusoidales por otras más complejas y de corta duración en la configuración de los estímulos de exploración en los experimentos psicoacústicos han cambiado muchas de las creencias mantenidas hasta hace poco. Valen como ejemplos los estudios sobre ciertos fenómenos acústico-perceptivos que están ocupando en la actualidad el centro de la escena: el efecto reunión («cocktail party»), la paradoja temporal de Vicario, la supresión de enmascaramiento por conmodulación (CMR) o las distintas formas del procesamiento de audio psico-acús-

tico (empleado por ejemplo en el algoritmo de compresión digital MP3). Con el equipo de la Facultad de Bellas Artes estamos trabajando en algunos de ellos con el fin de desarrollar modelos teóricos que permitan integrarlos a una teoría general de la percepción que, creemos, deberá partir de la teoría del comportamiento neuronal caótico.

Un ejemplo que puede ilustrar lo anterior lo encontramos en el estudio del desplazamiento acústico temporal. El fenómeno del desplazamiento temporal es de gran importancia conceptual pues desarticula el pretendido paralelismo entre tiempo físico y tiempo perceptual. Aunque las pruebas experimentales fueron iniciadas por Whilhem Wundt y continuadas luego por Edgard Rubien, es con los trabajos del psicólogo italiano Giovanni Bruno Vicario que se logra transformar un fenómeno de simultaneidad física en una sucesión psicológica. El desplazamiento temporal establece que una secuencia  $[a_1 - b - a_2]$  en el tiempo físico  $t$  puede percibirse en el tiempo fenoménico  $T$  como una sucesión distinta  $[A_1 - A_2 - B]$  si el estímulo central  $[b]$  tiene una frecuencia que difiere de forma notable (cuatro octavas) de los estímulos laterales y posee una duración muy breve (@ 80 ms). Los sonidos más agudos -separados por un intervalo de una segunda mayor- se oyen seguidos y el sonido intermedio, más grave, se ve relegado al final de la sucesión.<sup>5</sup> La falta de correspondencia no se puede atribuir a ningún proceso fisiológico, y no parece sencillo explicar de qué modo relaciones específicas no temporales -como semejanza o disimilitud- puedan interaccionar con secuencias temporales -como antes/después. Nosotros hemos intentado analizar los límites de validez del fenómeno empleando los

modelos acústicos dinámicos.<sup>6</sup> Encontramos que aunque en la bibliografía especializada se destaca la importancia de la duración del estímulo en la aparición del desplazamiento temporal, no se especifica limitación alguna en la conformación espectral de las señales de prueba. De hecho, la reproducción literal del experimento de Vicario no da el resultado esperado. El motivo hay que buscarlo en el perfil dinámico de las transiciones entre las distintas señales: si éstas son bruscas aparece un gran ancho de banda asociado que destruye la separación en frecuencia estipulada en la hipótesis original. La aparente anomalía se debe simplemente a que no puede ser quebrantado el límite impuesto por el principio de indeterminación acústico. Cuando se elimina el "puente espectral" al modificar los estados transitorios entre señales (nosotros aplicamos curvas de transición gaussianas para lograrlo) el fenómeno de desplazamiento temporal comienza a ser percibido. Las potenciales aplicaciones musicales de lo expuesto son muchas: si la intención de un compositor es la de independizar y desvincular diferentes elementos de una estructura, el desplazamiento temporal permite lograrlo hasta en la trama temporal misma (que en ese caso se desdoblará en dos tramas temporales separadas y autónomas). Si, por el contrario, el propósito del autor se dirige a la fusión de estructuras el fenómeno de desplazamiento temporal debe ser evitado. Junto a la técnica ya apuntada por Vicario y Fraisse, consistente en reducir la distancia espectral que separa a los estímulos, nosotros agregamos la que parte del ensanche espectral en las zonas de transición: determinadas articulaciones y ataques destruyen la paradoja, sincronizando el tiempo físico con

el psicológico. Aquí una cuidadosa elección de los medios instrumentales, que incluye tanto los instrumentos mismos como las demás variables involucradas -registro, matiz, articulación, etc.- resulta decisiva. Hemos detectado efectos similares a los aquí apuntados en un conjunto de obras musicales americanas y europeas del siglo XX.<sup>7</sup>

Ahora se reconoce, de manera generalizada, que las experiencias de laboratorio distan bastante por su simplicidad de lo que sucede en cualquier hecho musical concreto, en el que una multiplicidad de parámetros muchas veces contradictorios amortiguan u ocultan algunos de los fenómenos descritos en los tests. En las situaciones musicales «reales» (esto es, dentro del contexto de una «puesta en obra» y no de una situación ascética creada en laboratorio) estas manifestaciones no tienen la intensidad y la claridad que es dable hallar en los experimentos controlados.

Otros fenómenos psicoacústicos estudiados por nuestro equipo a partir de los modelos dinámicos son la supresión del enmascaramiento por conmodulación<sup>8</sup> y las distintas formas del procesamiento de audio psicoacústico. Estas últimas son la base de los algoritmos de compresión digital más poderosos -el MP3, empleado para la transmisión de archivos de audio en internet, se creó a partir de un tipo específico de procesamiento psicoacústico.

## Espacialidad

La tercera gran etapa en el estudio de la percepción auditiva comenzó a mediados de la década de 1970 y está marcada por el análisis de la percepción espacial de los campos acústicos. Los resultados de estos trabajos de investigación se

aplican en la actualidad al diseño de equipos de audio -la holofonía y los sistemas surround se basan en ellos-; al diseño de nuevos espacios acústicos tridimensionales -teatros, cines, salas multimedia, etc.-; a la creación de nuevas fuentes e instrumentos musicales; y a toda una batería de procesos de transformación en el campo del audio digital -los efectos sonoros característicos de los procesos de postproducción cinematográfica son un buen ejemplo de esto último.

El estudio teórico más profundo en el campo de la percepción acústica espacial lo realizó Yoichi Ando a mediados de la década de 1980.<sup>9</sup> Ando estableció que un campo acústico tridimensional puede determinarse a partir de cuatro parámetros objetivos independientes. Tres de estos parámetros corresponden a criterios temporales (de audición monoaural) y el restante a un criterio espacial (de percepción binaural).<sup>10</sup> Con el equipo de la Facultad de Bellas Artes hemos utilizado este modelo para analizar la relación entre un espacio acústico dado y la fuente que lo excita. Se encontró que la fuente acústica, la sala y la música misma forman un todo que debe funcionar de manera ajustada para que se alcance un resultado óptimo de acuerdo con el canon estético de valoración puesto en juego. Dos nuevos parámetros, la función de autocorrelación y la relación temporal de las fases estocásticas y estacionarias de la señal, permitieron vincular de manera coherente las tres situaciones mencionadas.<sup>11</sup> El estudio, en el que compararon piezas de música barroca para arcos con otras de música romántica, puso en evidencia que el resultado final es sensible al modelo de arco empleado -moderno de curvatura negativa (tipo Tourte) o barro-

co de curvatura positiva-, al tipo de golpe de arco seleccionado por los intérpretes, al material de las cuerdas de los instrumentos, a la longitud de la cuerda empleada -relacionada con la digitación de los pasajes-, y a la frecuencia y tipo de vibrato. Se encontró experimentalmente que ciertos valores de la función de autocorrelación de la sala deben coincidir con el de la señal de la fuente emisora. Y se comprobó que en aquellas salas en las que los músicos pueden elegir a voluntad la ubicación, lo hacen de manera de igualar estos valores. Esta búsqueda del lugar óptimo era característica en los salones no destinados especialmente a recitales tal como ocurría en los siglos XVII y XVIII. Y estos lugares óptimos, que dependen de la configuración de las superficies cercanas, se podían hallar al margen del tamaño y del Tiempo de Reverberación de la sala -los dos parámetros tradicionales de diseño acústico. Los instrumentos de cuerda actuales han aumentado la potencia acústica sobre todo en la zona de baja frecuencia (región de las fundamentales) y han reforzado la energía emitida en determinadas bandas (formantes). A cambio han perdido energía en la región de comportamiento estocástico (en especial en los ataques) que se traduce en un sonido mucho más estable y "parejo" que sus equivalentes barrocos. La principal conclusión de este estudio es que existe una clara relación entre el estilo musical, la fuente acústica empleada -que incluye tanto a los instrumentos como a las técnicas de ejecución- y la sala en la que se interpreta la música. La relación resulta óptima cuando ciertos parámetros concuerdan en los tres niveles, y esto aparentemente ocurre cuando se recrean las condiciones originales (al menos en los dos

estilos que se han comparado aquí: el barroco europeo y el sinfonismo romántico). Con las herramientas expuestas se abre la posibilidad de diseñar el espacio acústico de una sala a partir del escenario en función de las características de la música a interpretar. Y de los juicios de valor estéticos presupuestos en cada caso. La necesidad actual de contar con salas multifunción, capaces de responder adecuadamente a diferentes géneros y estilos, puede encontrar en este nuevo modelo una respuesta satisfactoria desde lo musical y factible desde lo tecnológico.

## Nuevo enfoque de la disciplina

En el futuro quizá la acústica musical pueda partir de un enfoque global del sonido que tenga origen en el hecho musical concreto y no en especulaciones teóricas elaboradas a priori sobre el mismo. En ese marco la base de la disciplina la constituirá el estudio de la percepción de las señales acústicas transitorias, y el modelo dinámico su principal herramienta matemática. Hoy se está tratando de potenciar la capacidad de análisis de este modelo a partir de ciertos desarrollos que, como la Transformada de Gabor o la Transformada Wavelet, todavía no han lle-

gado con fuerza al campo de la acústica musical. La paulatina incorporación de los principios propios de los sistemas caóticos le otorgará a la acústica, en el mediano plazo, una perspectiva más apropiada desde la cual se pueda comprender en profundidad el hecho musical.

Para lograr el desarrollo que promete la disciplina es necesario que los actores involucrados -investigadores, diseñadores, técnicos y músicos en general- reconozcan que el quehacer musical práctico emplea habitualmente conceptos y tecnologías que superan, en muchos casos, el estudio especulativo de la ciencia musical tal como se la ha encarado hasta ahora.

---

### Notas

1 Hay un desarrollo detallado de sus principios en Basso, G.: *Análisis Espectral. La Transformada de Fourier en la Música* (La Plata, Editorial de la UNLP, 1999).

2 El principio de indeterminación (o de incertidumbre) fue enunciado en el año 1927 por el físico Werner Heisenberg.

3 La importancia del estudio del perfil dinámico fue notada con claridad por Schaeffer. Pero a su trabajo pionero le faltaba un sustento sólido desde la física de las señales acústicas. Ver por ejemplo Schaeffer, Pierre: *Traité des objets musicaux* (París, Edition du Seuil, 1966).

4 Dos algoritmos matemáticos, la Transformada Discreta de Fourier (DFT) y la Transformada Rápida de Fourier (FFT), contribuyeron enormemente a reducir el costo computacional de los cálculos y se emplean habitualmente desde la década de 1970.

5 Vicario, Giovanni Bruno: *Sci. Am.*, "Time in Psychology", Octubre de 1997, 74-82.

6 Un resumen de estos trabajos se puede examinar en Basso-Liut-Guillén-Balderrabano: "El desplazamiento acústico temporal. Ajuste de la experiencia y uso musical" en *Actas de las III Jornadas de Estudios e Investigaciones del Instituto de Teoría e Historia del Arte «Julio E. Payró»* (Buenos Aires, 1998).

7 Por ejemplo en *Homenaje a García Lorca* (1936) de Silvestre Revueltas, *Atmósferas* (1961) de Gyorgy Ligeti, y *Sinfonía* (1968) y *Secuencia IV* para piano (1965) de Luciano Berio.

8 Conocido por sus siglas en inglés CMR (comodulation masquing release).

9 Ver por ejemplo los trabajos de Ando, Yoichi: *J. Acoust. Soc. Am.* «Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall,» (1983, 873-887); y Ando, Yoichi: *Concert Hall Acoustics* (Berlín, Springer Verlag, 1985).

10 Es interesante una observación del propio Y. Ando: «la percepción auditiva, esencialmente temporal, requiere un espacio tetradimensional con tres variables temporales y una espacial, mientras que la percepción visual también exige un campo tetradimensional, pero en su caso con tres variables espaciales y una temporal» (Y. Ando, *op. cit.*).

11 Se pueden consultar en algunos de nuestros trabajos, por ejemplo en Basso, G.: *Memorias de las VII Jornadas Argentinas de Acústica* «Difusión en escenarios de salas con bajo tiempo de reverberación», (Buenos Aires, 1994) y Basso, G.: *Actas de la XI Conferencia Anual de la Asociación Argentina de Musicología*, «Relación acústica entre instrumentos, técnicas de ejecución y salas para música» (Córdoba, 1997).