

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

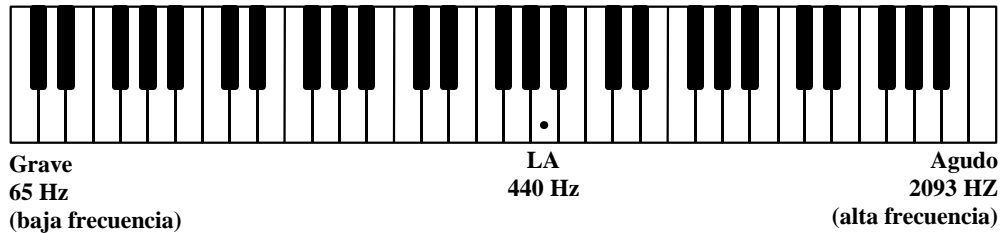


Figura 2.1. Relación entre la frecuencia y la altura en un teclado de 5 octavas. Se ha marcado el LA central, cuya frecuencia se encuentra normalizada internacionalmente a 440 Hz.

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.

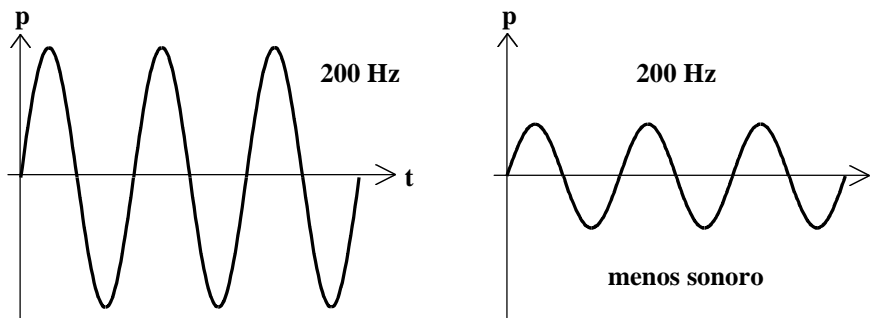


Figura 2.2. Dos senoides de frecuencia **200 Hz**. La de mayor amplitud se percibe como más sonora.

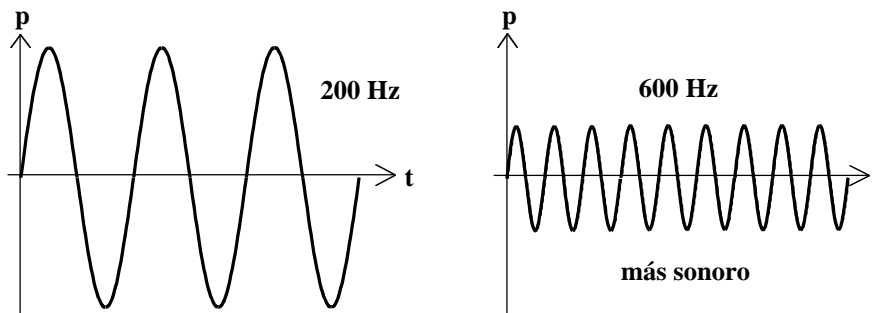


Figura 2.3. Dos senoides de frecuencia **200 Hz** y **600 Hz** respectivamente. La de mayor amplitud se percibe como *menos* sonora.

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*

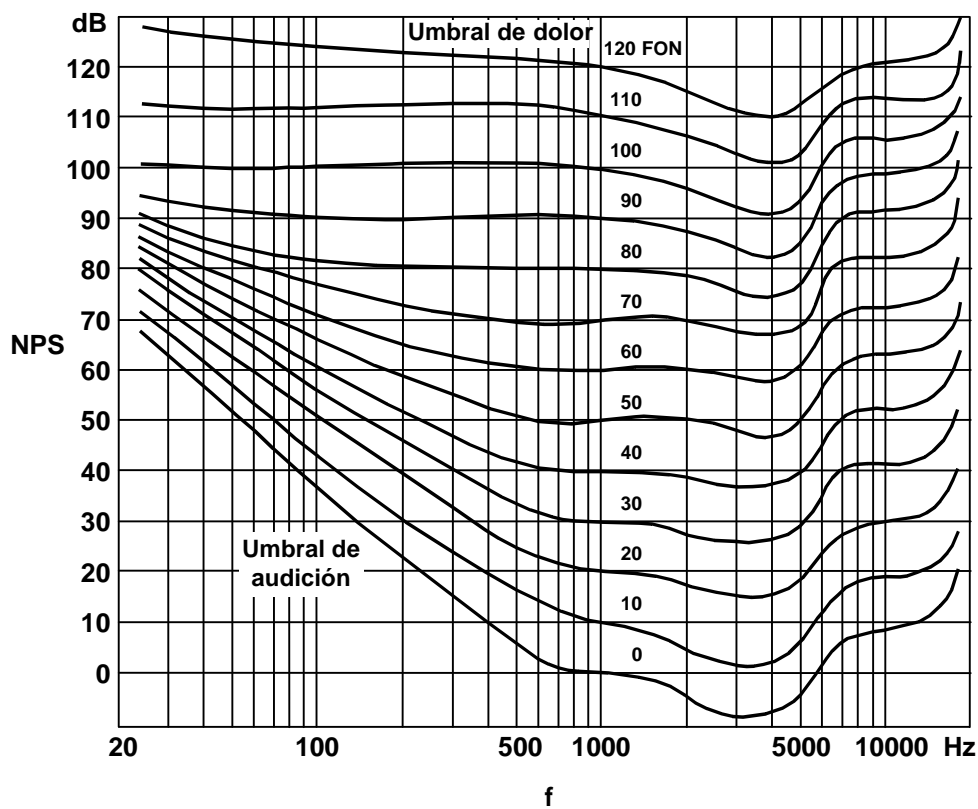


Figura 2.4. Curvas de Fletcher y Munson. Un tono de **200 Hz** y **40 dB** de NPS provocará la misma sensación de sonoridad que uno de **1000 Hz** y **20 dB** de NPS. Se dice entonces que tiene un **nivel de sonoridad** de **20 fon**. Obsérvese que a igual NPS los sonidos muy graves (baja frecuencia) 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.

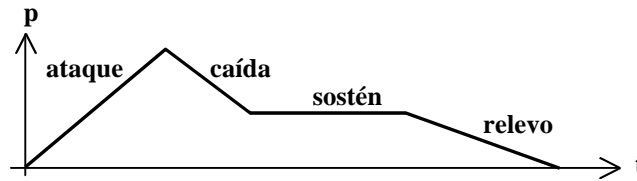


Figura 2.5. Envolvente característica de los primeros sintetizadores de sonido, formada por 4 tramos, que aproxima las envolventes de diversos instrumentos, variando la posición de los extremos de cada tramo.

2.6. Formantes

El segundo enfoque de análisis del timbre, en cambio, busca las características comunes a todos los sonidos de un instrumento o de una voz, y las que los distinguen de los sonidos de otros instrumentos o voces. El elemento fundamental de este análisis es la existencia de **resonancias** en los componentes accesorios al mecanismo propiamente dicho de producción del sonido, resonancias que **filtran** el sonido, favoreciendo determinadas frecuencias más que otras.

Para ilustrar este concepto, tomemos por ejemplo la voz humana. El mecanismo que produce el sonido son las denominadas **cuerdas vocales**, ubicadas en la laringe, detrás de la **nuez de Adán** (protuberancia notoria en los varones a la mitad del cuello). Dicho sonido es filtrado por las diversas cavidades del conducto vocal: la **laringe**, la **cavidad oral** (boca) y la **cavidad nasal** (interior de la nariz). Estas cavidades actúan como tubos, y es sabido que al escuchar a través de un tubo, el sonido se “colorea”, es decir que adquiere una cualidad diferente de la original, debido precisamente a su **acción filtrante**, que privilegia algunas frecuencias sobre otras. Cada una de las cavidades agrega una “coloración” propia, que se combinan para originar no sólo el timbre particular de cada voz, sino el que corresponde, dentro de una misma voz, a cada vocal.

Las frecuencias de las resonancias se denominan **formantes**. En la **Figura 2.6** se muestra, mediante un ejemplo, la forma en que actúan los formantes. Por simplicidad se ha supuesto que el sonido original tiene un espectro compuesto por varios armónicos de igual amplitud. Luego de atravesar el filtro, aquellos armónicos cuyas frecuencias son cercanas a los formantes **F₁**, **F₂** y **F₃** predominan frente a las otras.

El cerebro es capaz de realizar (inconscientemente) un análisis tan elaborado de los sonidos que percibe el oído como para *detectar los formantes característicos de un instrumento o fuente sonora*, y así asociar como pertenecientes a *un único timbre* sonidos con espectros bastante diversos.

Por esta razón, el timbre puede reconocerse aún cuando debido a una deficiencia de un sistema de sonido el espectro se altere. Esto sucede, por ejemplo, en los equipos de mala calidad, que atenúan las frecuencias bajas (graves) así como las altas (agudos). Sin embargo, los formantes, que habitualmente están en la región central del espectro, es decir entre los **200 Hz** y los **4000 Hz**, no son tan severamente afectados y por lo tanto “sobreviven” a la distorsión, permitiendo reconocer el timbre. Un ejemplo son los radios de bolsillo. Otro es el teléfono; en este caso, la fundamental (primer armónico) de

las voces masculinas (y de gran parte de las femeninas) es virtualmente eliminada, lo que no impide que sigamos reconociendo ni los **fonemas** ni los timbres de voz.

No obstante, conviene aclarar que la mera **identidad tímbrica** no es equivalente a la **fidelidad** del sonido, aunque en muchos casos, como en el sistema telefónico, es suficiente con la primera para lograr una buena inteligibilidad del mensaje.

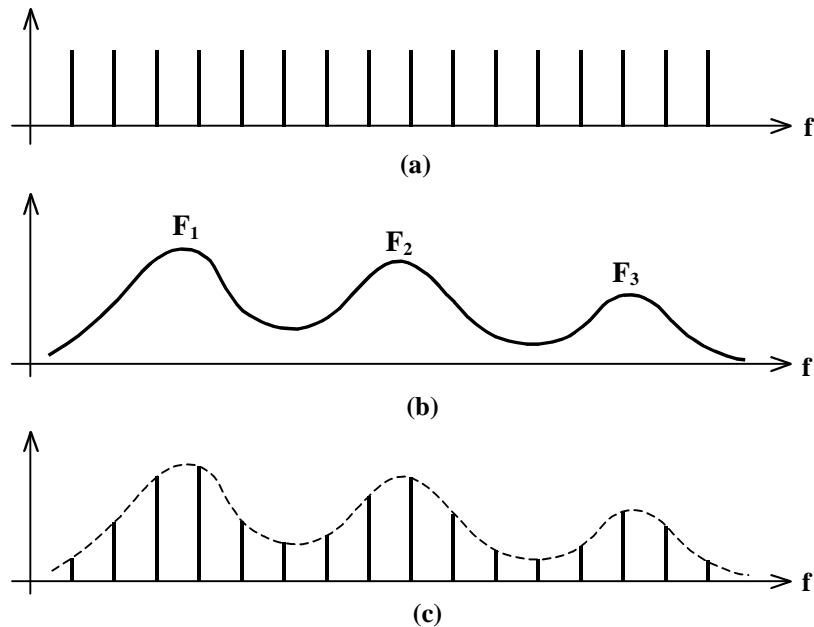


Figura 2.6. Efecto de los formantes. **(a)** Espectro hipotético de un sonido (por simplicidad se ha supuesto de amplitud constante). **(b)** Curva de los formantes. **(c)** Espectro luego de la acción de filtrado de los formantes.

Para concluir con esta breve descripción del timbre, es interesante observar que ni los formantes, ni las envolventes ni el espectro *tomados aisladamente* permiten explicar el timbre, que es más bien resultado de la interacción de todos estos factores. Se han realizado experimentos en los cuales se priva al sonido de un instrumento de su ataque (es decir se altera severamente su envolvente), y el sonido se vuelve prácticamente irreconocible, aunque sus formantes y su espectro no varíen. Por ejemplo, quitando el ataque al piano se obtiene un sonido que más bien parecerá ser de algún instrumento de viento. Del mismo modo, si conservamos la envolvente original pero cambiamos los formantes, se escuchará un sonido algo percusivo como el del piano, pero indudablemente diferenciado de aquél. Se han realizado multitud de experimentos que muestran fenómenos de este tipo y que ponen de manifiesto la complejidad del timbre.

2.7. Direccionalidad del sonido

Hasta el momento hemos estudiado el sonido como una onda de presión que pasaba por un lugar, sin prestar atención a su procedencia. Pero los sonidos reales se origi-

nan en fuentes que están ubicadas en algún lugar del espacio circundante, dando origen a dos tipos de sensaciones: la **direccionalidad** y la **espacialidad**. La direccionalidad se refiere a la capacidad de localizar la dirección de donde proviene el sonido. Esta sensación es la que nos permite ubicar visualmente una fuente sonora luego de escucharla. La espacialidad, en cambio nos permite asociar un sonido con el ambiente en el cual éste se propaga, y estimar por ejemplo las dimensiones de una habitación o una sala sin necesidad de recurrir a la vista.

La direccionalidad está vinculada con dos fenómenos. El primero es la pequeña diferencia de tiempos que hay entre la percepción de un sonido con el oído derecho y con el oído izquierdo, debido a que el recorrido de la onda sonora desde a la fuente (un instrumento, por ejemplo) hasta cada oído es diferente (**Figura 2.7**). Así, un sonido proveniente de la izquierda llegará antes al oído izquierdo, simplemente porque éste está más cerca de la fuente sonora. Esta diferencia es siempre menor que **0,6 ms**.

El otro fenómeno es la diferencia de presiones sonoras (o intensidades), también causada por la diferencia entre las distancias. En el ejemplo del sonido que viene de la izquierda, la presión sonora es mayor en el oído izquierdo, no sólo por estar más cerca de la fuente, sino porque además la cabeza actúa como barrera para el sonido.

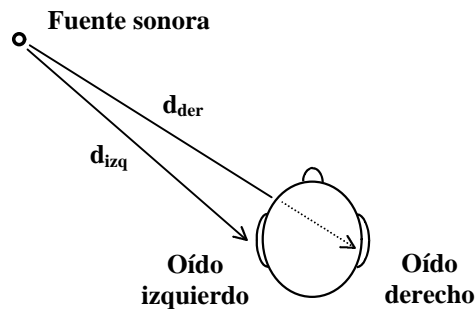


Figura 2.7. Direccionalidad del sonido. El recorrido entre la fuente sonora y el oído izquierdo es menor que el correspondiente al oído derecho, es decir $d_{izq} < d_{der}$. Por esto el sonido llega antes y con mayor presión al oído izquierdo que al derecho.

2.8. Efecto Haas (de precedencia)

Un experimento interesante consiste en alimentar unos auriculares estereofónicos con dos señales iguales, una de las cuales se encuentra ligeramente retardada respecto a la otra (**Figura 2.8**). Si se va aumentando el retardo desde **0** a **0,6 ms**, se crea la sensación de una **fuentes virtual** (es decir aparente) que parece desplazarse desde el frente hacia el lado que no experimenta retardo. Después de los **0,6 ms** y hasta los **35 ms** de retardo, la fuente virtual permanece más o menos fija, pero parece *ensancharse* cada vez más. Para retardos mayores de **35 ms** la fuente virtual se divide en dos, percibiéndose separadamente ambos canales, como provenientes de fuentes diferentes. A medida que el retardo se hace mayor, el segundo sonido aparece como un **eco** del primero. Este experimento

ilustra el denominado **efecto de precedencia**, o también **efecto Haas** (en honor al investigador que estudió sus consecuencias para la inteligibilidad de la palabra), que puede utilizarse para controlar de un modo más realista la ubicación aparente de una fuente en la imagen estereofónica.

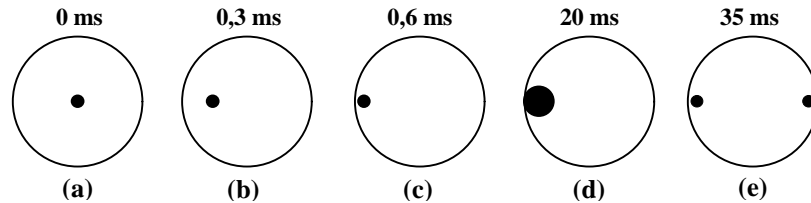


Figura 2.8. Efecto **Haas**, o efecto de **precedencia**. Se envía por medio de auriculares un sonido corto a ambos oídos, estando el correspondiente al oído derecho retrasado respecto al del oído izquierdo. En la figura se muestran las imágenes auditivas ante diferentes retardos: **(a)** La señal llega a ambos oídos simultáneamente (sin retardo). **(b)** La señal llega al oído izquierdo **0,3 ms** después que al oído derecho: la fuente virtual se desplaza hacia la derecha. **(c)** La señal llega al oído izquierdo **0,6 ms** después que al oído derecho: la fuente virtual deja de moverse. **(d)** La señal llega al oído izquierdo **20 ms** después que al oído derecho: la fuente virtual parece ensancharse. **(e)** La señal llega al oído izquierdo **35 ms** después que al oído derecho: por primera vez se crea la sensación de *dos fuentes virtuales*.

2.9. Espacialidad

La espacialidad del sonido depende de varios factores. El primero es la **distancia** entre la fuente y el oído. Esto está vinculado a la familiaridad que se tenga con una fuente sonora específica (o un tipo de fuente). A mayor distancia, la presión sonora es menor, lo que hace que si se conoce la fuente, se pueda tener una idea de la distancia. Por ejemplo, si escuchamos a alguien *hablar normalmente*, podemos saber si se encuentra cerca o lejos. Si se trata de una fuente desconocida, el cerebro la asociará inconscientemente con alguna fuente que resulte más familiar.

El segundo factor lo constituyen las **reflexiones tempranas**. En el descampado, la onda sonora generada por una fuente se aleja indefinidamente atenuándose hasta volverse inaudible (**Figura 2.9a**). En un ambiente cerrado, en cambio, la onda sonora se refleja en las paredes múltiples veces (**Figura 2.9b**). Las primeras reflexiones se denominan **reflexiones tempranas**. Las reflexiones tempranas proveen al sistema auditivo una clave temporal que se relaciona con la distancia entre las paredes, lo cual a su vez se vincula al tamaño del ambiente. Esto crea la sensación de **ambiencia**.

El tercer factor que hace a la espacialidad del sonido es la **reverberación**. El fenómeno de la reverberación se produce como consecuencia de las numerosas **reflexiones tardías** del sonido. Mientras que las primeras reflexiones (las reflexiones tempranas) están distanciadas considerablemente, las subsiguientes comienzan a superponerse entre sí, debido a que aparecen las reflexiones de las reflexiones, y luego las reflexiones

de las reflexiones de las reflexiones, y así sucesivamente. Esto lleva a que al cabo de unos pocos instantes se combinen miles de reflexiones que dan origen a la reverberación (**Figura 2.10**).

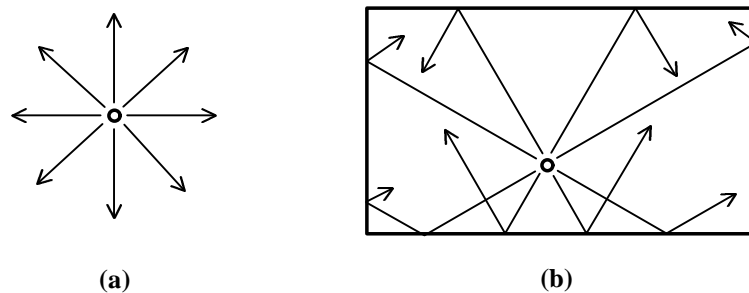


Figura 2.9. (a) Una fuente sonora en campo abierto: el sonido se aleja indefinidamente de la fuente. (b) Una fuente sonora encerrada en un ambiente cerrado: el sonido se refleja una y otra vez en las superficies del recinto (paredes, techo y piso).

El efecto más conocido de la reverberación es el hecho de que el sonido se prolonga aún después de interrumpida la fuente. Por ejemplo si golpeamos las manos, aunque el sonido generado es muy corto, “permanece” en el ambiente durante algunos instantes. El tiempo de permanencia, o **tiempo de reverberación**, depende de las características acústicas del ambiente, y nos da una clara sensación de espacialidad que puede y *debe* ser aprovechada en audiotécnica para evocar ambientes de gran realismo.

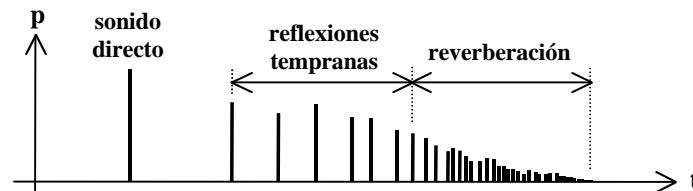


Figura 2.10. Reflexiones tempranas y reverberación en un ambiente cerrado.

El último factor que interviene en la sensación de espacialidad es el movimiento de la fuente. Muchas fuentes son fijas, pero otras son móviles, y la movilidad es percibida a través no solo del desplazamiento evocado por la dirección de procedencia del sonido, sino por el denominado **efecto Doppler**, por el cual la frecuencia de una fuente móvil parece cambiar. Así, cuando una ambulancia se acerca a nosotros, la altura (frecuencia) del sonido emitido por la sirena es mayor (más agudo) que cuando la ambulancia se detiene. Cuando, contrariamente, ésta se aleja, la altura baja, (más grave). Este efecto sólo rara vez se utiliza en música, ya que normalmente se supone que los instrumentos musicales se mantienen en una posición determinada, o los eventuales desplazamientos se producen con lentitud, siendo el cambio de frecuencia imperceptible.

Tiene aplicación, sin embargo, en las bandas de sonido de películas o videos, ya que permite simular con mayor realismo una fuente móvil (típicamente un vehículo).

2.10. Enmascaramiento

Dentro de las cualidades del oído hay una que tiene consecuencias de gran importancia para la audición, y es el hecho de que los sonidos son capaces de **enmascarar** a otros sonidos. Enmascarar a un sonido significa ocultarlo o hacerlo imperceptible. El **enmascaramiento** es un fenómeno bastante familiar para todos. Sucede, por ejemplo, cuando intentamos escuchar a alguien que habla en medio de un ruido muy intenso: no podemos discriminar lo que dice porque su voz es *enmascarada* por el ruido.

Es interesante observar que el enmascaramiento *es una propiedad del oído, no del sonido*. En un buen equipo de audio, si mezclamos un sonido muy intenso (por ejemplo **90 dB**) con otro muy débil (por ejemplo **20 dB**), la salida de los parlantes contendrá *ambos* sonidos en sus proporciones originales. Esto puede comprobarse aislando sucesivamente, mediante filtros adecuados, uno u otro sonido. Sin embargo el oído *no percibirá* el de **20 dB**.

Se ha estudiado con gran detalle el efecto enmascarador de los sonidos sobre otros sonidos. Para ello se determinó cómo cambia la curva del umbral de audición ante la presencia de un sonido dado (denominado **sonido máscara**, o **sonido enmascarante**). Esta determinación se repitió para diversos sonidos máscara, de distintas frecuencias, amplitudes y contenidos espectrales. A modo de ejemplo, en la **Figura 2.11** se muestra el efecto de un tono máscara de **400 Hz** para varios niveles sonoros (**40 dB**, **60 dB** y **80 dB**). Se puede apreciar que a medida que aumenta el nivel de presión sonora del tono máscara, mayor resulta el incremento del umbral, lo cual significa que los otros tonos deberán ser cada vez más intensos para no ser enmascarados. Por otra parte, la región enmascarada se ensancha, vale decir que la zona de influencia de la máscara crece. En otras palabras, al aumentar el nivel del tono máscara, se produce un incremento cuantitativo (mayor nivel) y cualitativo (más frecuencias) del umbral.

El enmascaramiento es, en cierto sentido, un defecto del oído, pero también es una virtud, ya que nos permite desembarazarnos de una cantidad de información inútil o difícil de procesar por el cerebro. Una interesante aplicación del enmascaramiento es la compresión de los datos de **audio digital**, de manera de reducir la cantidad de espacio requerido para almacenar un tiempo dado de música. La técnica se basa en aprovechar que mucha información que aparece en una grabación de alta calidad no aporta nada a la audición, ya que es enmascarada por otros tonos presentes, de modo que puede eliminarse, con ahorro de espacio. Por ejemplo, si se detecta que existe un tono de **400 Hz** de **80 dB**, de acuerdo a lo indicado por la curva de **80 dB** de la **Figura 2.11** un tono de **1 kHz** y **30 dB** será inaudible, y por consiguiente se puede eliminar sin perjuicio alguno para la calidad de la reproducción. Esta idea se aplica en los **DCC (Digital Compact Cassette)**, o cassette compacto digital) y en los **MD (Minidisc)**, así como en el formato comprimido **MP3** usado en Internet. Últimamente también se está utilizando para mejorar la calidad de los **CD (Compact Disc)** del estándar de **16 bits** a **19** ó **20 bits**.

La música funcional de los locales comerciales, los bares y algunas salas de espera de consultorios médicos, también aprovecha el fenómeno de enmascaramiento, posibilitando cierta “privacidad pública”, al impedir que las conversaciones ajenas puedan ser escuchadas por terceras personas.

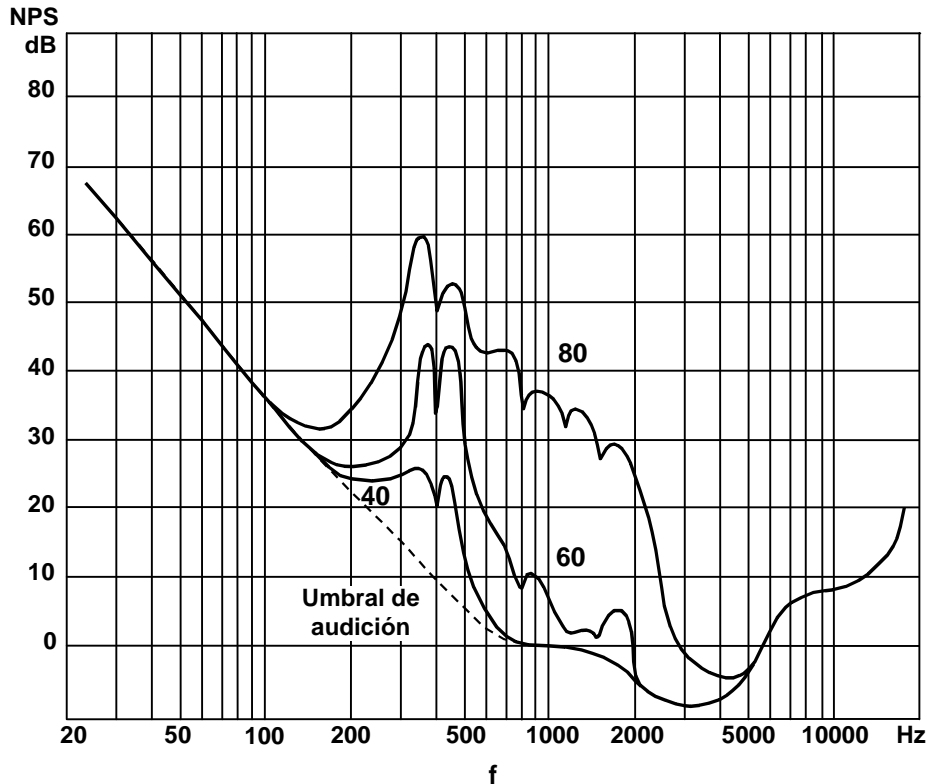


Figura 2.11. Enmascaramiento. Curvas de umbral de audición ante la presencia de un **tono máscara** de **400 Hz** (según Egan, Harold y Hake). Se muestran las curvas correspondientes a los casos en que el tono máscara tiene niveles de presión sonora de **40 dB**, **60 dB** y **80 dB** respectivamente, y en línea de trazos, el umbral de audición original. Se observa que cuanto mayor es el nivel del tono máscara, mayor es el incremento del umbral, y *más amplia* la zona del espectro afectada.

Por último, también se apela al enmascaramiento en forma inconsciente cuando se incrementa el volumen de un equipo de música o del walkman ante la existencia de ruidos ambientes. En este caso, al elevar el nivel sonoro de la música, ésta enmascara al ruido ambiente, permitiendo escuchar la música en mejores condiciones. En el mundo moderno el ruido ambiente es considerable, lo que ha llevado a la sociedad al acostumbramiento, y aún a la predilección por la música “a todo volumen”. Esto es potencialmente peligroso para la salud auditiva (ver capítulo 5), ya que para enmascarar el ruido con la música se requiere que el nivel de ésta se encuentre entre **20 y 30 dB** por arriba del ruido. Así, si el ruido ambiente es de **75 dB**, es probable que el usuario del walkman esté escuchando a un nivel cercano a los **100 dB**.