

Fundamentos Físicos del Sonido

Alberto Betancourt

Fundamentos Físicos del Sonido

La Frecuencia:

La frecuencia determina la entonación de una nota musical y consiste en la cantidad de vibraciones o ciclos por segundo que se miden en Hertzios (Hz) o vps (vibraciones por segundo) o cps (ciclos por segundo).

Un tubo de órgano abierto de 1' (1 pié) produce una frecuencia de 512 Hz. Así resulta muy fácil calcular la frecuencia que produce cualquier tubo, mediante una regla de tres:

Cuál es la frecuencia de un tubo de 32'?

$$\begin{array}{r} 1' \quad 512\text{Hz} \\ 32' \quad X\text{Hz} \end{array}$$

$$X = 512/32 = 16\text{Hz}$$

Así podemos aplicar una fórmula práctica:

$$f = 512/L$$

donde **f** es la frecuencia en Hertzios y **L** la longitud del tubo en pies.

¿Cual es la frecuencia de un tubo de 4'?

$$\begin{array}{r} 1' \quad 512\text{Hz} \\ 4' \quad X\text{Hz} \end{array}$$

$$X = 512/4 = 128\text{Hz}$$

La frecuencia que produce un tubo de 4' es 128Hz

¿Cual será la medida del tubo que produce la frecuencia 256Hz (DO4)?

$$f = 512/L$$

$$L = 512/f$$

$$L = 512/256 = 2'$$

La longitud del tubo es 2' (2 pies) = 60,96cm

Longitud del tubo que produce 261.626 Hz (D04 en afinación 440):

$$L = 512/f$$

$$L = 512/261.626 = 1.957'$$

La longitud del tubo es **1.957' = 59.65cm**

Para afinar el tubo a A=440 debe rebanar: $60.96-59.65=1.31\text{cm}$.

La Afinación:

La afinación natural se realiza a partir de la nota **LA4** con una frecuencia de **432Hz**.

Desde el Siglo XVI hasta mediados del Siglo XX la afinación variaba mucho según diapasones entre $A=380$ y $A=480$, y según las distintas afinaciones de órganos, clavecines y virginales. Verdi usaba la afinación $A=432$ y sostenía que esa era la afinación perfecta.

En 1939 un político nazi de nombre Joseph Goebbels, ministro de la Ilustración Pública y Propaganda del Tercer Reich entre 1933 y 1945, decidió que la afinación perfecta era a partir de $A=440\text{Hz}$, creando un decreto que la imponía para la afinación de todas las orquestas en Alemania.

Así se logró la unificación de la afinación para todas las orquestas y también para toda la producción musical y para la industria de instrumentos musicales.

En 1955 la Organización Internacional de Normalización (ISO) quiso ampliar esa unificación de la afinación a todo el mundo, imponiendo como la norma universal de afinación $A=440\text{Hz}$, y a partir de ahí todos los instrumentos y toda la producción musical emplean esa afinación. Lamentablemente sus miembros desconocían las leyes de la física.

En este estudio emplearemos la afinación natural basándonos en los tubos del órgano como generadores del sonido. La afinación $A=440\text{Hz}$ resulta con números complicados con decimales y en cambio la afinación natural $A=432\text{Hz}$ usa números enteros simples, facilitando la comprensión del tema.

En el órgano tubular se da la afinación natural, pues la frecuencia depende de la longitud del tubo. Así un tubo de 8' (8 pies) produce una frecuencia de 64Hz equivalente a la nota C_2 , según se puede observar en la Tabla de Frecuencias en afinación $A=432$. En cambio en la afinación $A=440$ la frecuencia de C_2 es 65.406 Hz .

El Teclado:

El teclado del piano tiene 88 teclas que van desde A0 hasta C8.

Cada teclado manual del órgano va desde C2 hasta C7.

El teclado de 5 octavas de organeta o piano es igual al manual del órgano.

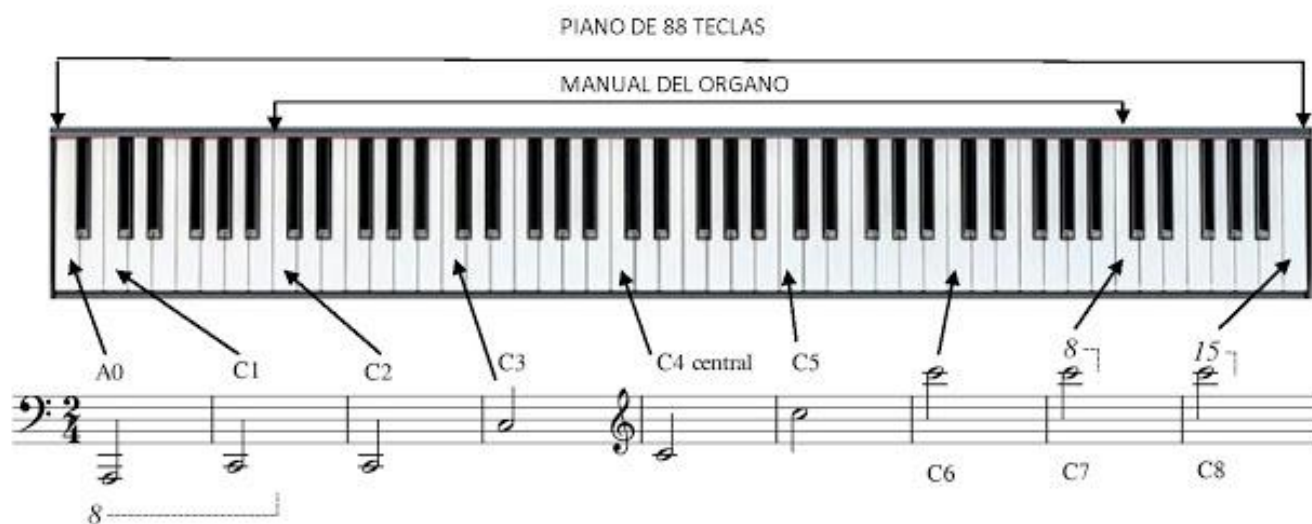


Tabla de frecuencias en afinación A=432:

| NOTA | FRECUENCIA | TUBO | MEDIDA cm |
|---------------------------------|--------------|--------|-----------|
| C ₀ | 16Hz | 32' | 975,36cm |
| C ₁ | 32Hz | 16' | 487,68cm |
| C ₂ | 64Hz | 8' | 243,84cm |
| C ₃ | 128Hz | 4' | 121,92 |
| C ₄ central | 256Hz | 2' | 60,96cm |
| C# ₄ Db ₄ | 272Hz | | |
| D ₄ | 288Hz | | |
| D# ₄ Eb ₄ | 304Hz | | |
| E ₄ | 324Hz | 1 3/5' | 48.77cm |
| F ₄ | 344Hz | | |
| F# ₄ Gb ₄ | 364Hz | | |
| G ₄ | 384Hz | 1 1/3' | 40.64cm |
| G# ₄ Ab ₄ | 408Hz | | |
| A ₄ | 432Hz | | |
| A# ₄ Bb ₄ | 456Hz | | |
| B ₄ | 488Hz | | |
| C ₅ | 512Hz | 1' | 30,48cm |
| C ₆ | 1024Hz | 1/2' | 15,24cm |
| C ₇ | 2048Hz | 1/4' | 7,62cm |
| C ₈ | 4096Hz | 1/8' | 3,81cm |
| C ₉ | 8192Hz | 1/16' | 1,90cm |
| C ₁₀ | 16384Hz | 1/32' | 0,95cm |

En esta tabla tenemos todas las frecuencias de C₀ a C₁₀ y la escala cromática central de C₄ a C₅.

Multiplicando por 2 una frecuencia, tendremos la frecuencia de la misma nota en una octava arriba.

Dividiendo por 2 una frecuencia tendremos la frecuencia de la misma nota una octava abajo.

En la tercera columna aparece el tubo que produce la nota.

Al doblar una frecuencia, suena la octava superior:

C₂ = 64Hz; C₃ = 128Hz; C₄ = 256Hz; C₅ = 512Hz; C₆ = 1024Hz; C₇ = 2048Hz; C₈ = 4096Hz; C₉ = 8192Hz y C₁₀ = 16384Hz en el límite de la audición humana, que muy pocos logran escuchar.

Al dividir por 2 una frecuencia suena la octava inferior:
C2 = 64Hz; C1 = 32Hz; C0 = 16Hz, en el límite inferior de la audición humana, que muy pocos logran escuchar.

Tocando la tecla más baja del manual del órgano (C2) con un registro de 8' suena un tubo de 8' con una frecuencia de 64Hz produciendo la nota C2.

Tocando esa misma tecla baja con un registro de 16' suena una frecuencia de 32Hz produciendo la nota C1.

Tocando esa misma tecla baja con un registro de 32' o con un tubo tapado de 16' se logra la frecuencia límite inferior de 16Hz, produciendo la nota C0, que muy pocas personas logran escuchar.

La nota más baja de la pedalera corresponde a C2, como en los manuales. Si se usan registros de 16' suena una octava abajo, o sea C1.

Tocando la tecla más alta del manual (C7) con un registro de 8' se produce una frecuencia de 2048Hz correspondiente a la nota C7.

Tocando esa misma tecla con un registro de 4' se produce una frecuencia de 4096Hz correspondiente a la nota C8.

Tocando esa misma tecla (C7) con un registro de 2' se produce una frecuencia de 8192Hz correspondiente a la nota C9.

Tocando la misma tecla (C7) con un registro de 1' se produce una frecuencia de 16384 correspondiente a la nota C10, el límite de las frecuencias audibles y que muy pocas personas alcanzan a escuchar.

Un órgano con registros de 32', 16', 8', 4', 2' y 1' es el único instrumento capaz de producir todas las frecuencias desde C0 hasta C10.

Cada registro tiene una medida de longitud, como **Flauta 8'**, e indica la medida del mayor de la hilera de tubos, que suena al tocar la tecla inferior del teclado. Así al combinar registros de **16' 8' 4' 2' y 1'** sonarán simultáneamente **C1, C2, C3, C4 y C5**, tocando únicamente la tecla inferior del teclado.

Frecuencias del piano en afinación A = 440

| | | | | | | | |
|---------|---------|-----------------|---------|-------------|---------|---------|---------|
| G#2/A#2 | 103,826 | G#4/A#4 | 415,305 | G#6/A#6 | 1661,22 | | |
| G2 | 97,998 | G4 | 391,995 | G6 | 1567,98 | | |
| F#2/G#2 | 92,498 | F#4/G#4 | 369,994 | F#6/G#6 | 1479,98 | | |
| F2 | 87,307 | F4 | 349,228 | F6 | 1396,91 | | |
| E2 | 82,407 | E4 | 329,628 | E6 | 1318,51 | | |
| D#2/E#2 | 77,782 | D#4/E#4 | 311,127 | D#6/E#6 | 1244,51 | | |
| D2 | 73,416 | D4 | 293,665 | D6 | 1174,66 | | |
| C#2/D#2 | 69,296 | C#4/D#4 | 277,183 | C#6/D#6 | 1108,73 | | |
| C2 | 65,406 | C4 (do central) | 261,626 | C6 | 1046,50 | C8 | 4186,01 |
| B1 | 61,735 | B3 | 246,942 | B5 | 987,767 | B7 | 3951,07 |
| A#1/B#1 | 58,270 | A#3/B#3 | 233,082 | A#5/B#5 | 932,328 | A#7/B#7 | 3729,31 |
| A1 | 55,000 | A3 | 220,000 | A5 | 880,000 | A7 | 3520,00 |
| G#1/A#1 | 51,913 | G#3/A#3 | 207,652 | G#5/A#5 | 830,609 | G#7/A#7 | 3322,44 |
| G1 | 48,999 | G3 | 195,998 | G5 | 783,991 | G7 | 3135,96 |
| F#1/G#1 | 46,249 | F#3/G#3 | 184,997 | F#5/G#5 | 739,989 | F#7/G#7 | 2959,96 |
| F1 | 43,654 | F3 | 174,614 | F5 | 698,456 | F7 | 2793,83 |
| E1 | 41,203 | E3 | 164,814 | E5 | 659,255 | E7 | 2637,02 |
| D#1/E#1 | 38,891 | D#3/E#3 | 155,563 | D#5/E#5 | 622,254 | D#7/E#7 | 2489,02 |
| D1 | 36,708 | D | 146,832 | D5 | 587,330 | D7 | 2349,32 |
| C#1/D#1 | 34,648 | C#3/D#3 | 138,591 | C#5/D#5 | 554,365 | C#7/D#7 | 2217,46 |
| C1 | 32,703 | C3 | 130,813 | C5 | 523,251 | C7 | 2093,00 |
| B0 | 30,868 | B2 | 123,471 | B4 | 493,883 | B6 | 1975,53 |
| A#0/B#0 | 29,135 | A#2/B#2 | 116,541 | A#4/B#4 | 466,164 | A#6/B#6 | 1864,66 |
| A0 | 27,500 | A2 | 110,000 | A4 (la 440) | 440,000 | A6 | 1760,00 |

Longitud de Onda (λ):

Un tubo produce una onda sonora con una longitud (de valle a valle o de cumbre a cumbre) equivalente al doble de la longitud del tubo, según la fórmula:

$\lambda = 2L$ donde L es la longitud del tubo.

Así un tubo de 8' produce una onda de 16' correspondientes a 487,68cm de longitud.

Al sonar el tubo resuenan en el mismo ondas de $\lambda/2$, $\lambda/3$, $\lambda/4$... hasta $\lambda/12$, produciendo el fenómeno de los Armónicos.

El mismo fenómeno de resonancia sucede al pulsar una cuerda.

Los Armónicos:

Los armónicos son múltiplos de la frecuencia de la nota fundamental, que resuenan al tocar una nota, conformando el timbre característico de cada instrumento o de cada voz humana.

Si tocamos una misma nota con distintos instrumentos, claramente podemos distinguir el sonido característico de cada uno, conformado por los armónicos que produce cada uno con su correspondiente volumen o amplitud de onda. El sonido más simple es el del diapasón que consiste en una onda sinusoidal.

Armónicos en tubo de órgano:

Si tocamos la tecla **C₂** con un registro de 8', suena la nota **C₂** y resuenan en diferentes amplitudes de onda (volumen) los armónicos **C₃ G₃ C₄ E₄ G₄ Bb₄ C₅ D₅ E₅ F#₅ G₅**

La nota **C₂** tiene una frecuencia de 64 Hertz producida por un tubo abierto de 8'. Al multiplicar esa frecuencia de la fundamental o primer armónico por 2 tendremos la frecuencia del 2º armónico **C₃**, por 3 la del 3º armónico **G₃**... y así sucesivamente.

Tabla de los armónicos:

| | | |
|---------------------------|----------------------------------|-------------|
| Fundamental o 1o armónico | C₂ | 64Hz |
| 2o armónico | C₃ | x 2 = 128Hz |
| 3o armónico | G₃ | x 3 = 192Hz |
| 4o armónico | C₄ | x 4 = 256Hz |
| 5o armónico | E₄ | x 5 = 320Hz |
| 6o armónico | G₄ | x 6 = 384Hz |
| 7o armónico | B_{b4} | x 7 = 448Hz |
| 8o armónico | C₅ | x 8 = 512Hz |
| 9o armónico | D₅ | x 9 = 576Hz |
| 10o armónico | E₅ | x10 = 640Hz |
| 11o armónico | F[#]₅ | x11 = 704Hz |
| 12o armónico | G₅ | x12 = 768Hz |

Pentagrama de los Armónicos:

Armónicos naturales

C₂ C₃ G₃ C₄ E₄ G₄ B_{b4} C₅ D₅ E₅ F[#]₅ G₅

arm.1 arm.2 arm.3 arm.4 arm.5 arm.6 arm.7 arm.8 arm.9 arm.10 arm.11 arm.12

En un tubo abierto suenan la fundamental y todos los armónicos, produciendo un sonido brillante y rico.

En cambio en el tubo cerrado suenan la fundamental y los armónicos impares, produciendo un sonido oscuro y disonante (C₂ G₃ E₄ B_{b4} D₅ F[#]₅) en una octava abajo.

Un registro de tubo cerrado como el Bordón da una mayor profundidad a la combinación de registros en el órgano.

En una hilera de tubos, el más grande produce la frecuencia más baja y el más pequeño produce la frecuencia más alta.

Los instrumentos de viento como el saxofón, la flauta, el oboe...etc. son tubos sonoros con longitud variable dependiendo de los orificios o llaves. Cuanto más cerca esté el orificio o llave de la boca, produce una nota más alta, y cuanto más lejos esté de la boca, produce una nota más baja.

Los Armónicos en una cuerda de guitarra:



En la guitarra se escuchan nítidamente los primeros 5 armónicos: Toquemos la sexta cuerda de la guitarra y escuchamos la nota fundamental **E³**, que es el **primer armónico**

Mientras suena ponemos el dedo suavemente en la mitad de la cuerda sobre el traste 12 y escuchamos la nota **E⁴**, el **2^o armónico**, una octava arriba. Al tocar suavemente la mitad de la cuerda se producen dos ondas con frecuencia doble

Al tocar suavemente la cuerda sobre el traste 7 en un tercio de la misma, oímos el **tercer armónico B⁴**, una 5^a sobre la 8^a produciendo 3 ondas con frecuencia triple.

Al tocar suavemente sobre el traste 5 escuchamos el **4^o armónico E⁵**, una doble octava arriba, produciendo 4 ondas con frecuencia cuádruple.

Tocando suavemente sobre el traste 9 encontramos el **5^o armónico G^{#5}**, una 3^a sobre la doble octava, produciendo 5 ondas con frecuencia quíntuple.

Esos mismos armónicos se encuentran deslizando suavemente el dedo sobre la cuerda, del traste 12/13 hacia adelante.

Armónicos en cuerda de Bajo:

Si dispone de un bajo haga el mismo ejercicio que en la guitarra:

Armónicos en cuerda de Bajo

E² E³ B³ E⁴ G^{#4}

arm.1 arm.2 arm.3 arm.4 arm.5

Los Armónicos en el Organo Hammond:



En 1934 Laurens Hammond inventó un sistema consistente en una serie de rueditas con diverso número de dientes, que al girar fijas a un eje, producen ondas electromagnéticas sinusoidales de distintas frecuencias, y mediante un amplificador se convierten en ondas sonoras.

En 1935 se comenzó la producción de los órganos Hammond. Así se logró crear el primer órgano portátil, reemplazando esa gran consola y todo ese sistema gigantesco de compresores de aire, poleas, electroimanes, y gigantescas filas de tubos de los órganos mecánicos tradicionales, por un sistema compacto de generación de tonos en un mueble portátil.

La octava de la izquierda con colores invertidos corresponde al juego de registros, donde cada tecla corresponde a una combinación preestablecida de armónicos (Presets), siendo A# y B en cada manual combinaciones libres que se registran con sus correspondientes juegos de barras armónicas.



Los registros son un sistema de barras que aparecen sobre el segundo teclado manual, que tienen 8 posiciones posibles, y que controlan los armónicos. Cada barra tiene un número X' equivalente a la medida del tubo en un órgano tubular.

Las barras blancas de número entero son armónicos de octava, y las negras de número fraccionario son armónicos de quinta o de tercera. Las barras café son subarmónicos, que bajan una octava, abriendo así un mayor espacio para los armónicos altos.

Así son infinitas las posibilidades de combinación de armónicos para simular cualquier timbre sonoro.

Las barritas armónicas del órgano Hammond:

| Tocando siempre la tecla más baja (C2) del manual. | | | |
|---------------------------------------------------------|-------------|----------------|----------------------------|
| BARRA | ARMONICO | NOTA | |
| 8' | 1o | C2 | Nota fundamental |
| 4' | 2o | C3 | octava arriba |
| 2 2/3' | 3o | G3 | 5a sobre 8a |
| 2' | 4o | C4 | doble octava |
| 1 3/5' | 5o | E4 | 3a sobre doble octava |
| 1 1/3' | 6o | G4 | 5a sobre doble octava |
| 1' | 8o | C5 | triple octava |
| mix I | 7o, 9o | Bb4, D5 | Mixtura I |
| mix II | 9o, 11o | D5, F#5 | Mixtura II |
| 16' | Subarmónico | C1 | octava bajo la fundamental |
| 5 1/3' | Subarmónico | G2 | quinta sobre fundamental |
| Los subarmónicos dan una mayor profundidad al registro. | | | |

Los Registros en el órgano tubular:

En el órgano de tubos cada registro tiene su propio espectro de armónicos, y así se simulan físicamente los sonidos reales de instrumentos de viento y de cuerda, mediante variedad de tubos abiertos o cerrados, de madera, o cobre, o bronce, o estaño u otros materiales, cilíndricos, cuadrados o cónicos, de embocadura labial o de lengüeta.

Los registros de flautados producen ondas sinusoidales que pueden reforzarse con armónicos añadidos a voluntad del músico para crear sonoridades más complejas. A medida que un tubo es más pequeño, produce una mayor frecuencia, o sea un sonido más alto.



Ver el blog [Fundamentos Físicos del Sonido](#)

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

