

TALLER Y LABORATORIO

EL SONIDO QUE VINO DEL ÉTER

Suenan unos arpeggios de piano y apenas se ve a la mujer que los interpreta mientras la cámara cambia de plano encuadrando a otra mujer, de pie, tras lo que parece un aparatoso atril de conferenciante formado por una caja de la que salen unas extrañas antenas metálicas: una es un vástago vertical y la otra, en el lado opuesto, sobresale horizontalmente curvándose en un bucle paralelo al suelo.

Si nuestra atención visual no ha desplazado a la auditiva, escuchamos un sonido fantasmal y melifluido que, sin embargo, entona perfectamente la conocida melodía de “El Cisne”, de Camille Saint-Saëns, a la cual los acordes del piano prestan la armonía. La melodía suena algo extraña por el timbre especial de ese sonido y por la inusual interpretación llena de *glissandi*¹ y vibratos, pero falta de picados y ataques bruscos.

Pero volvamos a la escena: la mujer tras el extraño atril gesticula en actitud extática acercando y alejando las manos de las antenas. Y nos damos cuenta de que la melodía reacciona a esos movimientos: ¡la mujer está tocando ese aparato que hemos confundido con un atril, pero sin tocarlo!²

EL THEREMÍN, UN INSTRUMENTO ELECTRÓNICO

Esa especie de caja elevada que parece un facistol no es sino un instrumento electrónico llamado *theremín* y la mujer que lo “toca” es Clara Rockmore³, una de sus in-

¹ El *glissando* es una forma de ejecutar la transición de una nota a otra de forma que se escuchan todas las frecuencias intermedias.

² En español y otras lenguas ibéricas “tocar” es un verbo polisémico que incluye tanto la acepción de hacer contacto con las manos como la de tañer un instrumento, lo cual permite este ocurrente juego de palabras que no es posible en otros idiomas.

³ La escena que hemos referido pertenece a un documento videográfico que muestra una interpretación de “El Cisne” por Clara Rockmore. Se puede ver aquí: <https://www.youtube.com/watch?v=pSzTPGiNa5U>.



Figura 1. La intérprete Alexandra Stepanoff tocando el theremín para NBC Radio, 1930. Véase el aspecto que tenían los primeros theremines (dominio público).

terpretes más talentosa. Al decir “instrumento electrónico” puede que hayamos evocado ambientes futuristas de música psicodélica, *dance* y *techno*. Y sin embargo el theremín fue desarrollado en una época que ya empieza a parecer remota, entre 1918 y 1920, por el inventor ruso —ya por entonces soviético— Leon Theremin⁴.

Al theremín se le reconoce el mérito de ser el primer instrumento electrónico. Y Leon Theremin, su inventor (San Petersburgo, 1896), demostró ser un genio de la electrónica digno de figurar en los altares de la cultura pop con el mismo rango que Thomas Edison y Nikola Tesla. Tras la invención del instrumento, Lenin quiso usarlo como arma propagandística de la avanzada ingeniería soviética e incentivó que Theremin lo presentara en Europa y Estados Unidos. En este país estuvo viviendo a partir de 1928 donde patentó el theremín ese mismo

⁴ Este es el nombre occidentalizado que adoptó y por el que se bautizaría su instrumento; su nombre ruso era Lev Sergueyevich Termen.

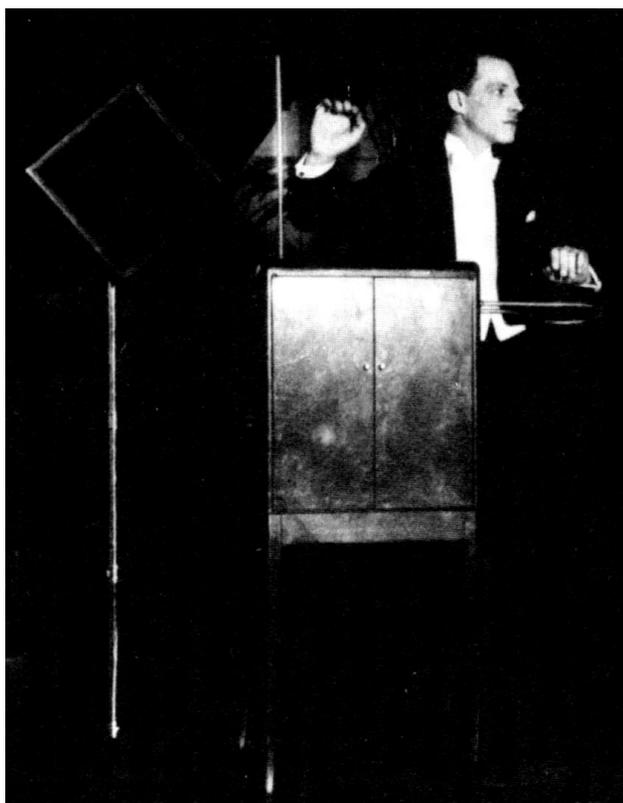


Figura 2. Leon Theremin tocando su instrumento en 1924 (dominio público).

año; allí conoció a Clara Rockmore, emigrada soviética, y a otros músicos con los que colaboró en el desarrollo del instrumento. Volvió a la Unión Soviética en 1938 y fue internado en un *gulag* donde desarrolló unos artilugios de espionaje muy adelantados a su tiempo; por ejemplo, un micrófono remoto que permitía “escuchar” conversaciones mediante el reflejo de un haz de infrarrojos que captaba las vibraciones sonoras en los vidrios de las ventanas. Todo ello fue de gran utilidad para la Unión Soviética durante la Guerra Fría. También siguió volcando su creatividad en la música creando otros instrumentos como el violonchelo electrónico. A partir de 1989 se le permitió viajar de nuevo fuera de la Unión Soviética y en 1991 se reencontró con Clara Rockmore en Estados Unidos. Murió en Moscú en 1993⁵.

DESCRIPCIÓN

Como hemos dicho, el theremin consta de una caja donde se instalan los circuitos que lo hacen funcionar (en los theremines modernos la circuitería ocupa poco espacio y el instrumento no es tan voluminoso) y, eventual-

⁵ Más sobre la vida de Theremin: <https://www.britannica.com/biography/Leon-Theremin>.

mente, donde se encastra el altavoz por donde se emite el sonido.

A la derecha del instrumentista se dispone la antena vertical, que es metálica y es la que controla el tono: al acercar la mano a la antena el sonido emitido se hace más agudo y, reciprocamente, al alejar la mano el sonido es más grave. A la izquierda sobresale la antena de volumen⁶, también metálica, que se despliega en sentido horizontal y forma un bucle. Cuanto más cerca está la mano de la antena más piano es el sonido, llegando al silencio cuando el intérprete toca la antena. Lógicamente, mover la mano en sentido opuesto aumenta el volumen.

El timbre del instrumento es etéreo, sutil. En cualquier caso, no se parece a nada escuchado anteriormente –aunque esta afirmación hay que entenderla desde la perspectiva de una persona que vivía a comienzos del siglo XX (en la actualidad su sonido nos resulta mucho más familiar)– y no parece “terrenal”; de hecho, una de las primeras denominaciones del instrumento fue *eterófono*.

Lo más sorprendente de su sonoridad, incluso para oídos contemporáneos, está dado por la forma de tañerlo descrita anteriormente: no es posible hacer ataques definidos –como por ejemplo sí pueden el piano, la cuerda pulsada o la percusión– y los cambios de nota van siempre acompañados de *glissandi* más o menos explícitos, dependiendo de la habilidad del ejecutante el evitarlos para hacer las melodías más precisas; además, dada la dificultad de afinar la nota, el intérprete suele recurrir al vibrato lo que le da ese característico matiz ululante.

FUNCIONAMIENTO

La explicación de los legos acerca del funcionamiento del theremin suele recurrir a una expresión similar a, *el cuerpo modifica los campos electromagnéticos alrededor de la antena*, que, aunque estrictamente no es falsa, suena esotérica y es poco informativa. Vamos a explicar los fundamentos tomando como ejemplo la antena de tono.

⁶ Esta es la colocación más habitual y que más frecuentemente vemos en los vídeos que podemos encontrar en Internet. Sin embargo a algunos intérpretes –no necesariamente zurdos– resulta más cómoda la disposición contraria, con la mano izquierda para controlar el tono y la derecha el volumen, especialmente si tienen experiencia previa con instrumentos de cuerda.

CIRCUITOS RESONANTES

El elemento principal de un *theremín* es un circuito eléctrico resonante como el que muestra la Figura 3. Se compone de una autoinducción, L_o , y un condensador C_o ; estos circuitos, ante una excitación externa, seleccionan de forma natural una señal sinusoidal, $\cos \omega_o t$, de una frecuencia fija cuyo valor es:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_o C_o}}$$

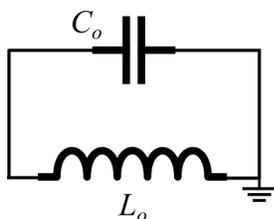


Figura 3. Esquema de un circuito resonante básico.

EL CUERPO COMO PARTE DE UN CONDENSADOR

Si modificamos los valores de L_o o C_o la frecuencia de resonancia también se modifica. Esta es justamente la estrategia: cambiar el valor de uno de los elementos, en este caso del condensador.

Justamente, el sistema antena-intérprete no es más que un condensador electrostático donde el intérprete hace de borna de tierra. Ya sabemos que la fórmula de la capacidad de un condensador planoparalelo tiene la expresión:

$$C = \epsilon_o \frac{A}{d}$$

donde ϵ_o es una constante, A la superficie de las placas y d la distancia entre ellas. El sistema intérprete-antena se aleja bastante del condensador ideal planoparalelo, pero aun así la esencia de la fórmula anterior se conserva: cuanto más cerca está la mano del intérprete de la antena mayor es la capacidad; igualmente la capacidad aumenta cuanto mayor superficie exponga el intérprete (abriendo la mano, por ejemplo).

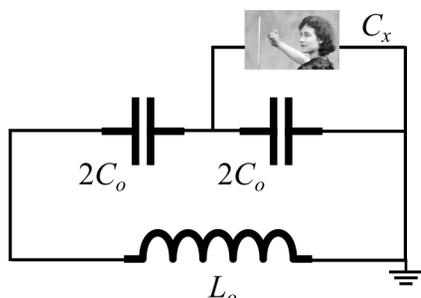


Figura 4. Variación del circuito resonante donde interviene el condensador intérprete-antena.

Una de las posibles configuraciones para diseñar un circuito resonante en el que intervenga el sistema intérprete-antena es el mostrado en la Figura 4. En ausencia del condensador intérprete-antena, C_x , los dos condensadores de capacidad $2C_o$ son equivalentes a un único condensador de capacidad C_o como sabemos a partir de la composición de condensadores en serie:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{2C_o} + \frac{1}{2C_o} = \frac{1}{C_o}$$

y por tanto $\omega = \omega_o$. Si tenemos en cuenta que C_x está presente pero con un valor pequeño, mucho menor que C_o , entonces la frecuencia de resonancia se modifica de esta forma:

$$\omega = \omega_o - 2\Delta\omega$$

donde

$$\Delta\omega = \omega_o \frac{C_x}{16C_o}$$

PRINCIPIO HETERODINO

El último elemento para entender cómo funciona el *theremín* es el principio heterodino, descubierto en 1901 por el ingeniero canadiense Reginald Fessenden⁷. Consiste en la obtención de nuevas frecuencias a partir de dos dadas. Aplicado a nuestro caso esto supone el uso de dos circuitos resonantes: uno que sirve de referencia y otro que integra el condensador intérprete-antena (véase la Figura 5). En ausencia del intérprete ambos circuitos resuenan a la misma frecuencia, ω_o , que desde ahora llamaremos *frecuencia portadora*. Cuando el intérprete se acerca a la antena introduce una nueva capacidad C_x que cambia la frecuencia de resonancia del primer circuito a $\omega_o - 2\Delta\omega$ como ya hemos visto anteriormente.

Tomamos la señal de ambos circuitos y la sumamos tal y como muestra la Figura 5. La señal resultante es por tanto:

$$\cos \omega_o t + \cos(\omega_o t - 2\Delta\omega t)$$

A partir de la relación trigonométrica

$$2 \cos A \cos B = \cos(A+B) + \cos(A-B)$$

y tomando $A = (\omega_o - \Delta\omega)t$ y $B = \Delta\omega t$ tenemos que

$$\cos \omega_o t + \cos(\omega_o t - 2\Delta\omega t) = 2 \cos \Delta\omega t \cos(\omega_o t - \Delta\omega t)$$

Es decir, seguimos teniendo una onda portadora de frecuencia ligeramente distinta a la original (a todos los efectos se pueden considerar iguales) pero cuya amplitud

⁷ <https://en.wikipedia.org/wiki/Heterodyne>.

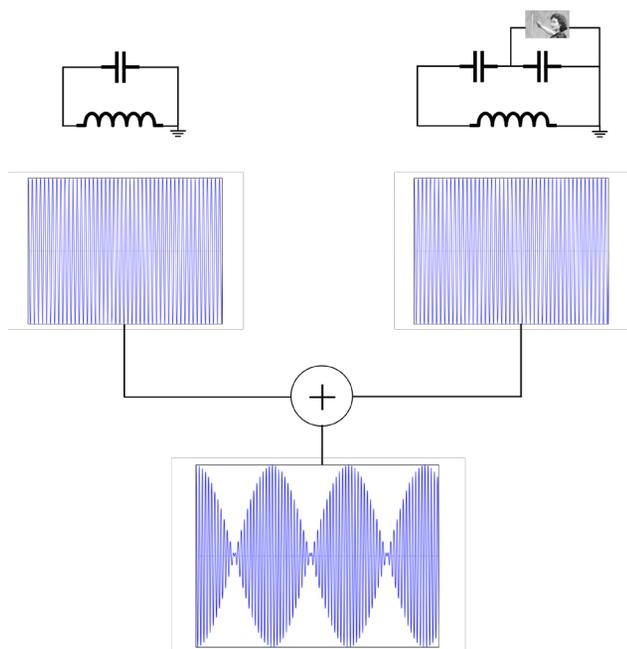


Figura 5. Representación del principio heterodino.

está *modulada* por una onda de frecuencia mucho menor $\Delta\omega$. Es esta modulación de amplitud con lo que nos quedaremos después de filtrar la portadora y que, transformada en ondas acústicas por el altavoz, podremos escuchar.

Este fenómeno es idéntico a otro que nos resulta más familiar: cuando dos instrumentos ligeramente desafinados entre sí hacen sonar la misma nota; entonces percibidos una especie de “batido” del sonido, que es tanto más rápido cuanto mayor es la desafinación (lo que significa que hay más separación entre las frecuencias). Es justamente esa modulación la que nos permite orientarnos cuando afinamos uno de los instrumentos tomando al otro como referencia.

Volviendo al theremín, la frecuencia de la portadora debe ser elevada pero no tanto como para causar interferencias de radio (suele ser del orden de 1 MHz). El rango de frecuencias $\Delta\omega$ de la señal moduladora debe estar, lógicamente, dentro del espectro audible, esto es entre 20 Hz y 20 kHz. Generalmente un cambio de capacidad tan pequeño como 0,01 pF produce un salto de una octava.

La antena de volumen funciona con el mismo principio. Una vez filtrada la portadora se introduce la señal en un convertidor frecuencia-voltaje que alimenta a un amplificador de ganancia controlada por voltaje (VCA). En sus orígenes todos estos circuitos electrónicos se implementaban con válvulas de vacío, ya que la tecnología

de estado sólido no llegó hasta los años 50. Las válvulas introducían algo de no-linealidad en el proceso, lo que revertía en el enriquecimiento armónico de la señal sinusoidal pura.

La electrónica de estado sólido también ha estado presente en la construcción del theremín. El ingeniero estadounidense Robert Moog⁸, un gran admirador de Leon Theremin, construyó varios en la década de los 50 e incluso los produjo industrialmente para su venta entre los aficionados. Actualmente es posible construir un theremín con sólo algunos conocimientos de electrónica y la guía de algunas páginas web⁹.

EL THEREMÍN EN LA MÚSICA Y LA CULTURA POPULARES

Como ya hemos dicho, el creador del theremín era violonchelista y concibió este aparato como un instrumento musical, digno de ser aportado a una orquesta sinfónica. Él mismo hacía demostraciones del instrumento interpretando piezas clásicas con su theremín¹⁰. En la primera mitad del siglo XX hubo otros intérpretes —ya hemos mencionado a Clara Rockmore— que contribuyeron a popularizar el instrumento, aunque la mayor parte de las obras interpretadas eran adaptaciones de clásicos¹¹. Hay composiciones originales para theremín¹², pero son muy poco relevantes.

Porque no nos engañemos: tocar un theremín es muy difícil, como puede uno imaginarse a partir de su forma de interpretarlo. No hay una referencia espacial clara para colocar las manos y emitir la nota deseada, al contrario que sucede, por ejemplo, en los instrumentos de viento, la guitarra o el piano, que tienen perfectamente delimitada la zona de emisión de las distintas notas. En cierta forma, tocar un theremín se asemeja a tocar un instrumento no temperado como el violín, donde la posición de emisión de las notas no está cuantizada rígida-

⁸ Reseña de Wikipedia sobre Robert Moog: https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Moog.

⁹ En esta página web se dan instrucciones sobre la construcción de un theremín: <http://www.channelroadamps.com/articles/theremin>.

¹⁰ Hay un vídeo de Leon Theremin con más de 3 millones de visitas: <https://youtu.be/w5qf906c20o>.

¹¹ Clara Rockmore publicó un disco en 1977 titulado “The Art of Theremin” donde todas las piezas son adaptaciones de obras conocidas.

¹² En el artículo sobre el theremín de la Wikipedia inglesa se mencionan algunos compositores: https://en.wikipedia.org/wiki/Theremin#Concert_music.

CONSTRUYENDO UN THEREMÍN CON ARDUINO

Arduino¹ es una plataforma de *hardware* abierto de bajo coste que consiste básicamente en un pequeño circuito impreso con un microcontrolador y diversos puertos de entrada/salida analógicos y digitales a los cuales pueden conectarse placas de expansión (o *shields*) para ampliar sus capacidades. Este *hardware* viene acompañado de un entorno de desarrollo (o IDE) que permite programar el comportamiento del microcontrolador en C/C++ cómodamente a través de una conexión USB.

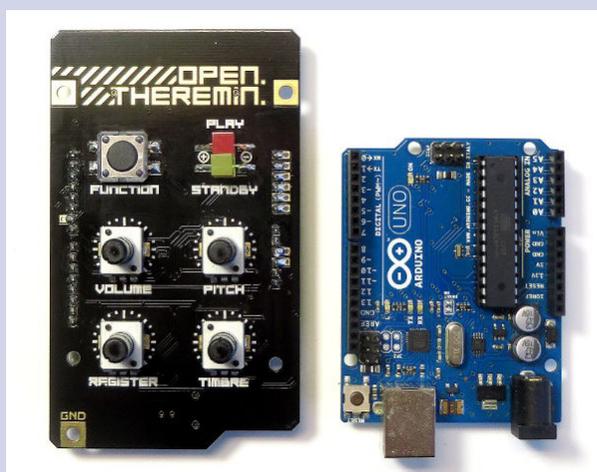


Figura 1. Placa Arduino (der.) con su placa de extensión Open Theremin (izq.) desarrollada por el ingeniero Urs Gaudenz. Fuente: <http://www.gaudi.ch/OpenTheremin>.

Arduino fue inicialmente desarrollado en 2005 en Ivrea, Italia, como un proyecto destinado a estudiantes, pero su bajo coste y facilidad de uso democratizó la electrónica y revolucionó el mundo del DIY (*Do It Yourself*, hazlo tú mismo). Efectivamente, se trata de un *juquete* estupendo, un punto de partida con el que construir todo tipo de invenciones de manera fácil y económica. Hoy en día, además, el proyecto no para de crecer y cuenta con una gran comunidad mundial de usuarios que desarrollan y publican proyectos multidisciplinarios de todo tipo haciendo uso de sus capacidades de control y automatización.

Precisamente, uno de estos proyectos es Open Theremin², creado por el ingeniero microelectrónico Urs Gaudenz. Open Theremin consiste en una placa de

¹ Web oficial de Arduino: <https://www.arduino.cc>.

² Web Open Theremin: <http://www.gaudi.ch/OpenTheremin>.



Figura 2. Aspecto final del theremin desarrollado por los autores. Fuente: Almudena Martín Castro.

expansión para Arduino con toda la circuitería necesaria, además del *software* que, una vez compilado y cargado en el microcontrolador de Arduino, hace que este theremin *cobre vida*.

El funcionamiento de Open Theremin es simple, pero a la vez muy versátil. El *shield* contiene los circuitos resonantes que producen una señal de cierta frecuencia según el principio heterodino y transmite la frecuencia a Arduino a través de los puertos de expansión. Pero no sólo transmite la frecuencia (el tono), sino también el volumen, el registro o tesitura y un valor para la selección del timbre; todos ellos asociados a controles que son, además, configurables manualmente mediante potenciómetros.

A partir de aquí, las posibilidades son infinitas. En su versión por defecto, el programa compone una señal con distintas componentes a partir de unas tablas de armónicos predeterminadas, y la envía al *jack* de salida de audio, donde se pueden conectar unos cascos o un altavoz. Pero podría modificarse este programa,

por ejemplo, para usar diferentes tablas de armónicos y componer timbres distintos, o convertir esos valores en órdenes MIDI³ con las que controlar un sintetizador.

Como decíamos, Open Theremin es *hardware* (y *software*) abierto, lo que significa que puede construirse desde cero a partir de los planos PCB (*Printed Circuit Board*). No obstante, si no se cuentan con los medios o los conocimientos necesarios para fabricar una placa de circuito impresa, el autor también pone a la venta un cómodo *pack* con el *shield* ya construido y algunos componentes necesarios: potenciómetros, LEDs y los pines para su conexión con Arduino (este

³ *Musical Instrument Digital Interface*, MIDI, es un estándar que define un protocolo, una interfaz digital y conectores que permiten la comunicación de instrumentos musicales electrónicos y computadoras. El protocolo consiste en una secuencia de eventos que transportan información musical como tono, duración y volumen.

mente y el intérprete tiene un margen continuo para encontrar la afinación correcta. Aún en esta comparación, el violín tiene ventaja porque las referencias espaciales están bastante más acotadas en éste que en el theremín, donde, aparte de la distancia de la mano a la antena, también juegan otros factores como la disposición de los dedos.

A causa de esta gran dificultad en su interpretación, el theremín no se ha popularizado entre las orquestas y los compositores. Su influencia en la cultura popular se debe sobre todo a su uso en el cine y televisión, frecuentemente para recrear ambientes futuristas, de ciencia-ficción o fantásticos¹³. Por ejemplo, en las películas “Ultimátum a la Tierra” y “El enigma de otro mundo” (1951); más modernamente, aparece en la serie de televisión “Big Bang Theory”, donde el personaje de Sheldon Cooper lo hace sonar en un capítulo.

También lo adoptaron provisionalmente algunas bandas de pop-rock, como *Led Zeppelin* y *The Rolling Stones*; y, por supuesto, los pioneros de la llamada *música electrónica*, como Jean Michel Jarre. El ejemplo

¹³ Hay que decir que muchas de las intervenciones del theremín en este contexto se han limitado al de generador de frecuencia de variación rápida para efectos acústicos, puesto que para tocar el instrumento con ese objetivo no es necesaria apenas ninguna técnica de interpretación.

último se adquiere aparte). El montaje es realmente sencillo, y, aparte de construir un par de antenas, tan solo requiere algo de maña soldando los componentes. Las antenas, por su parte, se pueden obtener a partir de un par de tubos de aluminio disponibles en cualquier ferretería, doblándolos para que adquieran la forma adecuada.

El resultado es un theremín de bajo coste muy fácil de construir y utilizar que además admite posibilidades de personalización sin límite para aquellos usuarios avanzados con conocimientos de programación. Ahora bien, como cualquier otro theremín, no es precisamente fácil de dominar musicalmente hablando, pero ese ya es otro cantar (nunca mejor dicho).

Almudena Martín Castro

Iñaki Úcar Marqués

Estudiantes del Grado en Física de la UNED

que todo el mundo habrá escuchado alguna vez es el tema “Good Vibrations” del grupo californiano *The Beach Boys*, donde suena una versión modificada de un theremín.

ALTERNATIVAS AL THEREMÍN

Hemos visto dos características del theremín contradictorias en la consecución del favor popular: por el lado positivo cuenta su sonido novedoso, hipnótico y, por qué no, bello; y por el lado negativo, la dificultad de interpretación. Por tanto no es de extrañar que surgieran ins-



Figura 6. La intérprete Lydia Kavina tocando un theremín moderno. Obsérvese el reducido tamaño del instrumento comparado con el de la Figura 1. Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Lydia_Kavina.

trumentos electrónicos alternativos que aportaran las cualidades del theremín pero que fueran más sencillos de tocar.

En el mundo de la música sinfónica hubo varios instrumentos que asumieron el rol del theremín. Desde mi punto de vista, el más importante es el llamado *generador de ondas Martenot*, basado también en el principio heterodino. El generador de ondas Martenot se toca con un teclado o también deslizando un anillo por una banda, con lo que se consigue el efecto *glissando* cuando es necesario.

Paradójicamente, en el ámbito de la música pop, supuestamente más inclinado a la innovación y la modernidad, los instrumentos electrónicos no levantaron mucho entusiasmo inicialmente. El interés se despertó a partir de la segunda mitad de los años 60, cuando comenzaron a hacer pinitos con el theremín algunos grupos citados en el apartado anterior. En esa época, el ya mencionado Robert Moog desarrolló un instrumento electrónico llamado genéricamente “sintetizador” que revolucionó el panorama de la música pop-rock. El sintetizador consiste en un generador de frecuencias controlado por voltaje (VCO) que permite crear nuevos sonidos mediante la adición de distintos tipos de ondas –sinusoidales, triangulares y cuadradas, más ruido blanco y rosa– cuya mezcla era controlada por el intérprete, el cual, además, regulaba el contenido armónico mediante un filtro basabajos también controlado por voltaje (VCF). El sintetizador se tocaba principalmente mediante un teclado, lo que hacía muy asequible su interpretación para organistas y pianistas y le otorgaba por tanto una ventaja definitiva sobre el theremín.

EL THEREMÍN EN LA ACTUALIDAD

Se puede detectar un cierto auge del theremín en los últimos tiempos. Una nueva hornada de jóvenes intérpretes desafían al indómito aparato y se lanzan a las redes sociales para enseñar y compartir sus experiencias. Curiosamente, la mayor parte de los intérpretes han sido y son mujeres que siguen la huella de Clara Rockmore: Carolina Eyck, Lydia Kavina, Pamela Kurstin, Barbara Buchholz, Katica Illényi y Thorwald Jørgensen (éste último varón) son una muestra del interés renovado por el instrumento. Thereministas españoles con cierta notoriedad son Xabier San Martín, miembro del grupo *La oreja de Van Gogh*, y Javier Díez Ena, un enamorado del instrumento que, además, disfruta divulgando su sonido y sus excelencias¹⁴.

Merece la pena que el theremín goce de una nueva ocasión para deleitarnos con su sonido. A pesar de lo aparentemente artificioso de su funcionamiento, en realidad se puede considerar como el instrumento musical más expresivo tras la voz, porque, paradójicamente, es el que establece un vínculo más íntimo con su intérprete aunque no se toquen físicamente.

Manuel Pancorbo Castro

Dpto. de Física Interdisciplinar

¹⁴Javier Díez Ena participó en un programa de la serie La UNED en La2 dedicado al theremín: <https://canal.uned.es/mmobj/index/id/53509>.