

Figura 3.8: Amplitud de los armónicos de los tonos compuestos mostrados en las figuras incluidas en 3.7.

frecuencia $\nu = 12.558$ Hz— es tan agudo, que personas de edad ya no lo escuchan, siendo escasa su influencia en la generación del timbre del tono. Notas muy agudas siempre poseen pocos armónicos en el rango auditivo del oído humano. Como consecuencia de ello, los tonos muy agudos tienen poca variabilidad de timbre. Para el oído humano, el sonido producido por los distintos instrumentos musicales se parece cada vez más, a medida que aumenta su frecuencia.

Lo contrario ocurre con los tonos gra-

ves. Con un analizador de Fourier³, por ejemplo, es posible determinar la intensidad de al menos 50 armónicos del *Mi* de 82,4 Hz emitido por un trombón. Este quincuagésimo armónico tiene una frecuencia de 4.120 Hz y está en la región de frecuencias para la cual la sensibilidad del oído es máxima. Por consiguiente, para tonos graves existe una amplia posibilidad de variar la intensidad de los distintos armónicos que los componen; los tonos graves despliegan una amplia variedad de timbres.

Como hemos dicho anteriormente, la intensidad con que percibimos un sonido depende del tamaño de las variaciones de la presión atmosférica que ponen en movimiento nuestro tímpano. En forma más precisa, en la sección 1.6 se dijo que la energía irradiada por una fuente sonora es proporcional al cuadrado del tamaño de las variaciones de la presión atmosférica por ella inducidas. Sin embargo, ésta no es la única magnitud de la que depende la energía sonora; tal como se podría sospechar, también depende de la frecuencia del sonido.

Se puede demostrar que la intensidad sonora de un armónico puro de frecuencia ν y amplitud b es proporcional a $(\nu b)^2$. Este hecho —que la intensidad del sonido irradiado por un armónico depende del cuadrado de su frecuencia— tiene como consecuencia que aun pequeñas oscilaciones de armónicos de alta frecuencia pueden influir en forma perceptible en el timbre del sonido. Por ejemplo, si en una cuerda el décimo armónico genera una perturbación atmosférica cuya amplitud de oscilación es igual a la décima parte de la generada por el armónico fundamen-

³Un analizador de Fourier es un instrumento que mide la intensidad de los distintos armónicos presentes en un tono.

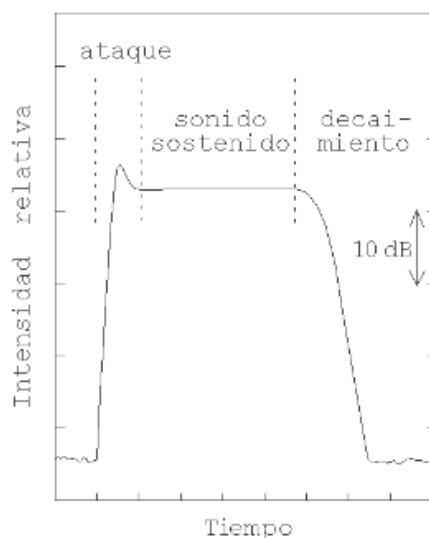


Figura 3.9: Desarrollo temporal de la intensidad de un sonido mostrando las tres etapas características.

tal, ambos armónicos irradiarán la misma energía sonora.

Evolución temporal de un sonido

El otro aspecto de un sonido que participa en la conformación de su timbre es la variación temporal de su intensidad.

En la figura 3.9 se muestra esquemáticamente una evolución temporal típica de un sonido.

En los instrumentos de viento, los distintos armónicos no aparecen por arte de magia. Sólo después de muchas idas y venidas del sonido a lo largo de la columna de aire que existe en el interior del instrumento se presentan y se refuerzan los armónicos que terminamos por escuchar. Por lo mismo, el sonido precursor puede ser bastante distinto al que finalmente llegará a establecerse.

En el piano, la tabla sonora no co-

mienza a oscilar en el instante en que el macillo golpea la cuerda. Necesariamente deberá transcurrir cierto tiempo antes de que la cuerda transfiera a la tabla sonora la energía que le permita oscilar regularmente.

Existe entonces un lapso, que recibe el nombre de *ataque*, durante el cual las oscilaciones regulares terminan por establecerse.

El sonido emitido por un instrumento durante el ataque también incluye los ruidos anexos: en el piano, el ruido generado por el mecanismo que impulsa el macillo; en la flauta, el ruido causado por el flujo del aire; etc.

Volviendo a la figura 3.9, la etapa intermedia comprende el período en que el sonido suena establemente. Esto no significa que durante esa etapa su intensidad no pueda variar —en un violín, el músico podría acelerar el arco y de esa manera incrementar la sonoridad del instrumento.

El decaimiento del sonido indica cómo se desvanece cuando se apaga su fuente primaria —cuando el flautista deja de soplar, el pianista suelta la tecla, el guitarrista apaga la cuerda con la yema de su dedo, el timbalero apoya su mano en el parche, etc.

El ataque, el período de sonido sostenido y el decaimiento son características fundamentales que influyen en la percepción del timbre de un sonido. Si con un sintetizador de sonidos se desea emular el sonido de algún instrumento musical, es indispensable que no sólo se reproduzca la intensidad de los distintos armónicos, sino también la evolución temporal de su intensidad.

Concluimos esta sección analizando el comportamiento temporal del sonido emitido por algunos instrumentos.

En una trompeta, el tiempo de ataque varía entre 20 y 30 ms (milisegundos) para un "ataque duro", siendo éste acompañado por un ruido explosivo de corta duración. También se puede iniciar el sonido con un "ataque suave", en cuyo caso éste tarda entre 40 y 180 ms. El período de sonido estable puede tener una máxima duración de 7 a 41 segundos, dependiendo de su intensidad y frecuencia como también del estado físico del ejecutante. El tiempo de decaimiento es corto, del orden de unos 20 ms.

También en la flauta travesa el músico puede variar el tiempo de ataque dentro de cierto rango: en el registro grave, desde ~ 100 ms, si se toca *staccato*, hasta 300 ms para un ataque suave (la flauta travesa, de todos los instrumentos de viento, es el que presenta el mayor tiempo de ataque). Para sonidos agudos, el tiempo de ataque disminuye considerablemente, pudiendo ser de sólo unos 30 ms. El período de sonido estable, de acuerdo a las circunstancias, puede durar a lo más entre 10 y 35 segundos. El tiempo de decaimiento, igual que en la trompeta, es corto.

En el violoncelo, al tocarlo *staccato*, los tiempos de ataque varían entre 60 y 100 ms. Con un ataque suave, estos tiempos pueden aumentar hasta 350 ms para los sonidos graves y 200 ms para los agudos. El tiempo de decaimiento, en este instrumento, depende de la intensidad: sonidos pianísimos (pp) tardan entre 50 y 200 ms en decaer; en sonidos fortísimos (ff), este tiempo aumenta, siendo de entre 400 y 1.000 ms.

Una experiencia sencilla que demuestra la importancia de la evolución temporal de un sonido en la caracterización de su timbre es la siguiente: grabar (en una cinta magnética o usando la tarjeta de so-

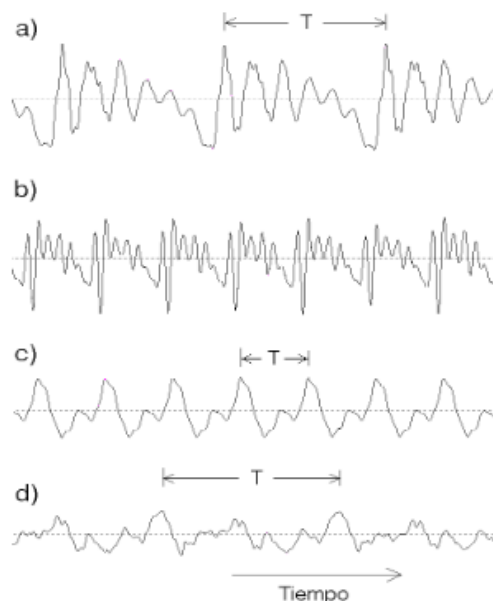


Figura 3.10: Variaciones de la presión atmosférica ejercidas por a) la voz de un bajo, b) la voz de una soprano, c) una flauta dulce y d) una guitarra. (La escala horizontal no es la misma para los cuatro sonidos mostrados.)

nido de un computador personal) algunos sonidos de un piano y reproducirlos en el sentido temporal contrario. Lo que se escuchará se parecerá más a los sonidos de una acordeón que a los de un piano.

3.5 Espectros sonoros de algunos sonidos

En esta sección mostraremos espectros sonoros de algunos sonidos y resumiremos, en gruesas líneas, las relaciones que se han podido establecer entre estos espectros y el timbre.

La figura 3.10 muestra las fluctuaciones de presión a medida que transcurre el tiempo de: a) un bajo cantando la vocal

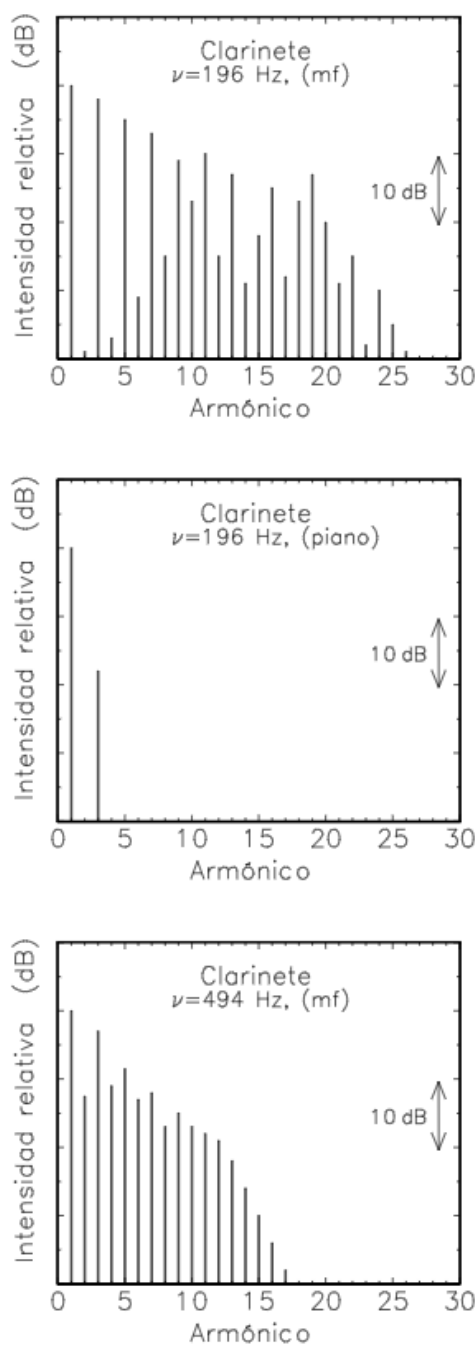


Figura 3.12: Descomposición espectral de algunos sonidos emitidos por un clarinete.

un instrumento, además de depender significativamente de su intensidad y frecuencia, depende de cómo el músico genera el sonido.

En la figura 3.12 se muestra el análisis de Fourier de algunos sonidos del clarinete. Lo característico del clarinete es el marcado predominio de los armónicos impares sobre los pares, sobre todo para los armónicos de orden menor. Notemos cómo el espectro cambia significativamente al variar la intensidad del sonido. Como norma general, al aumentar la intensidad del sonido de un instrumento, se incrementa el número de armónicos de orden alto. También hay un cambio importante en el espectro al variar la frecuencia del sonido. A medida que el sonido se hace más agudo, el número de armónicos disminuye.

La figura 3.13 muestra el análisis espectral para algunos sonidos del corno. Para sonidos *mezzoforte* (mf), el corno muestra un espectro de pocos armónicos, en los cuales domina el fundamental, decreciendo la intensidad de los demás en forma gradual y pareja; el resultado de esto es un sonido cálido, lleno y de gran dulzura (recordemos el *solo* de corno del 2º movimiento, *andante cantabile*, de la Quinta sinfonía de P. I. Tchaikowski). Al aumentar la intensidad del sonido, aparecen en el espectro armónicos de orden cada vez mayor, generando paulatinamente un sonido más metálico y brillante. En la figura 3.13 también se muestra cómo cambia la intensidad relativa de los distintos armónicos al taponar el corno (es decir, al introducir la mano en el pabellón del instrumento). Este proceso aminora la intensidad de los armónicos bajos e incrementa la intensidad de los armónicos altos, manifestándose en un sonido algo más nasal y cerrado.

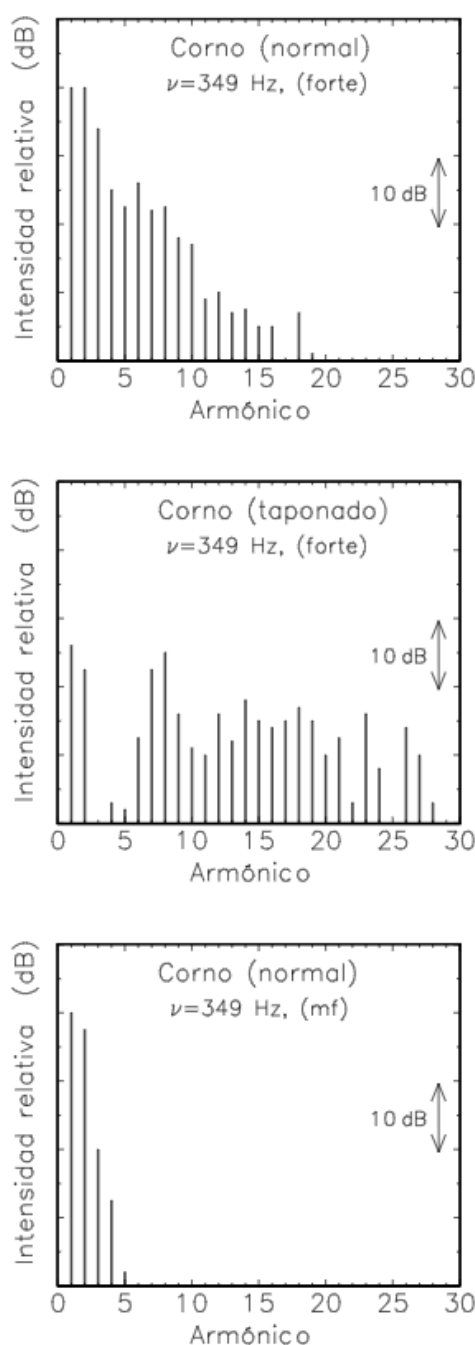


Figura 3.13: Descomposición espectral de algunos sonidos emitidos por un corno.

Deseamos hacer notar que los espectros que hemos mostrado en esta sección también dependen del instrumento. Por ejemplo, los espectros de sonidos, de la misma intensidad y frecuencia, emitidos por dos violines distintos, lo más probable es que muestren diferencias significativas. Por esta razón se debe centrar la atención en los grandes rasgos de los espectros.

Recurriendo a un lenguaje menos preciso, y no sin cierta subjetividad, podemos describir cómo afecta la intensidad de los distintos armónicos el timbre del sonido:

1. Tonos simples, que son los sonidos generados por un diapasón, sólo poseen el armónico fundamental. El sonido es suave y agradable, pero de poca presencia y musicalmente poco útil.
2. Tonos con armónicos hasta el quinto o sexto orden corresponden a sonidos mucho más ricos y más musicales, y generan un sonido que se puede calificar de *suave*, *cálido*, *lleno* y de gran *poesía*.
3. Sonidos con numerosos armónicos, pero en los que predominan los primeros 8, suenan *llenos*. Los armónicos de orden más alto contribuyen a darle *carácter* al sonido.
4. El predominio de armónicos de orden y frecuencia altos genera un sonido *metálico*.
5. La ausencia o débil presencia de armónicos pares genera un sonido *huevo* y *tapado*.
6. El predominio de los armónicos pares contribuye a un sonido *abierto* y *luminoso*.

7. El predominio de armónicos con frecuencias entre los 2.000 y 3.000 Hz genera un sonido *penetrante* y algo *nasal*.

3.6 Formantes

Al tocar con un instrumento un sonido fuerte o fortísimo, el espectro mostrará numerosas componentes, teniendo la línea envolvente que engloba la intensidad de los distintos armónicos⁵, varias crestas y valles (ver, por ejemplo, la descomposición espectral para el violín mostrado en la figura 3.11b). Lo interesante de esta envolvente es que las posiciones de sus crestas y valles se mantienen relativamente inalteradas cuando uno cambia de frecuencia, siendo, por consiguiente, una característica propia de cada instrumento, la cual contribuye a la determinación de su timbre.

El mismo fenómeno se observa en la voz humana. Si un cantante entona, subiendo y bajando la frecuencia, la vocal “a”, en el espectro de Fourier los armónicos de mayor intensidad serán los que tengan frecuencias de entre 800 y 1.200 Hz, independientemente de la altura del sonido. Al cambiar de vocal, el máximo de la envolvente cambia de frecuencia (ver figura 3.14).

Otro ejemplo: consideremos un barítono que entona una “i” con una frecuencia de 200 Hz (lo que corresponde a un sonido en el centro de su registro). En la descomposición espectral del sonido, los armónicos de orden 13 al 20, cuyas frecuencias cubren el intervalo que va desde los 2.600 a los 4.000 Hz, mostrarán una clara preeminencia.

⁵ La envolvente es la línea que uniría las partes superiores de las barritas en las figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

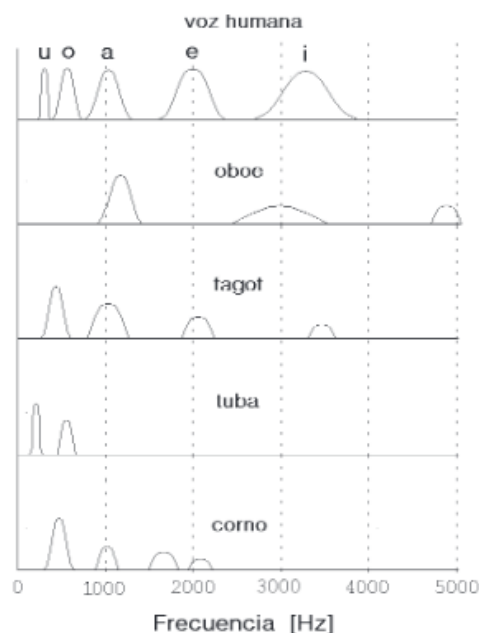


Figura 3.14: Se muestra esquemáticamente la posición de los formantes de varios instrumentos musicales y también el formante principal asociado a las vocales del idioma español.

Los picos (generalmente anchos) de la envolvente se denominan *formantes*. Existe cierta discusión sobre qué es más importante para la determinación del timbre de un instrumento musical, si la magnitud individual de cada armónico o bien las propiedades globales de los armónicos determinadas por los formantes.

Para el oboe, el formante principal aparece para frecuencias relativamente altas, de entre 1.000 y 1.400 Hz, teniendo dos formantes secundarios, para intervalos de frecuencias aún mayores: 2.500 – 3.500 Hz y 4.600 – 5.000 Hz. El sonido penetrante y algo melancólico del oboe (recordemos el tema del pato en *Pedro*

y el Lobo de Prokofieff), capaz de sobreponerse a toda una orquesta, se debe al hecho de que todos los formantes ocurren para frecuencias relativamente altas y a que no coinciden con las posiciones de los formantes de los otros instrumentos. El segundo formante, que aparece para frecuencias de entre 2.500 y 3.500 Hz, es responsable del sonido levemente nasal del instrumento. Para frecuencias graves, domina el formante principal, dándole al oboe una sonoridad *abierta*, característica de la vocal “a”, efecto que es reforzado aún más por un predominio de los armónicos pares sobre los impares.

De acuerdo a la figura 3.11d, la descomposición espectral de un sonido de 196 Hz emitido por un fagot tiene su máximo para el armónico $n=2$ y 3. Las frecuencias ($2 \cdot 196 = 388$ y $3 \cdot 196 = 588$) de esos armónicos caen dentro del intervalo de frecuencias del formante principal del fagot. También los máximos para $n=10$, 11 ($\nu = 11 \cdot 196 = 2.156$ Hz) y $n=16$, 17 ($\nu = 17 \cdot 196 = 3.332$ Hz) se pueden poner en correspondencia con los formantes secundarios que el fagot tiene para frecuencias de alrededor de 2.000 y 3.400 Hz (ver figura 3.14).

3.7 Consonancia y disonancia

El descubrimiento de las relaciones existentes entre la música, la matemática y la física se remonta al siglo VI antes de Cristo, época en que la *Escuela de Pitágoras* realizó un exhaustivo estudio de la cuerda vibrante (monocuerda). Los descubrimientos de Pitágoras y sus discípulos fueron el punto de partida de todos los estudios posteriores de la armonía en la música y, sin lugar a dudas, influyeron en forma importante en lo que hoy en día conocemos como la música del mundo oc-

cidental.

Todos nosotros hemos pulsado una cuerda de guitarra y hemos notado que, si la acortamos —presionándola con los dedos contra los trastes—, la frecuencia del sonido cambia. Ya Pitágoras se dio cuenta de que si la cuerda se acortaba a la mitad, la frecuencia del sonido aumentaba al doble, elevándose su sonido en una *octava*. Si, por ejemplo, el tono de la cuerda entera corresponde a un *Do*, las oscilaciones de la mitad de la cuerda generan el *Do'* siguiente, una octava más agudo⁶.

El descubrimiento importante de la escuela de Pitágoras consistió en percatarse de que los intervalos musicales más consonantes con respecto a la cuerda total —es decir, los que suenan más agradables al oído al sonar conjuntamente— se obtienen cuando, al acortarla, el pedazo de cuerda que oscila corresponde a una fracción (irreducible) n/m de la cuerda completa, en la que tanto el numerador n como el denominador m son enteros pequeños. Cuanto más pequeños son estos enteros, tanto más consonante se percibe el sonido simultáneo de los dos sonidos.

Al permitir que vibre la mitad de la cuerda, la frecuencia aumenta en un factor $2/1$, siendo el intervalo entre los dos sonidos lo que se conoce con el nombre de *octava*⁷.

Algunas notas de la escala natural mayor

Al permitir que vibren $2/3$ de la longitud de una cuerda, la frecuencia aumenta en

⁶Para distinguirlo del primer *Do* le hemos agregado una “prima”.

⁷Este resultado se desprende fácilmente de las ecuaciones (3.3) y (3.4), de acuerdo a las cuales la longitud de una cuerda es inversamente proporcional a las frecuencias que emite.

El acorde perfecto mayor será el bloque fundamental para la construcción de las demás notas de la escala musical mayor.

Las demás notas de la escala natural mayor

Si las notas *Sol-Si-Re'* han de corresponder a las de un acorde perfecto mayor, las frecuencias de sus tres notas deberán estar en la razón 4 : 5 : 6. Entonces

$$\frac{Si}{Sol} = \frac{5}{4} \quad \text{y} \quad \frac{Re'}{Sol} = \frac{6}{4} = \frac{3}{2}.$$

A partir de la última relación podemos deducir las frecuencias del *Si* y del *Re'*. (La frecuencia del *Re* se obtiene dividiendo la frecuencia del *Re'* por 2.)

Para obtener la frecuencia del *La*, usemos el hecho de que *Fa-La-Do'* es un acorde perfecto mayor. Entonces

$$\frac{La}{Fa} = \frac{5}{4},$$

relación que nos permite establecer la frecuencia del *La*.

De esta manera hemos podido relacionar las frecuencias de todas las notas de la escala *Do mayor*.

Establezcamos las razones de frecuencias para algunos intervalos adicionales. Por ejemplo:

$$\frac{Fa}{Mi} = \frac{Fa}{Do} \cdot \frac{Do}{Mi} = \frac{4}{3} \cdot \frac{4}{5} = \frac{16}{15},$$

$$\frac{Do'}{Si} = \frac{Do'}{Do} \cdot \frac{Do}{Sol} \cdot \frac{Sol}{Si} = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{4}{5} = \frac{16}{15},$$

$$\frac{Re}{Do} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Re'}{Do} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Re'}{Sol} \cdot \frac{Sol}{Do} = \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{2} = \frac{9}{8}$$

Continuando de esta manera podemos deducir la razón entre las frecuencias de todas las notas de la escala *Do mayor*.

La figura 3.17 muestra tales razones para notas sucesivas de la escala *Do mayor* en la afinación natural o *justa*. Se observa que los cuocientes de frecuencias para notas adyacentes son: 9/8, 10/9 y 16/15. Se suele llamar *tono* a un intervalo musical¹⁰ si la razón de frecuencias de sus dos sonidos cae entre los números 9 : 8 y 10 : 9, y *semitono* cuando tal razón está entre 25 : 24 y 27 : 25 (el valor 16 : 15 cae dentro de este último intervalo). De esta manera, la escala mayor, en dirección ascendente, a partir de la tónica hasta la octava siguiente, está constituida por los intervalos: tono – tono – semitono – tono – tono – tono – semitono.

La escala natural mayor así construida, recurriendo a acordes e intervalos cuyas notas tienen razones de frecuencias dadas por fracciones con enteros pequeños, es la escala musical de ocho notas que mayor agrado produce, creando en los oyentes (en la cultura occidental) la sensación de óptima afinación. Sin embargo, esta escala, tan satisfactoria desde el punto de vista estético y matemático, tiene ya desde su gestación algunos problemas que se hacen evidentes tan pronto como el desarrollo armónico de la pieza musical se vuelve más complejo.

Para comprender el origen de estas dificultades analicemos más detalladamente las razones entre las distintas notas de la escala natural. En la figura 3.17 se observa que la razón (de las frecuencias) del intervalo *Do:Re* es distinta a la del intervalo *Re:Mi*. Luego, al cambiar de tónica (un recurso usado con frecuencia por un compositor para evitar la monotonía en piezas musicales largas y sofisticadas), la escala musical sonará

¹⁰No confundir el concepto de *tono* como intervalo musical con el introducido anteriormente, que se refería a un sonido musical.

