

recientes, sobre acústica musical (p. ej., Benade, 1976; Pierce, 1983; Sundberg, 1991), psicoacústica (p. ej., Zwicker y Fastl, 1990) y psicología musical (p. ej., Deutsch, 1981). El presente volumen no pretende duplicar, sino sintetizar y complementar la literatura existente; su propósito es brindar una presentación uniforme, integral e interdisciplinaria, a un público lo más amplio posible.

Uno de los actos más penosos al escribir un libro es decidir qué tópicos necesariamente deberán ser dejados de lado. Por más concienzuda que sea esta decisión, siempre habrá alguien que proteste por la exclusión de un tema tal o cual. Los siguientes son tópicos omitidos o tratados sólo superficialmente (sin intentar aquí justificación alguna). En la discusión de la generación de tonos en instrumentos musicales, sólo tratamos los mecanismos más básicos, sin entrar en detalles concretos de instrumentos reales. La voz humana - ¡el primero, y quizás más sublime instrumento musical! - se ha omitido por completo, así como toda discusión de tonos inarmónicos de campanas e instrumentos de percusión. En psicoacústica, nos limitamos a la discusión de la percepción de tonos, o de superposiciones de tonos *sinusoidales* (tonos simples), dejando de lado completamente los muchos experimentos realizados con trenes de pulsos y bandas de ruido.

Finalmente, prácticamente no hay referencias al rol fundamental del ritmo en la música, así como a cuestiones de desarrollo histórico de las disciplinas intervinientes.

No se puede enseñar a nadar estando parado, con tiza en mano, frente a una pizarra. Por la misma razón, no se puede enseñar acústica y psicoacústica realmente bien, sin «sumergir» al estudiante en un laboratorio adecuadamente equipado. Lamentablemente, esto requiere instrumentos electrónicos que no son de fácil disponibilidad, ni siquiera en la mayoría de los laboratorios de física universitarios. Siempre que fuera posible, he tratado de describir «experimentos» realizables con medios usuales (instrumentos como el piano, órgano, flauta); cuando hago referencia a experimentos reales, ¡sólo puedo esperar que el lector *me crea* que los efectos descriptos son los que efectivamente ocurren en la realidad!

Ya una vez, en el pasado remoto, procedí a convertir unos apuntes de clase en un librito de texto (*Mecánica Elemental*, EUDEBA, Buenos Aires, 1962). Ese volumen se sigue usando hoy día en Latinoamérica, habiendo sido reimpreso ya varias veces. Estoy curioso: el presente libro, ¿tendrá la misma aceptación?

Juan G. Roederer
Fairbanks, Alaska, febrero de 1997

1

Música, física, psicofísica y neuropsicología: un enfoque interdisciplinario

«Quien no comprende otra cosa que la química, no llega a comprender verdaderamente la química tampoco»

Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799)

1.1 Los sistemas físicos intervinientes

Imagínese sentado en una sala de conciertos escuchando a un solista tocar su instrumento. Veamos cuáles son los sistemas que hacen posible que usted oiga la música que se está tocando. En primer lugar, obviamente, tenemos al ejecutante y al *instrumento* que «hace» la música. En segundo lugar tenemos el *aire* de la sala que transmite el sonido en todas las direcciones. En tercer lugar está usted, el *oyente*. En otras palabras, tenemos la siguiente cadena de sistemas: instrumento → aire → oyente. ¿Qué cosa une a estos sistemas mientras la música se está tocando? Vibraciones de un cierto tipo y forma llamadas *sonido* que se propagan de un punto a otro en forma de *ondas* y a las cuales nuestro oído es sensible. (Hay muchos otros tipos y formas de ondas que no podemos detectar en absoluto, o que podemos detectar, pero con otros sentidos, tales como el tacto o la vista).

El físico emplea términos más generales para describir los tres sistemas arriba mencionados. Los llama *fente* → *medio* → *receptor*. Esta cadena de sistemas es común al estudio de muchos otros procesos físicos: luz, radiactividad, rayos cósmicos, etc. La *fente* *emite*; el *medio* *transmite* y el receptor *detecta*, registra o es en general afectado de alguna manera determinada. Aquello que es emitido, transmitido y detectado es energía en alguna de sus múltiples formas, que dependerá del caso particular considerado. En el caso de las ondas sonoras es energía elástica, porque implica oscilaciones de la presión, es decir, una rápida sucesión de compresiones y expansiones del aire.¹

Examinemos un poco más de cerca a los sistemas involucrados. En la

¹ El sonido, por supuesto, también se propaga a través de líquidos y sólidos.

fuerza, es decir el instrumento musical, identificamos varios componentes diferentes: 1) El *mecanismo primario de excitación* que debe ser activado por el instrumentista², tal como la acción de puntear con el dedo o frotar con el arco la cuerda de un violín, la caña oscilante en un clarinete, los labios del ejecutante en un instrumento de la familia de los metales o la columna de aire soplada contra un borde biselado en la flauta. Este mecanismo de excitación actúa como la fuente primaria de energía. 2) El *elemento vibrante* fundamental que, al ser excitado por el mecanismo primario, es capaz de sostener ciertos modos de vibración bien definidos y de frecuencias prefijadas, tales como las cuerdas de un violín, o la columna de aire en un instrumento de viento o tubo de órgano. Este elemento vibrante es el que realmente determina la altura del tono y, por añadidura, suministra los armónicos superiores necesarios para impartir cierta cualidad característica o timbre al mismo. Además, sirve como almacenamiento de energía vibratoria. En los instrumentos de viento controla en parte al mecanismo primario de excitación a través de un proceso de realimentación (fuerte en las maderas, débil en los cobres). 3) Muchos instrumentos tienen un *resonador* adicional (tabla armónica de un piano, caja de un instrumento de cuerdas), cuya función es convertir más eficientemente las oscilaciones del elemento vibrante primario (cuerda) en vibraciones sonoras del aire circundante y dar al tono su timbre final.

En el medio, también debemos hacer una distinción: tenemos el *medio propiamente dicho* que transmite el sonido, y los *contornos*, es decir, las paredes, el techo, el piso, la gente del auditorio, etc., que afectan sustancialmente la propagación sonora por medio de la *reflexión* y la *absorción* de las ondas sonoras y cuya configuración determina la calidad acústica de la sala (reverberación).

Finalmente, en el oyente distinguimos los siguientes componentes principales: 1) El *tímpano*, que recoge las oscilaciones de presión de la onda sonora que llega al oído y las convierte en vibraciones mecánicas que son transmitidas por vía de tres huesecillos a: 2) El *oído interno*, o cóclea, en la cual las vibraciones son ordenadas según rangos de frecuencia, detectadas por células receptoras y convertidas en impulsos eléctricos nerviosos. 3) El *sistema nervioso auditivo*, que transmite las señales nerviosas al cerebro, donde la información es procesada, desplegada como una imagen de rasgos auditivos sobre cierta área de la corteza (la superficie del cerebro y tejido subyacente), identificada, almacenada en la memoria, y eventualmente transferida a otros centros del cerebro. Estas últimas etapas conducen a la percepción consciente de los sonidos musicales.

²Para hacer una descripción completa deberíamos agregar los «componentes» del ejecutante: la corteza motora de su cerebro, de donde surgen las órdenes a sus músculos, las partes de su cuerpo que activan el instrumento o su tracto vocal, la interacción entre sus oídos y músculos que le ayudan a controlar la ejecución, etc. Pero, lamentablemente, limitaciones de espacio nos obligan a dejar al ejecutante completamente de lado.

Tabla 1.1 Sistemas físicos y biológicos inherentes a la música, y sus funciones correspondientes.

	Sistema	Función
Fuente	Mecanismo de excitación	Suministro de energía
	Elemento vibrante	Determinación de las características fundamentales del tono
	Resonador	Conversión a oscilaciones de la presión del aire (ondas sonoras), determinación final de las características del tono
Medio	Medio propiamente dicho	Propagación del sonido
	Límites	Reflexión, absorción, reverberación
Receptor	Tímpano	Conversión a oscilaciones mecánicas
	Oído interno	Codificación primaria de la frecuencia, conversión a impulsos neurales
	Sistema nervioso	Procesamiento, imaginación, identificación, almacenamiento, y transferencia a otros centros cerebrales

Obsérvese que podemos reemplazar al oyente por un *dispositivo de grabación* tal como una cinta magnética de grabador, un disco digital, o la grabación fotoeléctrica sobre una película, y aun así reconocer por lo menos tres de los subsistemas: la detección mecánica y posterior conversión en señales eléctricas en el micrófono, un limitado procesamiento, accidental o deliberado, en el circuito electrónico, y el almacenamiento en una memoria, sobre cinta, disco o película respectivamente. El primer sistema, es decir el instrumento, puede ser, desde luego, reemplazado por un *dispositivo de reproducción*.

Podemos resumir esta discusión en la tabla 1.1.

El principal objetivo de este libro es analizar comprensivamente lo que ocurre en cada una de las etapas mostradas en la tabla 1.1 y durante cada una de las transiciones de una etapa a la siguiente, cuando se ejecuta y percibe música.

1.2 Atributos característicos de los sonidos musicales

Individuos de todas las culturas concuerdan en reconocer la existencia de tres sensaciones primarias asociadas a un sonido musical dado: *altura*, *sonoridad* y *timbre*³. No intentaremos definir estos atributos subjetivos o

³Las sensaciones a veces citadas de «volumen» y «densidad» (o brillo) son conceptos compuestos que pueden ser «resueltos» en una combinación de efectos de altura y sonoridad (bajar la altura con incremento simultáneo de sonoridad nos lleva a una sensación de incremento de volumen; subir la altura con incremento simultáneo de sonoridad nos lleva a incremento de densidad o brillo).

magnitudes psicológicas, ni involucramos en esta etapa en la discusión respecto de si se trata de cantidades mensurables; solo nos limitaremos a observar que la altura es descripta frecuentemente como la sensación de «altitud» o «elevación», y la sonoridad como la «fuerza» o «intensidad» de un tono. El timbre, o cualidad, es aquello que nos permite distinguir tonos de instrumentos diferentes aun cuando tengan igual altura e igual sonoridad. La asociación inequívoca de estas tres cualidades a un sonido dado es lo que diferencia a un «sonido musical» de un «ruido», pues si bien podemos indudablemente asignar una sonoridad a un ruido, es mucho más difícil identificar en él una altura o cualidad tímbrica definida*.

La asignación de altura, sonoridad y timbre a un sonido musical es el resultado de operaciones de procesamiento en el oído y en el cerebro. Esta asignación es subjetiva e inaccesible a la medición física directa (véase Sec. 1.4). Sin embargo, cada una de estas sensaciones primarias puede ser asociada en principio a una cantidad física bien definida del estímulo original, es decir, de la onda sonora, que puede ser medida y expresada numéricamente por métodos físicos. En realidad, la sensación de altura está asociada primariamente con la *frecuencia fundamental* (frecuencia de repetición del patrón vibratorio, descripta por el número de oscilaciones por segundo); la sonoridad con la *intensidad* (flujo de energía o amplitud de oscilación de presión de la onda que llega al oído), y el timbre con el *espectro*, o proporción con la cual otras frecuencias más agudas, llamadas «armónicos superiores», aparecen acompañando a la frecuencia fundamental.

Esta, sin embargo, es una descripción muy simplificada. En primer lugar, la sensación de sonoridad de un tono de intensidad constante parecerá variar si cambiamos la frecuencia. En segundo término, la sonoridad de una superposición de varios sonidos, cada uno con una altura diferente (por ej. un acorde), ya no está relacionada simplemente con el total del flujo de energía sonora; por otra parte, en una sucesión de sonidos de muy corta duración (por ej. sonidos 'staccato'), la sonoridad depende de cuánto dure realmente cada sonido. En tercer lugar, la percepción refinada del timbre, tal como la que se requiere para el reconocimiento de los instrumentos musicales, es un proceso que utiliza mucha más información que la dada por el espectro de un sonido; las características transientes del ataque y de la caída de un tono son igualmente importantes, cómo puede verificarse fácilmente intentando reconocer instrumentos musicales al escuchar una cinta magnética reproducida al revés. Lo que es más, los sonidos de un instrumento dado pueden tener características espectrales que cambian apreciablemente a lo largo de la extensión del

* En lo que sigue reservamos el término «tono» para designar un sonido musical de altura, sonoridad y timbre definidos. «Sonoridad» es el término que corresponde a la palabra inglesa «loudness».

instrumento, y la composición espectral de un sonido determinado puede cambiar considerablemente de un punto a otro en una sala de concierto; sin embargo, los sonidos correspondientes serán reconocidos sin titubeo como pertenecientes al mismo instrumento. Inversamente, un músico experto puede tener grandes dificultades al intentar determinar la altura exacta de un tono puro generado electrónicamente, desprovisto de armónicos superiores y escuchado mediante auriculares, porque su sistema nervioso central carecerá de algunas claves adicionales de información que normalmente vienen con los sonidos «reales» con los cuales está familiarizado.

Otra característica física relevante de un sonido es la dirección espacial en la que llega la onda sonora. Lo que importa aquí es la minúscula diferencia temporal entre las señales acústicas detectadas en cada oído, la cual depende de la dirección de incidencia de la onda. Esta diferencia temporal es medida y codificada por el sistema nervioso para producir la sensación de *direccionalidad sonora* (estereofonía o lateralización).

Cuando dos o más tonos suenan simultáneamente, nuestro cerebro, dentro de ciertos límites, es capaz de diferenciarlos individualmente. Aquí aparecen sensaciones subjetivas nuevas, menos definidas pero de importancia musical, que se relacionan con la superposición de dos o más sonidos y conducen al concepto de *armonía*. Entre éstas se hallan las sensaciones «estáticas» de *consonancia* y *disonancia* que describen el carácter -sea «placentero» o «irritante»- de ciertas superposiciones de sonidos, la sensación dinámica de *urgencia a resolver* un intervalo disonante dado o acorde, el peculiar efecto de los *batidos* y el diferente carácter de los acordes *mayores* y *menores*. Mientras que la correlación de altura, sonoridad y, en alguna medida, timbre con ciertas características físicas de tonos aislados es «universal»- es decir, independiente del condicionamiento cultural de un individuo dado -, no es éste el caso con los atributos subjetivos arriba mencionados de las superposiciones de tonos.

1.3 El elemento temporal en música

Un tono que no variase, sonando prolongadamente con la misma frecuencia, intensidad y espectro, resultaría molesto. Aun más, después de un rato nuestra conciencia no lo registraría más. Solo cuando ese sonido desapareciera nos daríamos cuenta repentinamente de que había estado sonando. La música está hecha de tonos cuyas características físicas cambian de alguna manera a medida que transcurre el tiempo. Es solo esta dependencia temporal lo que hace que un sonido sea «musical» en el verdadero sentido del término.

En general, de aquí en adelante llamaremos a una secuencia de sonidos individuales un *mensaje musical*.

Ese mensaje musical puede ser «significativo» (a veces se habla de una «Gestalt» sonora) si le asignamos cierto «valor» como resultado de una serie de operaciones cerebrales de análisis, almacenamiento en la memoria, comparación con mensajes previamente almacenados y asociaciones. Una *melodía* es el ejemplo más simple de mensaje musical. Algunos atributos de mensajes musicales significativos son elementos clave en la música occidental: *tonalidad* (predominio de un tono sobre los otros en una secuencia), *sentido de retorno* a la tónica, *modulación* y *ritmo*. Una característica fundamental que se presenta en melodías de las más diversas culturas es que los tonos que la forman proceden en saltos discretos, finitos, de altura. Del infinito número de frecuencias disponibles, el sistema nervioso prefiere seleccionar valores discretos que correspondan a las notas de una escala musical, aun cuando somos capaces de distinguir cambios de frecuencia mucho más pequeños que aquellos representados por el intervalo mínimo de cualquier escala musical. El mecanismo nervioso que analiza un mensaje musical presta atención sólo a las *transiciones* de altura. El procesamiento «absoluto» de la altura (oído absoluto) se pierde a edad temprana en la mayoría de los individuos.

Examinemos más de cerca el elemento temporal en música. Existen tres rangos temporales diferentes en los cuales ocurren variaciones de importancia para la psicoacústica. En primer lugar, tenemos una escala temporal «microscópica», en la que ocurren las vibraciones mismas de las ondas sonoras, que abarca un rango de períodos que van desde 0,00007 a 0,05 s. Luego tenemos una escala «intermedia» centrada alrededor de un décimo de segundo, en la cual tienen lugar cambios transientes tales como los representados por el ataque o la caída de un tono, que representan las variaciones de tiempo de los rasgos microscópicos. Finalmente, tenemos una escala de tiempo «macroscópica», que va desde 0,1 s, aproximadamente, hacia arriba, donde ocurren las duraciones de los tonos musicales, las sucesiones y el ritmo. Es importante observar que a cada una de estas tres escalas de tiempo corresponde un particular «centro de procesamiento» con una función específica en el sistema auditivo. 1) Las vibraciones microscópicas son detectadas y codificadas en el *oído interno* y conducen principalmente a las sensaciones primarias del sonido (altura, sonoridad y timbre). 2) Las variaciones intermedias o transientes parecen afectar principalmente mecanismos de procesamiento situados en el *trayecto neural* que va desde el oído hasta el área auditiva del cerebro y proveen claves adicionales utilizadas en la discriminación, identificación y percepción de la cualidad de los sonidos. 3) Los cambios temporales macroscópicos son procesados al nivel más alto del sistema nervioso - la *corteza cerebral*, la superficie con pliegos y el tejido subyacente -; ellos determinan el real mensaje musical y sus atributos. Cuanto más avanzamos a través de estas etapas de procesamiento en la vía neural auditiva, tanto

más difícil se hace definir e identificar los atributos psicológicos a los cuales estos procesos conducen, y tanto más el resultado aparece influenciado por el aprendizaje y el condicionamiento cultural, así como también por el estado psíquico momentáneo del individuo.

Por más de cien años los musicólogos se han quejado amargamente porque la física de la música y la psicoacústica habían estado restringidas principalmente al estudio de tonos o conjuntos de tonos constantes, invariables, mientras que la esencia de la música es una secuencia temporal de todo ello. Sus quejas están bien fundadas, pero las razones para tal restricción también lo están. Como explicamos más arriba, el procesamiento de secuencias sonoras ocurre al más alto nivel del sistema nervioso central - abarcando una cadena de mecanismos todavía poco explorada. En este libro intentaremos en lo posible remediar esta situación e ir tan lejos como podamos para disipar algo de estas bien justificadas críticas.

1.4 Física y psicofísica

Podemos describir el objetivo principal de la física de la siguiente manera: proveer métodos por medio de los cuales se pueda predecir cuantitativamente la evolución de un sistema físico dado (o «develar» su historia), basándonos en las condiciones en que el sistema se encuentra en un momento dado⁴. Por ejemplo, dado un automóvil de cierta masa y especificando las fuerzas de los frenos, la física nos permite predecir cuánto tiempo le llevará al auto detenerse y en qué lugar lo hará, siempre y cuando especifiquemos la posición y la velocidad en el instante inicial. Dada la masa, así como el largo y la tensión de una cuerda de violín, la física predice las posibles frecuencias con las cuales la cuerda vibraría si fuera pulsada o frotada con un arco de una manera determinada. Dadas la forma y las dimensiones de un tubo de órgano y la composición y temperatura del gas en su interior, la física predice la frecuencia fundamental del sonido emitido cuando se sopla el tubo.

En la práctica, «predecir» significa suministrar un aparato matemático, una serie de ecuaciones o «recetas» que, basadas en ciertas *leyes físicas* que gobiernan el sistema bajo análisis, establecen relaciones matemáticas entre los valores de las magnitudes físicas que caracterizan al sistema en cualquier instante de tiempo (posición y velocidad en el caso del auto; frecuencia y amplitud de oscilación en los otros dos ejemplos). Estas relaciones son usadas para determinar cómo cambian los valores a medida que transcurre el tiempo.

⁴El objetivo de la física es a veces citado como «El logro de una explicación cuantitativa del universo». Esto, sin embargo, es a lo sumo una jerga filosófica que poco tiene que ver con el real (mucho más preciso, realista y modesto) objetivo de la física.

Con el fin de establecer las leyes físicas que rigen un sistema dado, debemos primero observar el sistema y hacer mediciones cuantitativas de las magnitudes físicas relevantes para descubrir experimentalmente sus interrelaciones causales. Una ley física expresa una cierta relación que es común a muchos sistemas físicos diferentes y que es independiente de circunstancias particulares. Por ejemplo, la ley que rige la gravitación es válida aquí en la Tierra, en la Luna, en el sistema solar y en cualquier otra parte del universo. Las leyes del movimiento de Newton se aplican a todos los cuerpos, sin importar su composición química, color, temperatura, velocidad o posición.

La mayor parte de los sistemas reales que estudia la física, - incluso los ejemplos «simples» y «familiares» dados anteriormente - son tan complejos que se hace imposible la formulación de predicciones exactas y detalladas. Por lo tanto debemos hacer aproximaciones e idear *modelos* que representen al sistema dado en sus rasgos principales. ¡El ubicuo «punto material» al cual frecuentemente un cuerpo es reducido en física - sea éste un planeta, un automóvil o un electrón - es el modelo más simplificado de todos! Muchas veces es necesario descomponer el sistema bajo estudio en una serie de subsistemas más elementales, que interactúan físicamente entre sí, cada uno gobernado por un conjunto de leyes físicas bien definidas.

La física de la vida diaria o *física clásica* presupone que tanto las mediciones como las predicciones deberían ser siempre «exactas» y «únicas»; las limitaciones y errores que pudieran surgir serían debidos únicamente a la imperfección de nuestros instrumentos de medición. En el dominio atómico y subatómico, esta suposición ya no rige. La naturaleza se comporta de modo tal que las mediciones y las predicciones de un sistema atómico *nunca* podrán ser exactas y únicas en el sentido ordinario. Por más que intentemos mejorar nuestras técnicas, las mediciones tendrán siempre una precisión limitada y sólo podrán predecirse *probabilidades* para los valores de las magnitudes físicas en el dominio atómico. En otras palabras, es imposible predecir, digamos, *cuándo* un núcleo radiactivo dado se desintegrará, o exactamente *dónde* se encontrará un electrón dado en un instante dado en su trayectoria desde el cátodo hasta la pantalla de TV - sólo pueden especificarse probabilidades. Una física enteramente nueva tuvo que ser formulada a principios de 1920, apta para describir los sistemas atómicos y subatómicos: la llamada *física cuántica*.

El lector se preguntará a esta altura por qué estamos hablando de física cuántica, cuando ésta parece ser totalmente irrelevante para el estudio del sonido y la música. Sin embargo, la *psicofísica* opera en algunos aspectos de manera sorprendentemente similar a la física cuántica. En términos generales, la psicofísica, como la física en general, trata de formular predicciones sobre el comportamiento de un sistema específico sujeto a determinadas condiciones iniciales. El sistema bajo consideración es el

sistema sensorial (órgano receptor y partes del sistema nervioso relacionadas) de un individuo (o animal); las condiciones están determinadas por los *estímulos físicos que inciden*, en tanto que la respuesta está expresada por las *sensaciones psicológicas* evocadas en el cerebro y reportadas por el sujeto (o manifestadas en la conducta específica del animal). La *psicoacústica*, una rama de la psicofísica, es el estudio que liga estímulos acústicos con sensaciones auditivas. Como la física, la psicofísica requiere que las relaciones causales entre los estímulos físicos entrantes y la respuesta psicológica (o de conducta) sean establecidas a través de la experimentación y la medición. Como la física, la psicofísica debe hacer suposiciones simplificadas e idear *modelos* para poder establecer relaciones cuantitativas y aventurarse en el campo de la predicción. En los primeros tiempos de la psicofísica, las relaciones empíricas entre el estímulo físico y las sensaciones evocadas fueron condensadas en leyes psicofísicas, tratando al «hardware» interviniente como una «caja negra» (equivalente al punto material en física!). Hoy, los modelos psicofísicos toman en cuenta las funciones fisiológicas del órgano sensorial y las partes pertinentes del sistema nervioso.

A diferencia de la física clásica, pero similarmente a lo que ocurre en la física cuántica, no puede esperarse que las predicciones de la psicofísica sean exactas o únicas; solo pueden anticiparse valores que indican probabilidades. A diferencia de la física, pero análogamente a lo que sucede en la física cuántica, la mayor parte de las mediciones de la psicofísica perturbarán sustancialmente al sistema bajo observación (es decir al sujeto que reporta las sensaciones producidas por un determinado estímulo físico) y nada puede hacerse para eliminar completamente la perturbación mencionada. Como consecuencia de esto, el resultado de una medición psicofísica no refleja el estado del «sistema per se», sino más bien el estado más complejo del «sistema bajo observación». También como consecuencia, la psicofísica requiere que se realicen experimentos con muchos sistemas diferentes equivalentes - pero nunca idénticos - (sujetos), y una *interpretación estadística* de los resultados⁵.

Obviamente, hay ciertos límites para estas analogías. En física, el proceso o la «receta» de medición que define una magnitud física determinada, tal como la longitud, la masa o la velocidad de un objeto, puede ser formulada de una manera rigurosa, inequívoca. En la medida en que estemos tratando respuestas fisiológicas, como ser frecuencia de impulsos nerviosos, amplitud de la «piel de gallina» o incremento de la frecuencia cardíaca, las mediciones también pueden ser formuladas de manera rigurosa, inequívoca. Pero en psicoacústica, ¿cómo definir y medir las sensaciones *subjetivas* de altura, de sonoridad, o - para hacerlo aún más

⁵ Debemos enfatizar que éstas son solo analogías. La física cuántica como *tal* no asume un rol explícito en el sistema nervioso, cuya operación involucra procesos eminentemente clásicos.

difícil - la magnitud que representa la urgencia por resolver una melodía en la tónica? ¿Cómo podríamos efectuar mediciones en el terreno de la «audición interna», es decir la acción de provocar imágenes musicales por medio de la voluntad, sin la participación de estímulos externos? ¿Podría esto ser hecho simplemente por interrogación, o deberíamos recurrir a mediciones directas mediante la implantación de electrodos en las células cerebrales?

Muchas sensaciones pueden ser *clasificadas* en diferentes tipos, más o menos bien definidos (cuando son causadas por el mismo órgano, se habla de cualidades sensoriales). El hecho de que se hable de altura, sonoridad, timbre, consonancia, sin mayores desacuerdos sobre el significado de cada uno de estos conceptos, es un ejemplo. Profundizando más, encontramos que dos sensaciones que pertenecen al mismo tipo, al ser experimentadas una a continuación de la otra, en general, pueden ser *ordenadas* por el sujeto que las experimenta de acuerdo a si un atributo dado es percibido como «más grande» (o «más alto», «más fuerte», «más brillante», «más pronunciado», etc.), «igual» o «menor» en una que en la otra. Por ejemplo, cuando a un sujeto se le presentan dos tonos en forma sucesiva, éste puede emitir juicio sobre si la altura del segundo de ellos fue más alta, igual o más baja que la del primero. Otro ejemplo de ordenamiento es el siguiente: se hace escuchar una sucesión de tres tonos compuestos, de igual altura e igual sonoridad; un oyente puede ordenarlos por pares eligiendo los dos sonidos que tengan mayor similitud tímbrica, y aquellos dos que tengan mayor disimilitud. Una de las tareas fundamentales de la psicofísica es la determinación, para cada tipo de sensación, del valor mínimo detectable (valor del umbral) de la magnitud física responsable del estímulo, y del cambio mínimo detectable («diferencia apenas perceptible» o DAP)*.

La habilidad, poseída por todos, de clasificar y ordenar sensaciones subjetivas, les da a éstas un status similar al de las magnitudes físicas y justifica la introducción de la expresión *magnitud psicofísica*. Lo que *no* debemos esperar a priori es que una persona sin entrenamiento previo pueda decir que una sensación es el «doble», «la mitad» o cualquier otro factor *numérico* de una sensación «patrón», adoptada como unidad de medida. Hay situaciones, *sí*, *sin embargo*, en las cuales es posible *aprender* a hacer estimaciones cuantitativas de magnitudes psicofísicas estadísticamente y, en algunos casos, el cerebro llega a ser muy diestro en esto. El sentido de la vista es un ejemplo. Con suficiente experiencia, la estimación del tamaño de un objeto puede llegar a ser muy precisa, siempre y cuando se disponga de suficiente información acerca del objeto dado. Juicios tales como «el doble de largo» o «la mitad de alto» se hacen sin dudar. Esto muestra claramente que la «unidad» y los correspondientes

procesos de comparación han sido incorporados en el cerebro sólo *a través de la experiencia y el aprendizaje*, con múltiples contactos con las magnitudes físicas correspondientes. Lo mismo puede lograrse con otras sensaciones psicofísicas como la sonoridad: es necesario adquirir, a través de la experiencia, la habilidad de comparar y emitir juicios *cuantitativos*. El hecho de que músicos de todo el mundo usen la misma notación para la sonoridad es de por sí un ejemplo que sirve de evidencia.

Aquí es donde surgen tal vez las más importantes diferencias entre física y psicofísica: 1) La realización repetida de mediciones del mismo tipo puede *condicionar la respuesta* del sistema bajo observación: el cerebro tiene la habilidad de aprender, cambiando gradualmente las probabilidades de respuesta a un estímulo dado a medida que crece el número de veces que se hace el mismo experimento sobre el mismo sujeto. 2) La *motivación* del sujeto y las consecuencias mentales o físicas derivadas de ésta pueden interferir de una manera altamente imprevisible en las mediciones. Como resultado del primer punto, un estudio estadístico psicofísico realizado con un solo individuo expuesto a repetidas «mediciones» no conducirá de ningún modo a los mismos resultados que un estudio estadístico basado en un solo tipo de medición efectuada en muchos individuos. Esta diferencia no solo se debe a las diferencias subjetivas entre los individuos, sino también al condicionamiento que va apareciendo en el caso de repetir varias veces el mismo experimento. Los complejíssimos procesos del sistema nervioso determinan que las mediciones psicoacústicas sean particularmente difíciles tanto de realizar como de interpretar.

1.5 Psicofísica y neuropsicología

La psicofísica puede considerarse parte de una disciplina más amplia y abarcadora. La psicoacústica, por ejemplo, solo encara la cuestión de «por qué oímos lo que oímos» cuando estamos expuestos a un determinado estímulo acústico, pero no trata la cuestión de *qué es* lo que estamos oyendo! En otras palabras, deja de lado los procesos de más alto nivel que llevan a la cognición, la conducta y la respuesta emocional. La *neuropsicología* es la disciplina que estudia los *procesos* y las *funciones* del sistema nervioso que ligan la recepción de estímulos provenientes del mundo exterior y del organismo con las respuestas en el plano mental y en el de la conducta⁶. En otras palabras, la neuropsicología trata de dar un fundamento biológico, cuantitativo, sistemático de la experiencia mental y de la conducta. Como la física, la neuropsicología también trabaja con

* También «umbral diferencial» (N. del T.).

⁶ Obsérvese que esto es muy diferente a la *psicología tradicional*, la cual es básicamente una ciencia descriptiva que se ocupa de la conducta per se, y de conceptos más intangibles como ser sentimientos, motivación, valores morales, conciencia y alma, y de los aspectos clínicos relacionados.

modelos. Estos son principalmente modelos de interrelaciones funcionales; por supuesto que las partes neuroanatómicas y los procesos fisiológicos intervinientes deben ser tomados en cuenta de manera realista. Es importante señalar que la definición de límites precisos entre psicofísica, psicología de la sensación, neuropsicología y psicología es una tarea difícil; ¡incluso la palabra «neuropsicología» aún no figura en muchos diccionarios!

El sistema principal estudiado por la neuropsicología es el *cerebro*⁷. Las más importantes funciones corticales de más alto nivel en el cerebro de un animal son, en breve, *la representación y la predicción de sucesos en el medio ambiente y la planificación de respuestas en el plano de la conducta*, con el objetivo último de acrecentar las posibilidades de supervivencia y perpetuación de la especie. Para lograr esto, el cerebro debe, a largo plazo, obtener la información sensorial necesaria para hacerse un «plano» de los alrededores y descubrir relaciones de causa y efecto que rijan la sucesión de acontecimientos en el tiempo. A corto plazo, tiene que hacer una evaluación del estado momentáneo del organismo y del entorno, identificar los rasgos o cambios más relevantes, hacer predicciones de corto plazo basándose en la experiencia (información adquirida por aprendizaje) y el instinto (información genética), así como planificar y ejecutar respuestas que sean supuestamente beneficiosas para el organismo. Todas estas tareas están guiadas y motivadas por una parte del cerebro, antigua filogenéticamente, llamada *sistema límbico*, el cual origina señales que componen el *estado afectivo* del organismo (placer, miedo, ira, expectativa, ansiedad, alivio, etc.).

El cerebro humano puede trabajar con su propio 'output' y planificar respuestas de conducta que sean independientes del estado momentáneo del entorno y del cuerpo, con objetivos que estén desconectados de los requerimientos momentáneos de supervivencia. Por otra parte puede evocar información a voluntad sin que haya existido una estimulación externa o somática, analizarla y realmacenar en la memoria versiones modificadas de la misma para su uso ulterior. Llamamos a esto «*el proceso del pensar humano*». Además, y a causa de esta habilidad de «control interno», el cerebro humano puede desobedecer deliberadamente los dictados del sistema límbico - ¡una dieta es un buen ejemplo! - y dedicarse a tareas de procesamiento de información para las cuales no fue originalmente creado ¡buenos ejemplos de esto son las matemáticas abstractas y el arte!

Todas las funciones cerebrales relacionadas con la percepción y la cognición están basadas en impulsos eléctricos generados, transmitidos y transferidos por neuronas. Hay más de diez mil millones de estas células

⁷ En general, y salvo algunas excepciones, no trataremos la anatomía del cerebro y la neurofisiología; existen muchos libros disponibles en la bibliografía médica (por ej. Brodal, 1969; Sommerhoff, 1974).

en el cerebro; una neurona puede estar conectada a otras cientos o incluso miles de neuronas, y cada operación cerebral, por simple que sea, incluirá millones de aquéllas. Es en la arquitectura y en las interconexiones sinápticas de este conglomerado de células nerviosas donde radica el misterio de la conciencia, la memoria, el pensamiento y los sentimientos. Cada operación cerebral, tal como el reconocimiento de un objeto que vemos, el imaginar un sonido musical o el placer que sentimos en un momento dado, está definida por una *distribución específica espacio-temporal de la actividad neuronal*. La «representación» del entorno, a la cual hicimos alusión más arriba, o la de cualquier imagen mental, no es otra cosa que la evocación de una distribución específica de impulsos nerviosos en determinadas áreas de la corteza; si bien esta distribución es increíblemente compleja, contiene rasgos o patrones que son absolutamente propios de aquello que está siendo representado o imaginado.⁸

El cerebro es el sistema interactivo más complejo del universo tal como se lo conoce hoy en día. Es por lo tanto bien comprensible que cualquier científico - ni qué hablar de los que no tienen esa formación - se enfrente con tremendos problemas al querer comprender en forma rigurosa por qué el funcionamiento de nuestro propio cerebro se nos presenta como algo tan «simple», y como «un Yo unitario» del cual tenemos absoluto control. (Estas características se llaman «la simplicidad natural de la función mental» y «la naturaleza unitaria de la experiencia consciente», respectivamente). Es bien comprensible también que se nos haga difícil aceptar el hecho de que, para alcanzar los objetivos científicos de la neuropsicología, no haya necesidad alguna de invocar por separado conceptos físicamente indefinibles, como «mente» y «alma».

1.6 ¿Qué es la música?

La discusión previa puede haber irritado a algunos lectores. Ellos dirán que la música es «estética pura», una manifestación de la sublime e innata comprensión humana de la belleza, más que el mero efecto de ondas sonoras actuando como estímulos sobre una compleja red de miles de millones de células nerviosas. Sin embargo, como se desprende de lo examinado precedentemente, *incluso los sentimientos estéticos están relacionados con procesamiento neural de información*. La mezcla tan

⁸ Usaremos el término «patrón» para designar la palabra inglesa «pattern», tan importante en biología y en neuropsicología. Reservamos el término «rasgo» para designar «feature», un componente aislado de un «pattern».

⁹ ¡Obsérvese bien que estos rasgos, aunque absolutamente específicos, no guardan ningún parecido «pictórico» con aquello que representan!

característica de patrones regulares, ordenados, alternados con sorpresa e incertidumbre, común a todo 'input' de información sensorial juzgada como estética, puede ser una manifestación del curioso pero fundamental deseo del hombre por ejercitar la inmensa red neuronal con operaciones de procesamiento no esenciales biológicamente, de complejidad variable. En realidad, la creatividad es la más humana de las actividades intelectuales. Mientras podría decirse que inteligencia y capacidad de comunicación son diferentes en el hombre que en los animales solo en una cuestión de grado, la creatividad y la apreciación artística son patrimonio exclusivo de los seres humanos.⁹

¿Entendemos realmente qué es la música? Cuando hablamos, estamos transmitiendo mensajes concretos. El pensamiento transmitido puede ser abstracto, pero el contenido sonoro suministra información. Cuando escuchamos los sonidos que nos rodean - gritos de animales, truenos, corrientes de agua - lo hacemos en respuesta a una tendencia innata a emplear todos nuestros sentidos para tomar conciencia de lo que nos rodea (véase sección previa). El escuchar otorga una ventaja en la carrera por la supervivencia: la interpretación de la información acústica ofrecida por el lenguaje y el medio ambiente es de una importancia biológica fundamental para nosotros. Pero ¿qué información transmite la música? En la mayoría de las culturas la música consiste en sucesiones rítmicas, estructuradas y organizadas de tonos elegidos de un repertorio muy limitado y discreto de alturas de alguna escala. No hay un equivalente directo con los sonidos del medio ambiente¹⁰, y su imitación no ha sido una fuerza impulsora en el desarrollo de culturas musicales. Pero si la música no transmite información que sea biológicamente relevante, ¿por qué nos impresiona? Bellos pasajes musicales pueden ponernos la «piel de gallina», pasajes crudos nos pueden llevar a sentir ira, y bebés que lloran se calman al escuchar los simples sonidos de una canción entonada por su madre ¿Por qué ocurre todo esto? ¿Por qué hay música?

La música bien puede ser un subproducto natural de la evolución del lenguaje humano. En esta evolución, que indudablemente fue un factor esencial para el desarrollo de la raza humana, se fue formando una red nerviosa capaz de realizar las ultracomplejas operaciones de procesamiento, análisis, almacenamiento y recuperación de información sonora necesarias para el reconocimiento fonético, la identificación de la voz y la comprensión del lenguaje. El lenguaje proveyó al ser humano un mecanismo que incrementó la capacidad de su memoria (y la de las operaciones asociadas de almacenamiento, recuperación y comunicación)

⁹ Obviamente, ¡no nos adherimos a la creencia de que plantas, vacas y gallinas, al ser expuestas a tal o cual tipo de música, aumentan su producción a causa de su apreciación artística!

¹⁰ El canto de un pájaro es música para nosotros, ¡pero para los pájaros es información concreta, como ser «este territorio es reclamado» o «este macho está buscando una hembra»!

en miles de millones de veces, al permitir la reducción de las complejísimas escenas ambientales a breves representaciones simbólicas. En el curso de esta evolución, tuvo lugar una notable división de tareas entre los dos hemisferios cerebrales (Sec. 5.7). El hemisferio izquierdo (en alrededor del noventa y siete por ciento de las personas) ejecuta principalmente operaciones temporales de corto plazo tales como las que se requieren para la inteligibilidad verbal y otras *operaciones de secuenciación* de corto plazo, tal como el pensar. El hemisferio derecho coopera ejecutando operaciones de *integración espacial* y representación temporal de largo plazo. Ejemplos de estas operaciones *holísticas* son la imaginación pictórica y la *percepción musical*. En realidad, como veremos a lo largo de este libro, la percepción musical implica tanto el análisis de patrones espaciales de excitación a lo largo del órgano auditivo receptor, causados por sonidos musicales aislados o por superposiciones sonoras, como el análisis de patrones temporales de más largo plazo de las líneas melódicas. ¿Por qué respondemos emocionalmente a mensajes musicales complejos que no parecen contener ninguna información esencial para la supervivencia? El hecho de que la mayoría de nosotros lo hagamos - con frecuencia sin poseer ninguna preparación especial - indica que *el cerebro humano está instintivamente motivado a entretenerse con operaciones de procesamiento sonoro aun cuando dicha actividad no sea requerida por las circunstancias ambientales del momento*. Esta motivación bien puede ser el resultado de una tendencia innata a entrenarse desde muy corta edad en las altamente sofisticadas operaciones de análisis auditivo necesarias para la percepción del habla, de manera similar al juego del animal, que obedece a una tendencia congénita a mejorar la destreza de los movimientos que le serán indispensables para la caza y la defensa. Bebés que hubieran nacido sin esta propensión a escuchar atentamente, o nacidos de madres no inclinadas a vocalizar simples sonidos musicales, habrían tenido una decisiva desventaja en la carrera por la supervivencia en su entorno humano.

Dado que la percepción musical está basada en última instancia en el procesamiento de información acústica, la «causa» final de las sensaciones producidas por un mensaje musical dado podría estar relacionada con la mayor o menor dificultad de identificar el mensaje musical, el grado de éxito en las operaciones de predicción que realiza el cerebro para facilitar este proceso de identificación y el tipo de las asociaciones evocadas por comparación con información almacenada en previas experiencias. Si esto es así, sería obvio que tanto los mecanismos nerviosos innatos (operaciones de procesamiento primario) como el condicionamiento cultural (mensajes almacenados y operaciones de procesamiento aprendidas) deberán controlar nuestra respuesta conductiva y estética a la música.