

Capítulo 2

Psicoacústica

2.1. Introducción

Brevemente, la **Psicoacústica** se dedica a estudiar la percepción del sonido, es decir, cómo el oído y el cerebro procesan la información que nos llega en forma de sonido.

2.2. Sensaciones psicoacústicas

Cuando escuchamos un sonido, percibimos sensaciones que pueden ser clasificadas en tres tipos: la **altura**, la **sonoridad** y el **timbre**. La **altura** es la sensación que nos permite distinguir los sonidos graves de los agudos, y, más específicamente, diferenciar los sonidos de una escala musical. La **sonoridad**, en cambio, es la sensación por la cual distinguimos un sonido fuerte de uno débil. El **timbre** agrupa una serie de cualidades por las cuales es posible distinguir los sonidos de los diversos instrumentos y voces.

En una primera aproximación, cada parámetro físico del sonido se corresponde de manera más o menos directa con un tipo de sensación psicoacústica específica. Así, la **frecuencia** está relacionada con la sensación de **altura**, la **amplitud** con la **sonoridad**, y el **espectro** (incluyendo las posibles envolventes) con el **timbre**. Veremos, sin embargo, que la cuestión no es tan sencilla, existiendo en general una importante dependencia entre cada sensación y *todos* los parámetros del sonido.

2.3. Altura

La relación entre frecuencia y altura es bastante directa, correspondiendo las bajas frecuencias a sonidos graves y las altas frecuencias a sonidos agudos (**Figura 2.1**). En realidad, la altura como parámetro psicofísico varía un poco, además, con la intensidad del sonido, es decir que un sonido débil y otro fuerte de la misma frecuencia parecen tener alturas ligeramente distintas. También varía un poco con el timbre. Un timbre muy brillante parece ser más agudo que uno más opaco, aún cuando la frecuencia y la intensidad sean iguales.

La relación matemática entre la altura y la frecuencia es la siguiente. Si se conoce la frecuencia de una nota de la escala, por ejemplo f_{LA} , la frecuencia de la nota ubicada

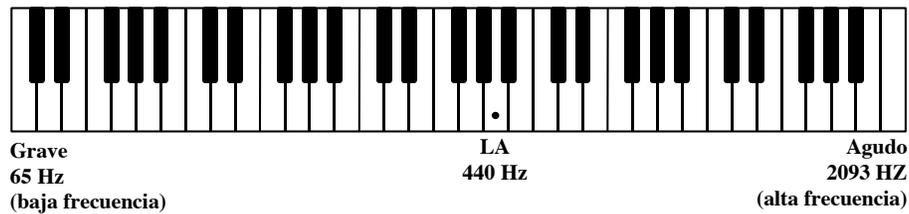


Figura 2.1. Relación entre la frecuencia y la altura en un teclado de 5 octavas. Se ha marcado el **LA** central, cuya frecuencia se encuentra normalizada internacionalmente a **440 Hz**.

un **semitono** más arriba (es decir, en un teclado, la tecla blanca o negra inmediatamente a la derecha), en este caso f_{Sib} , puede obtenerse multiplicando por $\sqrt[12]{2}$:

$$f_{Sib} = \sqrt[12]{2} \cdot f_{LA} ,$$

es decir

$$f_{Sib} \cong 1,05946 \cdot f_{LA} .$$

Así, si $f_{LA} = 440 \text{ Hz}$, resulta $f_{Sib} \cong 466,16 \text{ Hz}$. Aplicando esta fórmula sucesivamente se puede determinar la frecuencia de todas las notas superiores al **LA**. Para las notas inferiores, se *divide* por $\sqrt[12]{2}$ en lugar de multiplicar por dicho valor.

En la **Tabla 2.1** se dan las frecuencias correspondientes a la octava central (la que contiene el **LA 440**), obtenidas por este procedimiento. Para determinar las frecuencias de las notas de otras octavas, podría continuarse con el procedimiento anterior o bien

Tabla 2.1. Frecuencias correspondientes a las notas de la octava central.

NOTA	FRECUENCIA (Hz)
DO	261,63
DO#	277,18
RE	293,66
RE#	311,13
MI	329,63
FA	349,23
FA#	369,99
SOL	392,00
SOL#	415,30
LA	440,00
LA#	466,16
SI	493,88
DO'	523,25

utilizar otra relación matemática que indica que para obtener la frecuencia de una nota una octava más alta, simplemente se *multiplica por 2*. Por ejemplo el LA ubicado una octava por encima del LA central tiene una frecuencia de $2 \times 440 \text{ Hz}$, es decir **880 Hz**. Análogamente, para determinar la frecuencia de una nota una octava más baja, se *divide por 2*.

2.4. Sonoridad

La sensación de **sonoridad**, es decir de fuerza, **volumen o intensidad** de un sonido, está, en principio, relacionada con su **amplitud**. Sin embargo la relación no es tan directa como la que existe entre la frecuencia y la altura. De hecho, la sonoridad resulta en realidad fuertemente dependiente no sólo de la amplitud sino también de la *frecuencia*. Así, a igualdad de frecuencias podemos afirmar que un sonido de mayor amplitud es más sonoro. En la **Figura 2.2** se muestra el ejemplo de dos sonidos de **200 Hz**, de los cuales el de mayor amplitud es más sonoro. Pero si aumentamos la frecuencia del sonido de *menor amplitud*, éste puede llegar a percibirse como *más sonoro*. En el ejemplo de la **Figura 2.3**, el sonido de menor amplitud se lleva a **600 Hz**, percibiéndose ahora con mayor sonoridad.

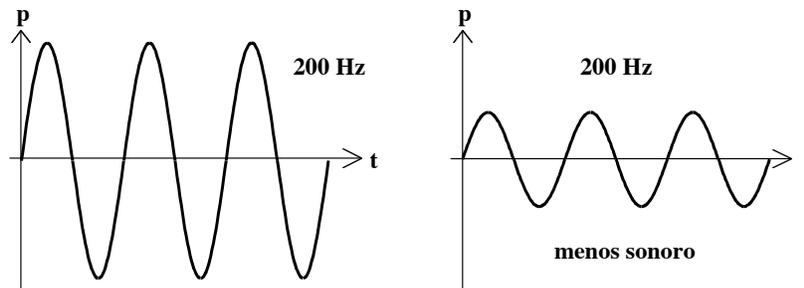


Figura 2.2. Dos senoides de frecuencia **200 Hz**. La de mayor amplitud se percibe como más sonora.

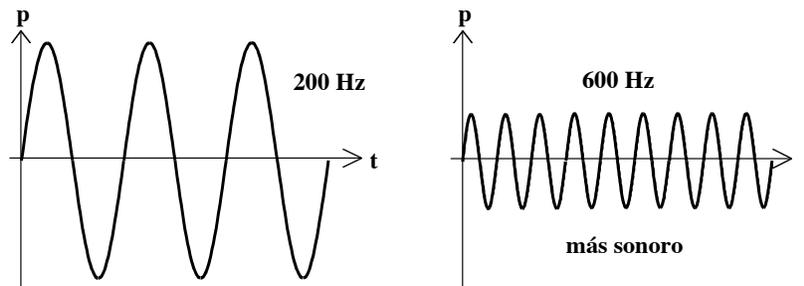


Figura 2.3. Dos senoides de frecuencia **200 Hz** y **600 Hz** respectivamente. La de mayor amplitud se percibe como *menos* sonora.

Los resultados anteriores obedecen al hecho de que el oído es más sensible en las frecuencias centrales, es decir entre **500 Hz** y **5 kHz**, que en las muy bajas o muy altas. Se han realizado investigaciones para demostrar este hecho, la primera de las cuales data de **1933**, y fue llevada a cabo por los investigadores norteamericanos Fletcher y Munson. El experimento consistía en lo siguiente. Se hacía escuchar a personas de buena audición un tono puro (es decir senoidal) de **1 kHz** y de un nivel de presión sonora conocido, por ejemplo **40 dB**. Luego se les presentaba un tono de otra frecuencia (por ejemplo **200 Hz**) y se les pedía que ajustaran el volumen hasta que les pareciera *igualmente sonoro* que el tono de **1 kHz**. Por último se medía el nivel de presión sonora. Repitiendo este experimento con diversas frecuencias y niveles de presión sonora se obtuvieron las **curvas de igual nivel de sonoridad**, o **curvas de Fletcher y Munson**, que se adjuntan en la **Figura 2.4**. Estas curvas permitieron definir el **nivel de sonoridad, NS**, de un tono como *el nivel de presión sonora de un tono de 1 kHz igualmente*

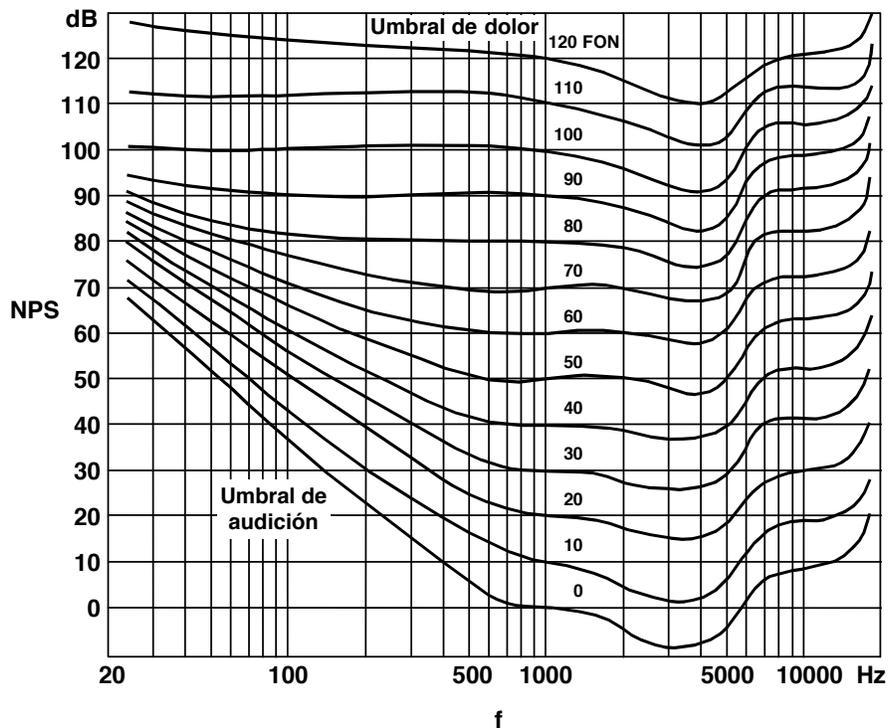


Figura 2.4. Curvas de Fletcher y Munson. Un tono de **200 Hz** y **40 dB** de NPS provocará la misma sensación de sonoridad que uno de **1000 Hz** y **20 dB** de NPS. Se dice entonces que tiene un **nivel de sonoridad** de **20 fon**. Obsérvese que a igual NPS los sonidos muy graves (baja frecuencia) y los muy agudos (alta frecuencia) tienen menor nivel de sonoridad que los sonidos medios. Además, en la zona de los **3000 Hz** se tiene la mayor sensibilidad del oído. La curva de **0 fon** es el **umbral de audición**, y la de **120 fon**, el **umbral de dolor**.

sonoro que dicho tono. Para diferenciar el nivel sonoro del nivel de presión sonora, se lo expresa en **fon**. En la **Figura 2.4** se muestra el ejemplo de un tono de **200 Hz** y **40 dB**, el cual se escucha igualmente sonoro que uno de **1000 Hz** y **20 dB**, de donde el primero tiene **NS = 20 fon**. Las curvas extremas son los límites de la audición humana. La correspondiente a **0 fon** es el **umbral de audición**, por debajo del cual una vibración del aire no es perceptible. Conviene aclarar que el umbral de audición depende realmente de la persona y del estado de su oído. La curva de **0 fon** es el umbral para personas de buena audición. Una pérdida de **10 a 20 dB** respecto a este umbral se considera normal. Por encima de los **25 dB** de pérdida, comienzan las dificultades para la comprensión oral. La curva de **120 fon** corresponde al **umbral de dolor**. De allí para arriba, en lugar de sonido como tal comienza a percibirse un *dolor intenso*, además de empezar de inmediato el *daño irreversible* del oído interno.

Las curvas de Fletcher y Munson permiten explicar diversos fenómenos y hechos que se observan en audiotécnica, por ejemplo por qué se requiere mayor potencia de un equipo de sonido para tener buenos graves que para lograr una adecuada respuesta en frecuencias medias. Son también la razón de los filtros de **sonoridad** de los equipos de sonido, que aumentan la proporción de graves cuando se escucha a bajo volumen. También explican por qué un equipo de baja potencia y mala calidad puede así y todo sonar “fuerte”: al distorsionar el sonido, agrega armónicos de alta frecuencia que se escuchan más que las bajas frecuencias originales.

Una vez conocida esta característica de la audición, se pretendió construir un instrumento de medición capaz de indicar no la variable física asociada (por ejemplo el nivel de presión sonora), sino precisamente el nivel sonoro. Si bien ninguno de los intentos resolvió el problema por completo, se logró una solución aceptable agregando a un decibelímetro un filtro que tuviera una respuesta similar a la del oído. Para ello, antes de realizar la medición simplemente se atenúan los graves, que es justamente lo que hace el oído. El resultado fue una nueva escala de decibeles: los **decibeles A (dBA)**, que se popularizó a tal punto que la mayoría de las mediciones de sonido o ruido hoy en día se expresan en **dBA**. Las excepciones son los casos en que se requiere valores objetivos con carácter experimental. El instrumento utilizado para medir **dBA** es el **medidor de nivel sonoro** (no debe confundirse *nivel sonoro* con *nivel de sonoridad*, ya que el primero es el resultado de aplicar el filtro antedicho, mientras que el segundo es el parámetro psicoacústico definido por las curvas de Fletcher y Munson). En la **Tabla 2.2** se resumen algunos niveles sonoros de fuentes y ambientes típicos, que puede ser de utilidad para estimar un nivel sonoro cuando no se dispone de un medidor de nivel sonoro.

2.5. Timbre

El **timbre** de un sonido es una cualidad compleja, que depende de varias características físicas. El estudio de los diversos aspectos del timbre fue muy motivado por el deseo de reproducir artificialmente los sonidos de los instrumentos naturales, así como de crear timbres completamente nuevos, dando origen a diversas técnicas de **síntesis de sonidos**. Si bien hoy en día los **sintetizadores electrónicos** son los de mayor difusión y expansión, la síntesis de sonidos cuenta con varios siglos de historia. En efecto, el **órgano de tubos** puede atestiguar los esfuerzos del ingenio humano en este sentido.

Hay dos enfoques para el análisis del timbre. El primero estudia los sonidos aislados, y se propone identificar todos los elementos que los distinguen de otros sonidos. El

Tabla 2.2. Nivel sonoro para varias fuentes y ambientes típicos.

FUENTE	NS (dBA)
Umbral de dolor	120
Discoteca a todo volumen	110
Martillo neumático a 2 m	105
Ambiente industrial ruidoso	90
Piano a 1 m con fuerza media	80
Automóvil silencioso a 2 m	70
Conversación normal	60
Ruido urbano de noche	50
Habitación interior (día)	40
Habitación interior (noche)	30
Estudio de grabación	20
Cámara sonoamortiguada	10
Umbral de audición a 1 kHz	0

segundo enfoque, clasifica los sonidos según la fuente (por ejemplo un instrumento), y asocia una cualidad tímbrica con cada fuente.

El primer enfoque distingue un sonido grave de un clarinete, por ejemplo, de otro sonido agudo del mismo instrumento. De hecho, quien no conoce el clarinete, al escuchar separadamente ambos registros (grave y agudo) puede pensar que se trata de instrumentos diferentes. Aquí intervienen dos elementos: el **espectro** y las **envolventes**. Hay una **envolvente primaria**, que es la que determina la forma en que varía en el tiempo la amplitud general, y una serie de **envolventes secundarias**, que corresponden a las variaciones temporales relativas de los armónicos o de los parciales (según que el espectro sea armónico o inarmónico respectivamente). La envolvente primaria está fuertemente relacionada con la forma en que se produce el sonido, y caracteriza a familias completas de instrumentos. Las envolventes secundarias dependen de la manera en que se amortiguan las diferentes frecuencias del espectro.

En los sintetizadores electrónicos de sonidos se ha procurado desde el principio proveer recursos para controlar estas envolventes. Al principio se trabajaba con una envolvente primaria de 4 tramos, denominada **ADSR** (siglas de Attack-Decay-Sustain-Release, es decir Ataque-Caída-Sostén-Relevo), que se muestra en la **Figura 2.5**. Los sintetizadores actuales permiten, según su complejidad (lo cual en general está en proporción al costo), definir las envolventes con mayor precisión, es decir con mayor cantidad de tramos. Las envolventes secundarias se han implementado con una multitud de técnicas, por ejemplo la utilización de filtros variables con el tiempo, la modulación de frecuencia, y la síntesis aditiva.

Las envolventes mencionadas varían con la altura del sonido, es decir con su frecuencia, y también pueden variar con la intensidad, es decir con la amplitud del sonido. En el primer caso, resulta natural que en los sonidos de mayor frecuencia los tiempos se reduzcan, ya que a mayor frecuencia las cosas suceden más rápido. En el segundo caso, los sonidos más intensos producen un efecto equivalente a una distorsión, lo cual agrega más frecuencias al espectro o refuerza las ya presentes, modificando de hecho las envolventes secundarias.