

EL RINCÓN DE LAS AFICIONES

APORTE DE LOS FÍSICOS AL DESARROLLO DE LA MÚSICA

El nacimiento de la Física como Ciencia coincide con el comienzo de un tratamiento científico de la música. Haremos referencia a muchos físicos notables muy reconocidos por su contribución al desarrollo de la Física, elemento que prácticamente no tocamos, ya que sus respectivos aportes a la misma son ampliamente divulgados, incluso en los trabajos sobre Historia de la Física y en las enciclopedias. Por ello nos referiremos sucintamente a lo que hicieron en función del desarrollo de la música. Es a través de sus aportes al respecto, desde Galileo hasta otros en los días de hoy, que se puede tener una mejor idea de cómo se ha ido produciendo el enriquecimiento de las bases científicas de la música. Por un problema de espacio no incluimos los importantes antecedentes de la antigua Grecia. Por ejemplo, Pitágoras pasó a la historia como el primero que cuantificó los intervalos musicales en una cuerda tensada musical. Tampoco mencionamos algunos músicos y artesanos de

instrumentos musicales, estudiosos de aspectos físicos y matemáticos de la música, que también hicieron aportes al respecto. El objetivo específico del trabajo es que el lector descubra nuevas facetas sobre el papel jugado por los físicos en el desarrollo de la música.

GALILEO GALILEI (1564-1642). Con el Renacimiento comenzó la alegría de vivir, se dispararon las artes y las ciencias. Es conocido que con Galileo comenzó realmente la Física como ciencia, pero es menos conocido que también con Galileo comenzaron los primeros tratamientos científicos del sonido, de la música y del estudio moderno de las ondas y la acústica. Galileo elevó a nivel de ciencia el estudio de las vibraciones y de la correlación entre la altura o tono y la frecuencia de la fuente del sonido (relación entre frecuencia, longitud, diámetro, densidad y tensión de las cuerdas). Su interés por la música se debe a su padre Vincenzo Galilei, matemático, cantante, músico, compositor, teórico de la música, de reconocida reputación histórica. Después de Galileo, el conocimiento científico acústico de la música tuvo un rápido desarrollo.

SIMON STEVIN (1548-1620). Físico matemático belga. Inspirado por Vincenzo Galilei fue el primero en 1585, simultánea e independientemente con Chu Tsai-Yu en China, en dar una especificación del temperamento (valores de los intervalos de relaciones de frecuencia dentro de una octava de la escala musical).

MARTIN MERSENNE (1588-1648). Físico-matemático francés, estudió las vibraciones en las cuerdas; sus resultados se plasman en las tres leyes de Mersenne, publicadas en 1636 y que comenzaron a formar la base de la acústica musical. Calculó los intervalos del temperamento igual de la escala musical, en que todos los intervalos musicales de la octava (cociente de dos frecuencias contiguas) tienen el mismo valor, dando una función exponencial, que realmente empezó a generalizarse su aplicación mucho después con el clave bien temperado de Bach. También hizo una primitiva medición de la velocidad del sonido en el aire. Actualmente disponemos de un buen conocimiento de los instrumentos de la época gracias a su descripción en su publicación *La armonía universal*.

Con Galileo y con Mersenne quedó establecida la dependencia de la frecuencia de una cuerda vibrante de la tensión, de



la longitud y de la densidad lineal de la cuerda tensada. Lo que en términos actuales (no de aquella época) se define como:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

donde T es la tensión en newton, L la longitud de la cuerda en metros y μ , la masa por unidad de longitud en kg/m.

EVANGELISTA TORRICELLI (1608-1647) y BLAISE PASCAL (1623-1662). El primero en 1643 y Pascal posteriormente midieron la presión atmosférica, pero aún se estaba muy lejos de que se determinara que el sonido se propagaba en el aire gracias a una onda de fluctuación de la presión atmosférica. En el siglo XVII todavía muchos científicos y filósofos creían que el sonido se propagaba a través de unas partículas invisibles que se originaban en la fuente del sonido y se movían en el espacio hasta el oído.

El concepto de sonido como una onda estaba destinado a cambiar completamente el cuadro anterior, pero había que demostrarlo experimentalmente.

OTTO VON GUERICKE (1602-1686). En 1650 este físico alemán inventó la bomba para crear vacío parcial. Realizó los primeros estudios que revelaron que la luz viajaba en el vacío pero el sonido no.

ROBERT BOYLE (1627-1691). En 1660 el científico anglo-irlandés Boyle mejoró la tecnología de vacío y pudo observar como la intensidad del sonido originado por un timbre colocado en una campana neumática disminuía a medida que el aire era extraído. Boyle concluyó que un medio como el aire era necesario para la propagación de las ondas sonoras. Aunque la conclusión es correcta, hay una imprecisión en la interpretación del experimento. No obstante, quedó establecido que el sonido se propaga más como una onda que como un flujo de partículas. La imprecisión se debe a que aún en las actuales bombas mecánicas de vacío, el remanente de aire es suficiente para la propagación de la onda sonora. En realidad, la disminución de la densidad del aire hace que la vibración del timbre se va tornando incapaz de transmitirse al aire. El problema es de acoplamiento de impedancia por diferencia de las densidades entre el aire y el material sólido del timbre que vibra, o sea,

que primero desaparece la transmisión de las vibraciones en la interfase sólido-aire. Para vacíos más altos la interpretación de que desaparece la propagación es correcta.

RENÉ DESCARTES (1596-1650). Famoso filósofo-físico-matemático francés. Uno de los padres del pensamiento moderno. Escribió el *Compendium musicae* latino, uno de los escritos más notables de su tiempo sobre el tema. En su correspondencia hay frecuentes referencias a la música.

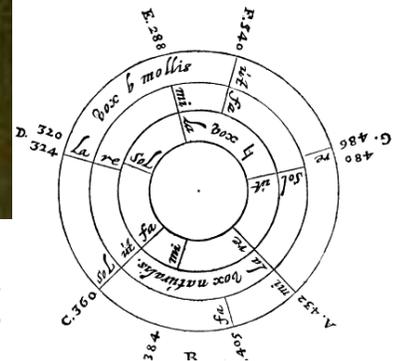


Diagrama circular de tonos en el *Compendium Musicae* de René Descartes (1650).

JOHN WALLIS (1616-1703). Este físico matemático inglés investigó con éxito las leyes de las colisiones entre los cuerpos, publicó el artículo *Of the Trembling of Consonant Stings*, en el que analizó el comportamiento de las vibraciones de los parciales superiores (armónicos).

Una vez reconocido que el sonido era una onda, la medición de su velocidad se convirtió en un importante objetivo.

GIOVANNI ALFONSO BORELLI (1608-1679) y VINCENZO VIVIANI (1622-1703). Físicos italianos que en 1650 obtuvieron un buen valor de la velocidad del sonido, 350 m/s. Por ser de amplio dominio, en este artículo no es necesario describir los grandes resultados obtenidos en la Física por los notables físicos que se mencionan, no obstante, en ocasiones, haremos alusión a los aportes a la Física de algunos de ellos, que a pesar de ser también notables se divulgan menos. Por ejemplo, Borelli realizó trabajos de Física y Astronomía, incluyendo la publicación en 1666 un tratado sobre la influencia de la atracción de los satélites de Júpiter. También fue el primero en sugerir la trayectoria parabólica de los cometas.

CHRISTIAN HUYGENS (1629-1695). Físico holandés, antes de 1661 elaboró un elegante método para calcular las longitudes de las cuerdas para cualquier afinación de la escala que fue aplicado a la escala del tono medio (escala musical que predominó por más de 200 años). Aplicó los logaritmos en el cálculo de las longitudes de las cuerdas y de las dimensiones de los intervalos musicales. Planteó la posible naturaleza consonante (concepción antigua de intervalo musical más agradable) de los intervalos divididos por 7, como $4/7$ y $5/7$, mostrando que eran aproximaciones de la sexta aumentada y de la cuarta aumentada respectivamente en la escala del tono medio y en la del temperamento igual de 31 notas. Demostró la estrecha relación entre las escalas del tono medio y la del temperamento igual. Describió la escala de 31 tonos en su *Leerte touchant le cycle harmonique* (Rotterdam, 1691) y *Novus cyclus harmonicus* (Leiden, 1724).

ROBERT HOOKE (1635-1703). Este notable físico inglés fue empleado por Boyle para construir las bombas de vacío. Cinco años después formulaba su famosa ley sobre la elasticidad de los cuerpos. En 1681 fue el primero en demostrar experimentalmente que la altura o tono que percibimos como sensación auditiva de sonidos graves a agudos está directamente relacionada con la frecuencia de las vibraciones que origina la fuente de sonido. Se basó en que la frecuencia del sonido que produce un cartón golpeado por una rueda dentada girando a velocidad constante produce la sensación de la altura de una nota determinada; al aumentar o disminuir la velocidad angular de la rueda dentada se producen sonidos más agudos o más graves, respectivamente. De esta forma quedó demostrada la relación directa y objetiva existente entre el estímulo (la frecuencia del sonido) y la sensación (la altura o nota del sonido).

JOSEPH SAUVEUR (1653-1716). Este físico francés a finales del siglo XVII y principios del XVIII realizó estudios detallados sobre la relación entre frecuencia y altura (tono), también sobre las ondas en cuerdas tensadas. Fue el primero en sugerir una explicación física de la disonancia (concepto antiguo de sonido desagradable) en la música. Promovió la aceptación del término "acústica" y fue quien sugirió oficializar este nombre para el estudio del sonido. Propuso fijar como frecuencia de referencia en la escala musical (o sea calibrar), la nota DO con una frecuencia $f = 256$ Hz, que se conoce como "escala científica" en que las frecuencias son función exponencial de 2. Dicha escala

se sigue utilizando en la actualidad en función de investigaciones científicas de la música por su comodidad.

ISAAC NEWTON (1643-1727). Fue el primero en realizar un tratamiento matemático del sonido (en sus *Principia*, 1687), posterior a la demostración de que la propagación del sonido a través de cualquier fluido sólo dependía de propiedades físicas (elasticidad, densidad). También calculó, a partir de consideraciones teóricas, la velocidad del sonido en el aire.

GOTTFRIED WILHELM LEIBNITZ (1646-1716). Lo traemos a colación ya que, independientemente de Newton, desarrolló la teoría del cálculo matemático, lo que posteriormente permitió a otros notables utilizar el cálculo diferencial en el tratamiento de las vibraciones y las ondas.



Sir Isaac Newton
(izquierda).



Gottfried Wilhelm
Leibnitz (derecha).

Mientras tanto, en 1738 se obtuvo en la Academia de Ciencias en París un valor más preciso de la velocidad del sonido en el aire: 332 m/s, increíblemente bueno teniendo en cuenta las herramientas rudimentarias de la época. Compárese con la última medición que en 1986 dio el valor de 331,29 m/s a 0°C.

Simultáneamente con todos los estudios previos en el mundo del sonido, los teóricos fueron desarrollando la teoría matemática de las ondas, elemento indispensable requerido para el desarrollo de la Física moderna, incluyendo la Acústica y, dentro de ésta, la Música. A la teoría mecánica de las ondas y de las vibraciones sonoras hicieron aportaciones los siguientes científicos: JOHAN BERNOULLI (1667-1748), BROOK TAYLOR (1685-1731), DANIEL BERNOULLI (1700-1782), LEONHARD EULER (1707-1783), JEAN LE ROND D'ALEMBERT (1717-1783), JOSEPH-LOUIS LAGRANGE (1736-18139), SOPHIE GERMAIN (1776-1831) y SIMÉON-DENIS POISSON (1781-1840). La mayoría de ellos hicieron también aportaciones más específicas relacionadas con la música, como por ejemplo:

BROOK TAYLOR, quien e 1708 desarrolló la teoría matemática de las cuerdas vibrantes en concordancia con las observaciones experimentales previas. Fue el primero en expresar

VOLT (1745-1827). En 1800 trató de estimular eléctricamente la sensación de la audición conectando una pila a dos varillas metálicas que introdujo en sus oídos. Describió que sintió como “una sacudida en su cabeza”, y que poco después oyera “un ruido semejante al de una sopa espesa de hervir”. Fue tan desagradable que Volt no repitió el experimento ni siguió con esta investigación, por lo que la anécdota se refiere solo a su interés por el tema.

JEAN-BAPTISTE BIOT (1775-1862), físico francés, dirigió los trabajos para la determinación de la velocidad del sonido en sólidos.

FÉLIX SAVART (1791-1841), físico francés, continuó los trabajos de Hooke y perfeccionó la técnica de determinación de la frecuencia del sonido por la rotación de una rueda dentada, conocido hoy como disco de Savart. Realizó importantes estudios sobre los intervalos musicales e inclusive existe una unidad de intervalo musical llamada Savart.

JOSEPH HENRY (1797-1878). En 1856 fue el primero que incursionó teóricamente en los problemas acústicos de recintos cerrados, aunque no fue hasta finales del siglo XIX que se dio el paso más importante al respecto.

JEAN-BAPTISTE-JOSEPH FOURIER (1768-1830), físico-matemático francés, desarrolló la teoría sobre el análisis (descomposición) de una onda compleja periódica en sus componentes espectrales (armónicos). Lo contrario al análisis de Fourier constituye componer la señal a partir de la superposición de distintos armónicos, lo que se denomina síntesis de Fourier, de ahí el nombre de los sintetizadores de sonidos en la música. Fourier, sin proponérselo explícitamente, hizo uno de los aportes más significativos en la comprensión física del sonido y del timbre musical.

GEORG SIMON OHM (1787-1854), físico alemán, aplicó el análisis de Fourier al proceso de la audición; fue el primero en sugerir que el oído es sensible a las componentes espectrales. También planteó que el oído era sensible a las amplitudes y no a las fases de los armónicos de un tono complejo, lo que constituye una de las leyes más importantes del sonido y de la música, conocida como Ley de Ohm de la audición, que no tiene que ver con su muy famosa ley de Ohm eléctrica.

Sir CHARLES WHEATSTONE (1802-1875), el del famoso puente de resistencias que lleva su nombre, de familia fabricante de instrumentos musicales. Inventó la concertina, un acordeón perfeccionado de gran extensión mundial. En 1836 intentó mantener la duración del sonido del piano con vibraciones forzadas por medio del paso de aire a través de una abertura en el extremo de la cuerda luego de retirado el martillo.

ESCALA Y AFINACIÓN MUSICALES

Vimos la escala científica propuesta por Saveur. En 1834 el físico alemán Scheibler propuso fijar la altura (tono) de referencia de la escala musical a partir de la nota LA con una frecuencia de 440 Hz. En 1859 una comisión gubernamental francesa, asesorada por Lissajous, definió el estándar legal para la nota LA en 435 Hz. En 1936, la American Standards Association adoptó la Escala a partir de LA en 440 Hz, que se generalizó en 1939 en Conferencia Internacional.

En el siglo XIX comienzan los estudios científicos sobre el controvertido problema estímulo-sensación.

GUSTAVO TEODORO FECHNER (1801-1887), físico alemán sumamente interesante. Como no es muy conocido por los físicos veamos algunos de sus aportes a la Física. Fue el primero en plantear en 1845 una teoría electrónica de la inducción electromagnética, desarrollada ulteriormente por Weber y Faraday. También el primero en plantear que la corriente eléctrica era el producto del movimiento de cargas eléctricas discretas. Ya en 1855 dijo “La teoría ondulatoria es un momento necesario de la Física, la atomística es un momento necesario de la teoría ondulatoria”. Sin embargo, sí es conocido como el padre de la psicofísica, ciencia que trata sobre las relaciones cuantitativas entre el estímulo físico objetivo y la sensación subjetiva del hombre al respecto. Por ejemplo, desarrolló las expresiones sobre la diferencia mínima perceptible de dos frecuencias al acercarse hasta confundirse la sensación en una sola frecuencia, algo similar con la sonoridad (amplitud) de la onda sonora (JND- just noticeable difference) que puede ser discriminada por el oído, conocida como Ley de Fechner. Más recientemente, en el marco de esta ciencia, se precisaron mejor estas relaciones cuantitativas entre estímulo-sensación.

LUDWIG FERDINANDO HERMANN HELMHOLTZ (1821-1894), famoso físico alemán y posiblemente el más conocido

por los musicólogos. Dio por primera vez una explicación científica de la consonancia, el timbre, la naturaleza de las vocales y otros muchos aspectos físicos de la música. Contribuyó notablemente a la comprensión del mecanismo de la audición y la psicofísica del sonido musical. Su libro *Sensaciones del tono* (1863) es un súper clásico de la teoría de la música [12], uno de los más leídos que continua inclusive editándose. Sus trabajos marcan una profundización en el estudio científico moderno de los fenómenos musicales.

KARL RUDOLPH KOENIG (1832-1901), físico prusiano, fue un creativo experimentador que diseñó en el siglo XIX muchos de los instrumentos utilizados para las investigaciones en audición y en música.

AUGUSTO KUNDT (1839-1894) desarrolló un número importante de técnicas para la investigación de las ondas sonoras, incluyendo el conocido tubo que lleva su nombre, donde en forma sencilla se ve la formación de la onda estacionaria que se establece por las huellas de arena fina suelta dentro del tubo de cristal.

JON WILLIAM STRUTT RAYLEIGH (1842-1919), físico inglés, Premio Nobel de Física en 1904 por sus investigaciones sobre las densidades de los gases más importantes y por su descubrimiento del argón. Realizó una enorme variedad de investigaciones acústicas, muchas de ellas incluidas en sus dos tomos del tratado *Teoría del Sonido* que publicó en 1877-78, monumento mayor de la literatura sobre acústica. Realizó trabajos básicos sobre la propagación de las ondas sonoras en gases, fluidos y sólidos y sobre los fenómenos de vibración y resonancia. Su importante reflexión sobre la audición binaural fue la base del desarrollo ulterior del sonido estereofónico.

HERMANN WALTHER NERNST (1864-1941), considerado el padre de la físico-química moderna. Recibió el Premio Nobel de Química en 1920. Fue uno de los principales iniciadores de los pianos eléctricos y sus principios fueron aplicados a toda una serie de instrumentos de este tipo. El piano neo-Bechstein o Siemens-Bechstein, desarrollado bajo su dirección, se presentó en 1931, similar al piano, sin tabla resonante y con martillos de menor fuerza. Las vibraciones se recogen por electroimanes, se amplifican electrónicamente y se transforman de nuevo en ondas sonoras por altoparlantes. Entre otras facilidades, se puede

ajustar a voluntad el timbre por medio de condensadores variables. El perfeccionamiento ulterior de este piano siguió también bajo su dirección.

WALLACE SABINE (1868-1919), físico norteamericano, considerado el padre de la arquitectura acústica moderna. En 1895 descubrió que el producto del tiempo de reverberación multiplicado por la absorción total del local es proporcional al volumen del local, conocido como Ley de Sabine, y la unidad de absorción del sonido es el sabine. La primera aplicación fue realizada en el Boston Symphony Hall, inaugurado en 1900. Constituyó un gran éxito acústico.

LEE DE FOREST (1873-1961), físico norteamericano, en 1906 puso una rejilla al diodo, inventó el tríodo y gracias a ello nace el amplificador electrónico. Alrededor del 1911, después de distintos perfeccionamientos tecnológicos, nace la electrónica práctica que, como veremos más adelante, tuvo un papel revolucionario en la música.

Para los nuevos instrumentos musicales el tríodo daba perspectivas sin precedentes, debido, por un lado, a la posibilidad de amplificar la señal y, por el otro, a que los circuitos osciladores, sobre todo a partir del heterodino en 1917, eran capaces de replicar cada armónico del espectro musical, para sintetizarlos posteriormente y simular así en principio cualquier timbre.

GUGLIELMO MARCONI (1874-1937), físico italiano, inventor de un exitoso sistema de radio-telegrafía en 1896, por lo que recibió el Premio Nobel de Física en 1909. Posteriormente trabajó en el desarrollo de las comunicaciones de longitudes de onda más cortas, base de las modernas comunicaciones a largas distancias.

Haremos una pausa del tema electromagnético, para preguntarnos ¿cómo era la calidad del sonido en las salas de teatro y en otros locales? Ya referimos que JOSEPH Henry incursionó en esta temática.

Sir CHANDRASEKHARA VENATA RAMAN (1888-1970), físico indio, recibió el Premio Nobel de Física en 1930 por su trabajo sobre la dispersión de la luz y por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre. Desarrolló una teoría descriptiva, publicada en 1918, sobre el movimiento de la cuerda frotada por arco

de los instrumentos musicales de cuerda (violín, viola, celo,...), cuyo comportamiento vibracional es no lineal [15]. Publicó estudios sobre tambores de la India en 1934.

El número de físicos trabajando en temas relacionados con la música fue creciendo, aspecto que no vamos abordar en este artículo por razones de tiempo y espacio, sólo mencionaremos algunos muy específicos.

LEV SERGEYEVICH THEREMIN (1896-1993), físico ruso, inventó en 1920 uno de los primeros instrumentos electrónicos con circuitos osciladores de válvulas y filtros, considerado el primer sintetizador de sonidos musicales. Se ejecuta sin contacto directo de las manos, sino por medio de la inducción electromagnética, mediante el cambio de la capacitancia entre las manos y las antenas del instrumento. Se mostró a Lenin en 1922 y a Einstein en 1927. Theremin fue honrado en el festival de música electrónica en Francia en 1989 y en la Universidad de Stanford en 1991. Su instrumento ha sido utilizado en la música de muchos filmes de ciencia ficción, en grabaciones de grupos, como el de Rock de EE.UU., Beach Boys.



Lev Sergeyevich Theremin.

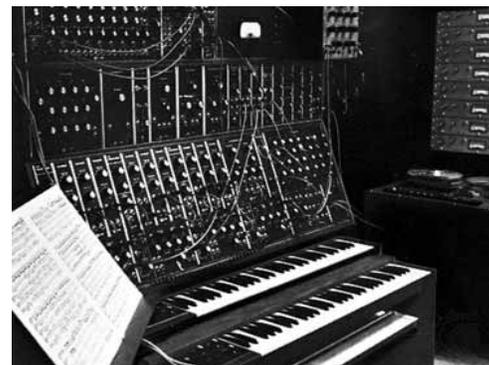
GEORG VON BEKESY (1899-1972), físico húngaro-norteamericano, demostró cómo se propaga, resuena y analizan las componentes espectrales de la onda sonora en el espacio de la conocida membrana basilar del oído interno. Recibió el Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1961 por su descubrimiento sobre el significado físico de cómo el sonido es analizado y

convertido en señales eléctricas dentro del oído interno, que se comporta como un analizador espectral. Su libro *Experiments in Hearing*, publicado en 1960, es la obra magna sobre la teoría del oído [14].

Hacia 1949 se descubre el efecto transistor, con gran impacto en el desarrollo de la electrónica, por los conocidos físicos norteamericanos BARDEEN (1908-1991), BRITAIN (1902-1987) y SCHOKLEY (1910-1989), por lo que recibieron el Premio Nobel de Física en 1956. A partir de entonces se desarrollaron rápidamente los circuitos transistorizados, los instrumentos musicales electrónicos y los equipos de grabación, reproducción y transmisión. Se perfeccionó el sintetizador, aunque todavía de grandes dimensiones.

WERNER MEYER-EPPLER (1913-1960), físico alemán, Director del Instituto de Fonética de la Universidad de Bonn. A finales de la década de los años 1940 presentó el Vocoder, dispositivo que conseguía sintetizar la voz humana.

ROBERT MOOG (1934-2005), físico norteamericano, fue el primero en diseñar varios tipos de sintetizadores compactos de precio moderado que suministraban un extenso rango de manipulación del sonido. El Polymoog, que apareció en 1976, podía producir acordes musicales. Era la época en que comenzaron a producirse sintetizadores compactos por varias empresas importantes (Roland, Yamaha, etc.).



Robert Moog y su sintetizador (1964).



Además del aporte al desarrollo científico y tecnológico de la música, a los físicos, al igual que a todos, nos gusta oír, apreciar, cantar, bailar, ejecutar y, a algunos, hasta componer música. Podemos citar a notables físicos aficionados a tocar algún instrumento, por ejemplo: MAX Plank (1858-1947), Premio Nobel en 1918, tocaba el piano, RICHARD Feynman (1918-1988), Premio Nobel en 1965, tocaba la tumbadora y los bongoes, y ALBERT Einstein (1879-1955), Premio Nobel en 1921, tocaba el violín.



Richard Feynman.



Albert Einstein.

Es imposible hacer referencia aquí a todos los físicos relacionados con esta temática. Hemos indicado más de cuarenta enmarcados en tres siglos. En el siglo XX, cientos de físicos se dedicaron a estudios multifacéticos de la música, recogidos en cientos de artículos científicos, decenas de libros y monografías. Este comportamiento continúa en el siglo XXI.

Actualmente, el problema tecnológico continúa jugando un enorme papel pero, sin duda, sobre la base de los innumerables aportes científico-técnicos referidos en este trabajo, además del aporte realizado por físicos para el desarrollo alcanzado en aspectos teóricos de la música.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sir James Jeans: *Science and Music*. Cambridge University Press, London, 1953.
2. Alexander Wood: *The Physics of music*. Methuen & Co., 6th edition, London, 1964.
3. Stevens, S. & Warshofsky, F.: *Sonido y Audición*. Colección científica de Time-Life, Time Inc., Offset Multicolor SA, México DF, 1971.
4. Askill, J.: *Physics of Musical Sound*. D.Van Nostrand Co., New York, 1979.
5. Velázquez, G.O.: *100 Biografías en la Historia de la Música*. IPN, México, 1966.
6. Scholes, P.A.: *Diccionario Oxford de la Música*. Editorial Arte y Literatura. La Habana, 1981.
7. Projorov, A.M. (Redactor principal): *Diccionario enciclopédico de Física*. Ediciones "Enciclopedia Sovietica", Moscú, 1983.
8. Magie, W.F.: *A Source Book in Physics*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1969.
9. Spasski, B.I.: *Historia de la Física* (en ruso), Universidad de Moscú, 1963.
10. *Enciclopedia Encarta* 2006.
11. *Enciclopedia Británica* 2005.
12. Helmholtz, H.L.F.: *On the Sensation of Tone*. Dover Publications, INC., New York, 1954.
13. Stolik, D.: Textos del Curso "Fundamentos físicos y tecnológicos de la música". Facultad de Física, Universidad de la Habana, Cuba, 2004.
14. Bekesy, G.: *Experiments in Hearing*. McGraw-Hill, 1960.
15. Massman, H. y Ferrer, R.: *Instrumentos Musicales*. Dolmen Ediciones, Chile, 1997.

Daniel Stolik

Facultad de Física
Universidad de La Habana (Cuba)