

EL APORTE DE LOS FÍSICOS AL DESARROLLO DE LA MÚSICA

Daniel Stolik, Facultad de Física, Instituto de Materiales y Reactivos para La Electrónica (IMRE), Universidad de La Habana

RESUMEN

Este trabajo está dirigido a reconocer el aporte hecho por los físicos en el desarrollo de la música, en saludo al año Internacional de la Física. Es altamente conocido el papel que ha jugado la física en la comprensión del universo, los fenómenos naturales y el desarrollo de la tecnología. Sin embargo su influencia en el desarrollo de la cultura y el arte, incluyendo la música es menos conocida. En este trabajo se describe cuando comienza y como se desarrolla un tratamiento de los fundamentos científicos del sonido y la música, proceso en el que notables físicos, reconocidos por su contribución a la formación de la física como ciencia, hicieron aportes fundamentales. Se parte de la reflexión de que la música tiene una base objetiva, que obedece a leyes naturales físicas. Se destaca el hecho de que con Galileo, además de comenzar la física como ciencia, también comienza el análisis y la comprensión científica de la música. En el artículo se destacan los aportes más importantes de los físicos al respecto hasta la aparición de los sintetizadores y las nuevas tecnologías en el siglo XX.

ABSTRACT

This work is devoted to recognize the contribution made by the physicists to the development of the music, in greeting to the: International Year of Physics. It is very well-known the role played by Physics in the understanding of the universe, the natural phenomena and the development of technology. Less well-known is their influence in the development of the culture and the art, including the music. Specifically this work describes the beginning of a treatment of the scientific basis of the sound and music. Many physicists, who are recognized by its contribution to the formation of the physics as a science, made fundamental contributions to music. I started from the point of view that the music has an objective base and obeys natural laws of the physics. It is very interesting the fact that with Galilean, not only began the physics as science, also began the scientific understanding of the music. In this respect we remark the contributions made by very important physicists, until the appearance of the synthesizers and the new technologies in the XX century.

1. BASE OBJETIVA DE LA MÚSICA

Antes de abordar el tema del título de este artículo es conveniente analizar algunos aspectos, por ejemplo: ¿Cuál es el límite del radio de acción entre la ciencia y el arte?, tema muy polémico en el que existen muchos criterios e interpretaciones distintas, por lo que trataremos de reforzar aquellos elementos que pueden revelarse como más evidentes; en este sentido creo que no habría dudas en reconocer la importancia de utilizar los métodos físicos cuantitativos para comprender el significado de los sonidos, las escalas, los instrumentos y cualquier otro aspecto constitutivo de la música, pero no sólo con el propósito de entenderla y explicarla científicamente, sino también de enriquecerla tecnológicamente e inclusive musicalmente. En realidad, aun hoy en día existen conductas extremas: músicos que no quieren saber de tecnologías, tecnólogos que desdeñan la música como arte, musicólogos que ignoran muchos aspectos científico-técnicos de la música, profesores de física de los distintos niveles de educación (incluyendo escuelas de arte) que ejemplifican poco con el comportamiento físico de la música, sonidistas de experiencia práctica pero con poca base científico-técnica de los fenómenos ligados al sonido, constructores de instrumentos musicales que se guían solamente por manuales y tablas pero

con poco conocimiento del porque físico de los propios instrumentos que construyen. Soy del criterio que hay que: a) poseer una mente abierta a la diversidad musical en términos de géneros, timbres, escalas, consonancias, etc.; b) reconocer la tremenda importancia de las manifestaciones sensoriales, ligadas a los sentimientos y espíritu humanos; c.) entender las bases objetivas científico-técnicas que la soportan. Sobre este último particular baste recordar lo siguiente:

- La mayoría de los instrumentos musicales son invenciones técnicas del hombre (sea violín, piano, etc.).
- La formación, propagación y detección del sonido son fenómenos físicos estudiados y conocidos que se cuantifican matemáticamente.
- La señal sonora se transforma y manipula eléctricamente a voluntad del hombre.
- Se estudia científicamente la relación existente entre las sensaciones y los estímulos por la Psicofísica.
- Las tecnologías aplicadas a la música, incluyendo la electrónica, se desarrollan impetuosamente y se aplican con un alto grado de digitalización y computarización.

Por último, la duración de las etapas con que han ido introduciéndose las tecnologías, que también han influido en el desarrollo de la música, se ha reducido espectacularmente, por ejemplo:

- Los instrumentos musicales surgieron hace miles de años.
- La ciencia física y las matemáticas modernas surgieron hace unos 400 años.
- Las tecnologías electrónicas hace alrededor de 100 años.
- La electrónica integrada hace unos 40 años.
- La tecnología MIDI (interfase digital de instrumentos musicales) hace 20 años.
- Las nuevas tecnologías continúan incorporándose con una velocidad impresionante.

2. ¿CUÁNDO Y CÓMO ENTRÓ LA MÚSICA A FORMAR PARTE DE LA VIDA DEL HOMBRE?

Aunque no está muy claro, se supone que en la inflexión del habla están los antecedentes del canto, que en la necesidad de comunicarse a grandes distancias por medio de la percusión está el origen de la sensación del ritmo por el hombre primitivo y que posiblemente en factores tales como el golpe en la cuerda del arco de caza o el silbido provocado por el sople del viento en la caña hueca está el descubrimiento del placer por elementos de la música tonal (1). Existen claras evidencias de la existencia de instrumentos en la antigua Mesopotamia, liras de más de 5000 años en Ur, bandas de músicos sumerios de hace 4600 años, también en Egipto, por ejemplo, orquestas con instrumentos de cuerda y viento de hace 4000 años (1), (2), (3). Hasta hace relativamente poco tiempo se entendía que en unos 10000 años podrían ubicarse las primeras flautas de un solo tono, sin embargo un hallazgo de 1995 parece indicar la existencia de una flauta hecha de un hueso de oso joven de 4 notas de hace más de 40000 años (4), de la época del hombre de Neandertal, del que se pensaba no poseía cultura musical alguna. Lo que en cualquier variante nuestro sentido común nos indica, es que la aparición de la música y de los primeros instrumentos musicales primitivos fue producto de un proceso extremadamente lento. Particularmente la música alcanza una gran diseminación de forma muy arraigada en la sociedad de la antigua Grecia (5).

3. LA MÚSICA EN LA ANTIGUA GRECIA Y PITÁGORAS

Una figura real del siglo VIII a.n.e., anterior a Pitágoras fue Terpandro, quien se considera el creador de la música griega clásica y posiblemente también de las siete notas diatónicas (6). Ganó los concursos de música celebrados en los 26 juegos olímpicos en Esparta, Año 676 a.n.e., o sea hace

unos 2800 años (en esa época también se competía en música en las olimpiadas).

Pitágoras (580-500 a.n.e.) ha tenido una trascendencia en la cuantificación de los intervalos musicales, aunque existe confusión de adjudicarle el descubrimiento de los intervalos de quinta y cuarta, ya que en realidad Terpandro, muy anteriormente los manejaba con los nombres griegos correspondientes de la época. Realmente lo que los Pitagóricos le adjudican a Pitágoras fue la formación inicial de la famosa escala Pitagórica que subsiste hasta nuestros días y más específicamente la definición de que si se disminuye a la mitad la longitud de una cuerda obtenemos el intervalo de octava, si se disminuye a $\frac{2}{3}$ obtenemos el de quinta, si se disminuye a $\frac{3}{4}$ obtenemos el de cuarta y que el intervalo entre la 4a y la 5a es un tono pitagórico igual a un $\frac{9}{8}$. Es muy interesante el papel que jugó la música en la antigua Grecia, aspecto que no abordaremos por su extensión, solo mencionaremos a Aristóteles (384-322 a.n.e.), quien ya sugería que el sonido se propagaba a través del movimiento del aire, aunque constituía una hipótesis basada más en la filosofía que en la experimentación física. También mencionaremos a Ctesibio (270 a.n.e.), Griego catalogado como "físico" e inventor (7). Se le atribuye el descubrimiento de la elasticidad del aire y de distintos dispositivos de aire, también ha trascendido por la notable invención del "Hidraulic", órgano musical en el que el aire era dirigido a pasar por los tubos del instrumento debido a un mecanismo forzado por el peso del agua.

Hasta aquí la corta referencia a los Griegos. Lamentablemente este buen paso de desarrollo de las ciencias y las artes, incluyendo la música, no continuó en la triste edad media, periodo que constituyó unos 1500 años prácticamente perdidos, fundamentalmente debido a los prejuicios religiosos, tema que tampoco abordaremos.

4. COMIENZO DEL APORTE DE FÍSICOS AL CONOCIMIENTO DE LA MÚSICA

GALILEO. Con el renacimiento comienza de nuevo la alegría de vivir, se disparan las artes y las ciencias. Es conocido que con Galileo Galilei (1564-1642) comienza realmente la física como ciencia (8), pero es menos conocido que también con Galileo comienzan los primeros tratamientos científicos del sonido y de la música, del estudio moderno de las ondas y la acústica. Galileo eleva 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). En realidad el interés de Galileo por el sonido fue inspirado por su padre Vincenzo Galilei, matemático, cantante, músico, compositor, teórico de la música de reconocida reputación histórica (7). Como veremos, después de

Galileo, el conocimiento científico acústico de la música tuvo un rápido desarrollo.

MERSENNE. Físico-matemático francés. Martín Mersenne (1588-1648), (9), que 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 de la escala musical del temperamento igual, que realmente se empezó a generalizar 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 queda establecido la dependencia de la frecuencia de una cuerda vibrante de: la tensión, la longitud y de la densidad lineal de la cuerda tensada. Lo que en términos posteriores se definió como:

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

T – Tensión en Newton.

L – Longitud de la cuerda en metros.

μ – Masa por unidad de longitud en Kg/m .

DESCARTES. Rene Descartes (1596-1650). 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 de la música. En su correspondencia se encuentran frecuentes referencias a la música (7).

TORRICELLI y PASCAL. El físico italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) en 1643 y posteriormente el físico francés Blas Pascal (1623-1662) (10), midieron la presión de la atmósfera, pero aun 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. Aún en el siglo XVII 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 del sonido como una onda estaba destinado a cambiar completamente el cuadro anterior, pero había que demostrarlo experimentalmente.

GUERICKE. En 1650 el físico alemán Otto Von Guericke (1602-1686) inventó la bomba para crear vacío parcial (10). Realizó los primeros estudios que revelaron que la luz viajaba en el vacío pero el sonido no.

BOYLE. En 1660 el científico anglo-irlandés Robert Boyle (1627-1691) mejoró la tecnología de vacío y pudo observar como la intensidad del sonido originado por un timbre (tipo reloj) 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 (10) (11) (12). 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 absolutamente correcta.

HUYGENS. Christiaan 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. 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 de distintos intervalos musicales como aproximaciones de los intervalos de sexta y de cuarta aumentada respectivamente, en la escala del tono medio y en la del temperamento igual. Demostró la estrecha relación entre ambas escalas. Describió la escala de 31 tonos en su *Lettre touchant le cycle harmonique* (Rotterdam 1691) y *Novus cyclus harmónicos* (Leiden 1724).

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

BORELLI. Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), físico italiano que en 1650 obtuvo (junto con Viviani, otro físico italiano) 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 conocen menos, por ejemplo, Borelli realizó trabajos de física y astronomía, incluyendo la publicación de un tratado en 1666 sobre la influencia de la atracción de los satélites de Júpiter, También fue el primero en sugerir la trayectoria parabólica de los cometas.

HOOKE. El notable físico inglés Robert Hooke (1635-1703) fue empleado por Robert Boyle para construir las bombas de vacío, cinco años después formulaba su famosa ley sobre la elasticidad de los cuerpos. Hooke 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 relacionado 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 correspondientemente. De esta forma quedó demostrado la relación directa y objetiva existente entre el estímulo (la frecuencia del sonido) y la sensación (la altura o nota del sonido).

SAUVEUR. El físico francés Joseph Sauveur (1653-1716) a finales del siglo XVII principios del XVIII realizó estudios detallados sobre la relación entre frecuencia y altura (tono), también sobre las ondas en cuerdas tensadas. Fue el primero que sugirió una explicación física de la disonancia 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, la nota DO con una $f = 256$ Hz, que se conoce como "escala científica" en que las frecuencias son función exponencial de 2, dicha escala se utiliza hasta los días de hoy en función de investigaciones científicas de la música por su comodidad.

NEWTON. El ilustre físico inglés Isaac Newton (1643-1727) fue el primero en realizar un tratamiento matemático del sonido en 1687 (en su famoso trabajo "Principia"), posterior a la demostración de que la propagación del sonido a través de cualquier fluido solo dependía de propiedades físicas (elasticidad, densidad). También calculó, a partir de consideraciones teóricas, la velocidad del sonido en el aire.

LEIBNITZ. 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 utilizar el cálculo diferencial en el tratamiento de las vibraciones y las ondas.

Un dato interesante es que 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 antes mencionados 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 esta la música. Aportaron a la teoría mecánica de las ondas y de las vibraciones sonoras Johan Bernoulli (1667-1748), Brook Taylor (1685-1731), Daniel Bernoulli (1700-1782), Leonhard Euler (1707-1783), Jean Le Rond d'Alambert (1717-1783), Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) Sophie Germain (1776-1831), Siméon-Denis Poisson (1781-1840). Al mismo tiempo hicieron cosas más específicas relacionadas directamente con la música:

TAYLOR. En 1708 Brook Taylor desarrolló la teoría matemática de las cuerdas vibrantes de acuerdo con las observaciones experimentales previas. Fue el primero en expresar matemáticamente el movimiento de una cuerda vibrante sobre la base de principios mecánicos.

EULER. En 1738, además de profundizar teóricamente en el fenómeno mecánico de las vibraciones, fue el primero en plantear una teoría científica de la armonía musical, aunque fallida, tiene el mérito de ser uno de los pocos intentos de su época para establecer los estudios racionales dentro del mundo musical. Llegó hasta proponer una medida definida cuantitativa de la disonancia de un acorde.

DALAMBERT, quien en 1740 realizó la derivación de la ecuación general de onda, realizó aportes relevantes a la música que son ampliamente reconocidos (1), (2), (7). Realizó la primera teoría física de la armonía musical que publicó en *Éléments de musique* en 1752. En 1754 publicó sus reflexiones sobre la música, titulado *Réflexions sur la musique en général et sur la musique française en particulier*. También publicó tratados en acústica, física del sonido y como enciclopedista francés de su época escribió varios artículos sobre música para la *Encyclopédie*.

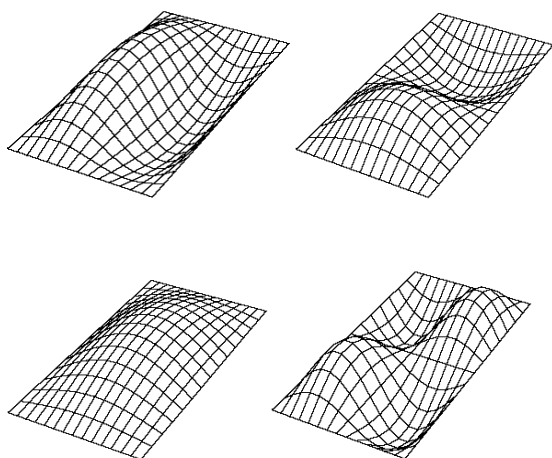
BERNOULLI JOHAN Y LAGRANGE. Contribuyeron al igual que Dalambert y Euler, al conocimiento del tono y del timbre del sonido producido por un instrumento musical y también a la naturaleza de la propagación del sonido en distintos medios. Lagrange y Euler aplicaron las nuevas ecuaciones diferenciales a las ondas en las cuerdas y en el aire.

POISSON. Extendió el desarrollo matemático de las vibraciones a las membranas tensadas.

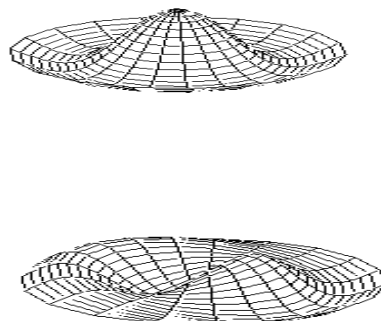
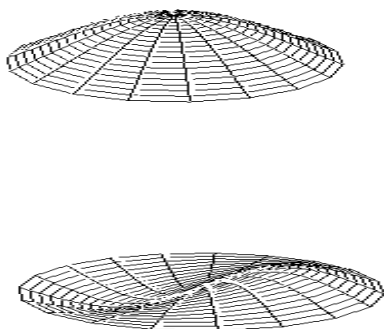
SOPHIE GERMAIN. Posiblemente una de las mejores explicaciones teóricas de las vibraciones fue dada en 1816 por la físico-matemática francesa Sophie Germain, de tal elegancia y complejidad que hasta los errores en el tratamiento al problema no fueron identificados hasta 35 años después, en este caso, por el gran físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887).

CHLADNI. El físico alemán Ernst Florenz Friedrich Chladni, (1756-1827) determinó la velocidad del sonido en distintos metales. Realizó los cálculos exactos, por un nuevo método, de la escala musical del temperamento igual. Pero sobre todo introdujo la técnica de observar experimentalmente los patrones de ondas estacionarias esparciendo arena en platos vibrantes, técnica que actualmente se utiliza en los instrumentos musicales, sobre todo de percusión. El mecanismo es sencillo, los modos de vibración en superficies originan patrones que tienen distintas líneas nodales (que no vibran) donde las partículas de arena se van concentrando debido a las vibraciones del resto de la superficie en cuestión, quedando así sobre la superficie, la figura del patrón altamente simétrica, delineada por las partículas de arena que quedan acumuladas en las líneas nodales.

Ejemplos de modos de vibración de una membrana rectangular:



Ejemplos de modos de vibración de una membrana circular.



5. EL SONIDO DESBORDA EL MARCO MECÁNICO-ACÚSTICO

El desarrollo que tuvo el electromagnetismo estaba destinado a provocar unas transformaciones tecnológicas sin precedentes en la historia de la humanidad. Las bases y condiciones para el mismo se sientan en un periodo que va desde finales del siglo XVIII hasta el XIX. El sonido y la música no van a escapar de estas revoluciones tecnológicas. Por solo citar un ejemplo de principio, las manipulaciones que se pueden hacer con las réplicas de las ondas de frecuencias sonoras electromagnéticas no se pueden hacer con las ondas sonoras mecánicas. Como recordaremos, entre los físicos más importantes que originaron las bases de tal desarrollo del electromagnetismo y con ello también propiciaron la revolución posterior del sonido y la música están los físicos: franceses Carlos Augusto de COULOMB (1736-1796) y Andrés Maria AMPERE (1775-1836), el danés Cristian OERSTED (1777-1851), el alemán Carlos Federico GAUSS (1777-1855), el inglés Miguel FARADAY (1791-1867), los alemanes Wilhelm WEBER (1804-1891) y Gustavo KIRCHHOFF (1824-1887), el escocés James Clark MAXWELL (1837-1879), el holandés Hendrick Antoon LORENTZ (1855-1921). El alemán Gustavo HERTZ (1857-1894). Pero además algunos de los gigantes del Electromagnetismo también incursionaron en forma directa en el mundo del sonido y la música. Veamos a continuación algo al respecto:

VOLT. El físico italiano Alejandro Conde de Volta (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 sólo a su gran interés por el tema.

BIOT. El físico francés Jean-Baptiste Biot (1775-1862) en 1808 dirigió los trabajos para la determinación de la velocidad del sonido en sólidos.

SAVART. El físico francés Félix Savart (1791-1841) 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 discos de Savart. Realizó importantes estudios sobre los intervalos musicales e inclusive existe una unidad de intervalo musical llamado Savart (13).

FOURIER. Físico-matemático francés Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768-1830). Como se conoce, 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 como objetivo, hizo uno de los aportes más significativos en la comprensión física del sonido y del timbre musical.

OHM. El físico alemán Georg Simon Ohm (1787-1854) fue quien 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 la música, conocida como Ley de Ohm de la audición, que no tiene que ver con su muy famosa ley de Ohm eléctrica.

WHEATSTONE Sir Charles Wheatstone (1802-1875), Sí, el mismo del puente eléctrico, 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.

6. ESCALA Y AFINACIÓN MUSICALES

Vimos la escala científica propuesta por Saveur. En 1834 el físico alemán J. H. 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 el francés Jules Antón LISSAJOUS definió el standard legal para la nota La 435 Hz. En 1936 la American Standards Association adoptó la Escala a partir de LA 440 Hz, y que se generalizó en 1939 en Conferencia Internacional. (13).

7. LA PROBLEMÁTICA ESTÍMULO-SENSACIÓN

También en el siglo XIX comienzan los estudios científicos sobre el controvertido problema estímulo-sensación (3).

FECHNER. Gustavo Teodoro Fechner (1801-1887), fue un físico alemán sumamente interesante. Como no es muy conocido por los físicos veamos algunos de sus aportes a la física (10). 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, es ampliamente conocido como el padre de la psicofísica, que es la 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 (JND-just noticeable difference) de dos frecuencias al acercarse hasta confundirse la sensación en una sola frecuencia, algo similar ocurre con la sonoridad (amplitud) de la onda sonora que puede ser discriminada por el oído, conocida como Ley de Fechner. Mas recientemente, en el marco de esta ciencia, se han precisado mejor estas relaciones cuantitativas entre estímulo-sensación.

HELMHOLTZ Ludwig Ferdinando Hermann Helmholtz (1821-1894), el famoso físico alemán, posiblemente el más conocido por los musicólogos, dio por primera vez las explicaciones científicas 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 (14), uno de los más leídos que continúa inclusive editándose. Sus trabajos marcan una profundización en el estudio científico moderno de los fenómenos musicales.

8. ACELERACIÓN DEL DESARROLLO TEÓRICO Y TECNOLÓGICO

KUNDT. El alemán 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.

KOENIG. Karl Rudolph Koenig Físico prusiano, creativo experimentador y quien diseñó en el siglo XIX muchos de los instrumentos utilizados para las investigaciones en audición y en música.

RAYLEIGH. John William Strutt. Físico inglés (1842-1919), Premio Nóbel de Física en 1904, por sus investigaciones de las densidades de los gases

más importantes y por su descubrimiento del argón. Más conocido como Conde Rayleigh. 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 los fenómenos de vibración y resonancia. Su importante reflexión sobre la audición binaural fue la base del desarrollo ulterior del sonido estereofónico.

EDISON. Hasta el tercer cuarto del siglo XIX, no existía constancia diferida auditiva (grabación) de los sonidos, como el habla y la música. En 1877 el norteamericano Tomas Alba Edison (1847-1931) comienza la grabación en cilindros, aparece el fonógrafo. Estas grabaciones y reproducciones del sonido eran completamente mecánicas, se movía el cilindro a mano a velocidad uniforme, grabándose y acercándose mucho a la bocina ya que la vibración de las voces era la fuente de energía que movía la aguja del fonógrafo. El fonógrafo mejorado de Edison en 1909 de cilindros de cera, podía tocar dos tipos de cilindros: los antiguos de 2 min. y los nuevos de larga duración (4 min.), con el doble de surcos. Ambos giraban a 160 rpm. También el alemán Emile BERLINER en 1877 inventó la grabación pero en platos, no en cilindros como Edison.

En menos de 100 años, las grabaciones de sonido evolucionarían en forma espectacular, de mecánicas a: eléctricas, ópticas, magnéticas y memorias sólidas con increíble calidad y fidelidad.

BELL. En la misma prolija época en que apareció la primera grabación, lo hace también la transmisión alámbrica del sonido, el físico norteamericano Alejandro Graham Bell (1847-1922) comienza la telefonía en 1876, se perfecciona por BERLINER en 1877 y el micrófono por el inglés David HUGHES (1831-1900) en 1878.

La invención del micrófono fue sumamente importante (15), sencillamente porque por primera vez las ondas sonoras se podían convertir, aún sin amplificación, en sus réplicas eléctricas y viceversa (el parlante). Una vez transformada la señal sonora en su similar eléctrica, ésta podría someterse a múltiples manipulaciones antes de convertirla nuevamente en onda sonora mecánica.

Estaba por comenzar la transmisión inalámbrica de las ondas electromagnéticas. Aspecto sumamente importante ya que existía la posibilidad de transformar la señal sonora mecánica en electromagnética y así transportarla a grandes distancias.

MARCONI. Guglielmo Marconi (1874-1937). Físico italiano inventor de un exitoso sistema de radio telegrafía en 1896, por lo que en 1909 recibió el

premio Nóbel de Física. Posteriormente trabajó en el desarrollo de las comunicaciones de longitudes de onda más cortas, base de las modernas comunicaciones a largas distancias.

POPOV. El físico ruso Alexandr Stepanovich Popov (1859-1906) independientemente de Marconi desarrolló un sistema de radio telegrafía en 1895, por lo que estimo merece la coautoría por la invención del equipo de radio (sin hilos).

Haremos una pausa del tema electromagnético, para preguntarnos ¿cómo era la calidad del sonido en las salas de teatro y otros locales? Ya el físico JOSEPH HENRY (1797-1878) en 1856 había incursionado teóricamente en esta problemática, pero fue a finales del propio siglo XIX, que se dio el paso más importante al respecto.

SABINE. Wallace Sabine (1868-1919). Físico norteamericano (16), 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, denominada Ley de Sabine y la unidad de absorción del sonido es el sabine.

La primera aplicación Sabine la realizó en el Boston Symphony Hall que se inauguró en el 1900 y constituyó un gran éxito acústico.

Estaba por llegar el siglo XX, y con él estaba naciendo la electrónica. En 1895 LORENTZ postuló la existencia del electrón. El inglés John Ambrose FLEMING en 1904 inventó el diodo de tubo al vacío.

DE FOREST, Lee de Forest (1873-1911) físico norteamericano, en 1906 puso una rejilla al diodo, inventa el tríodo y nace el amplificador electrónico. Alrededor del 1911, después de distintos perfeccionamientos tecnológicos, nace la electrónica práctica.

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, posteriormente sintetizarlos y simular timbres.

THEREMIN. Lev Sergueyevich Termen (Theremin) (1896- 1993), físico ruso, que inventó uno de los primeros instrumentos electrónicos, con circuitos osciladores de válvulas y filtros, considerado el primer sintetizador de sonidos musicales en 1920. 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. Mostrado a Lenin en 1922, a Einstein en 1927. Theremin fue

honrado en el festival de música electrónica en Francia en 1989 y en la Universidad de Stanford (aún vivo) en 1991. Usado en la música de muchos filmes de ciencia ficción, en grabaciones de grupos como el de rock de Estados Unidos: Beach Boys.

NERNST. El físico alemán Hermann Walther Nernst (1864-1941), padre de la físico-química moderna. Fue uno de los principales iniciadores de los pianos eléctricos y sus principios fueron aplicados a toda una serie de instrumentos de este tipo (7). 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, amplificadas electrónicamente y transformadas de nuevo en ondas sonoras por altoparlantes. De timbre ajustable a voluntad vía condensadores variables, entre otras facilidades. El perfeccionamiento ulterior de este piano siguió bajo su dirección. Nernst recibió el premio Nóbel de Química en 1920.

RAMAN. Sir Chandrasekhara Venata Raman (1888-1970), físico indio. Desarrolló una teoría descriptiva, publicado 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 (17). Publicó estudios sobre tambores de la India en 1934. Recibió el premio Nóbel de física en 1930 por su trabajo sobre la dispersión de la luz y por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre.

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

BEKESY. Georg Von Bekesy (1899-1972), físico húngaro-norteamericano. Demostró como 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 Nóbel en 1961 de fisiología y medicina por su descubrimiento sobre el significado físico de como 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 (18), es la obra magna sobre la teoría del oído.

9. LA ERA DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS

En el siglo XX se desarrollan a plenitud: las Comunicaciones, el Control, las Componentes y la Computación, en lo que muchos llamaron el desarrollo de las cuatro "C".

SCHOKLEY, BARDEEN, BRITAIN. A la altura del 1949 se descubre el efecto transistor por tres

físicos norteamericanos: William Schokley (1910-1989), John Bardeen (1908-1991), Walter Houser Brittain (1902-1987), William Schokley (1910-1989), por lo que recibieron el premio Nóbel en 1956. A partir de los circuitos transistorizados continuaron desarrollándose rápidamente los instrumentos musicales electrónicos y los equipos de grabación, reproducción y transmisión. Se perfeccionó el sintetizador que era aún de grandes dimensiones.

MOOG. Robert Moog (1934-2005), físico norteamericano recientemente fallecido. En 1964 fue el primero en diseñar varios tipos de sintetizadores compactos de precio moderado y que suministraba un extenso rango de manipulación del sonido. Además de producir ondas sinusoidales, triangulares, cuadradas y dientes de sierra, el sintetizador MOOG tenía generadores de ruido blanco, amplificadores con control de voltaje, filtros pase banda y secuenciador. Esta tecnología analógica se convirtió en la base de los sintetizadores modulares y portátiles producidos en masa en las décadas 60s y 70s. El Polymoog, podía producir acordes y apareció en 1976. Época en que comenzaron a producirse sintetizadores compactos comerciales por varias empresas importantes.

En el campo de los componentes se dio un sostenido desarrollo de los circuitos integrados. Por solo mencionar una de sus características (19), digamos que el nivel de integración en 1960 era de varias decenas de transistores equivalentes por cm^2 , en 1966 era de cientos, en 1969 miles, en 1975 decenas de miles, en 1985 cientos de miles, en 1995 varios millones, en el 2000 decenas de millones y actualmente más de 100 millones de transistores equivalentes por chip.

La digitalización y la computación evolucionaron a una velocidad vertiginosa. Se dispararon las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones, el hardware, el software en todas las esferas, el procesamiento digital de señales, incluyendo la científica también en la música.

En el siglo XX, no obstante constituir una pequeña parte de los físicos, cientos de físicos se han dedicado a estudios multifacéticos de la música, también plasmados en cientos de artículos científicos y decenas de libros y monografías, comportamiento que continúa actualmente en el siglo XXI.

10. LOS FÍSICOS TAMBIÉN DISFRUTAN LA MÚSICA

Además del aporte al desarrollo científico y tecnológico de la música, a los físicos, al igual que a todos, les gusta: oír, apreciar, cantar, bailar, ejecutar y hasta posiblemente componer música. Podemos citar a notables físicos aficionados a tocar algún

instrumento musical: Piano, el alemán premio Nóbel de Física de 1918 Max Plank (1858-1947). Tumbadora y bongoes, el norteamericano Nóbel de Física de 1965 Richard Feynman (1918-1988). Violín, el alemán Albert Einstein (1879-1955) Nóbel en 1921.

11. CONCLUSIÓN

Esperamos que este trabajo, que consideramos trata un tema poco conocido, pueda contribuir a que el lector tenga una justa valoración sobre el papel jugado por los físicos en el desarrollo de la música.

REFERENCIAS

1. JEANS, Sir JAMES (1953): **Science and Music**, Cambridge University Press, London, England.
2. WOOD, ALEXANDER (1964): **The Physics of music**, Methuen & Co., 6th edition, London, England.
3. STEVENS, S. y F. WARSHOFKY (1971): **Sonido y Audición**, Colección científica de Time-Life, Time Inc., Offset Multicolor S:A: México, DF.
4. La Flauta Neandertal, Reportes en: www.apnet.com/insight/04031997/grapha.htm; "Science" Nov. 1996, "Muy Interesante" Feb1997.
5. ASKILL, JOHN and D. VAN NOSTRAND (1979): **Physics of Musical Sound**, Co., New York.
6. VELÁZQUEZ, G.O. (1966): **100 Biografías en la Historia de la Música**, IPN, México.
7. SCHOLE, P.A. (1981): **Diccionario Oxford de la Música**, Editorial Arte y Literatura, Ciudad Habana.
8. Diccionario enciclopédico de Física, Redactor principal A.M. Projorov, Ediciones "Enciclopedia Soviética" Moscú, 1983.
9. MAGIE, W.F. (1969): **A Source Book in Physics**, Harvard University Press, Cambridge, Massachussets.
10. SPASSKI, B.I. (1963): **Historia de la Física** (en ruso), Universidad de Moscú.
11. Enciclopedia Encarta 2004.
12. Enciclopedia Británica 1999.
13. Handbook of Chemistry and Physics, 67th Edition, 1986-1987, CRC Press. Florida.
14. HELMHOLTZ, H. von (1954): **On the Sensation of Tone**, Dover Publications.
15. STOLIK, D. (2004): Textos del Curso "Fundamentos físicos de la música", Facultad de Fisica, Universidad de La Habana.
16. SABINE, W.C. (1964): **Collected Papers on Acoustic**, Dover Pub.
17. FLETCHER, N.H. (1999): "The nonlinear physics of musical instrument", **Rep. Prog. Phys.** 62, 723/764, UK, IOP Publishing Ltd.
18. BEKESY, G. (1960): **Experiments in Hearing**, McGraw-Hill.
19. MILLMAN, J. (1979): **Microelectronics**, Mc.Graw-Hill Book Co., New York.