

La física detrás del theremin clásico

The physics behind the classic theremin

A física por trás do theremin clássico

Ismael Núñez Pereira¹

Ex docente del Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, URUGUAY

Correo de contacto: inunez@fing.edu.uy

Resumen

El theremin es un instrumento musical con un halo algo fantástico porque se ejecuta sin tocarlo. Simplemente alejando y acercando las manos a ciertas antenas se varían la frecuencia y el volumen del sonido. Su funcionamiento se explica completamente con la física de finales del siglo XIX. En este artículo se trata de mostrar, sin el requerimiento de avanzados conocimientos de electrónica, cómo es la base física del funcionamiento del theremin tal como fue concebido por su inventor Lev Serguéyevich Termén. Muchos de estos instrumentos modernos funcionan con los mismos principios, pero con componentes electrónicos semiconductores en lugar de los componentes clásicos que desempeñaban las mismas funciones en los principios del siglo XX. Está dirigido a músicos y a lectores con conocimientos elementales de física, por lo que los detalles técnicos han sido simplificados sin perder la justificación de su funcionamiento, u omitidos cuando fueron innecesarios.

Palabras clave: oscilaciones eléctricas, frecuencia de resonancia, capacitores, inductores

Abstract

The theremin is a musical instrument with a somewhat fantastic halo because it is played without touching it. By simply moving your hands away and closer to certain antennas, the frequency and volume of the sound can be varied. Its operation is fully explained with the physics of the late nineteenth century. This article tries to show, without the requirement of advanced knowledge of electronics, how is the physical basis of the operation of the theremin as it was conceived by its inventor Lev Sergeyevich Termén. Many of these modern instruments operate on the same principles, but with semiconductor electronic components rather than the classical components that performed the same functions in the early 1900s. It is aimed at musicians and readers with elementary knowledge of physics, so the technical details have been simplified without losing the justification of its operation, or omitted when they were unnecessary.

Keywords: electrical oscillations, resonance frequency, capacitors, inductors

Resumo

O theremin é um instrumento musical com um halo um tanto fantástico porque é tocado sem tocá-lo. Simplesmente movendo suas mãos para longe e mais perto de certas antenas, a frequência e o volume do som podem ser variados. Seu funcionamento é totalmente explicado com a física do final do século XIX. Este artigo tenta mostrar, sem a exigência de conhecimentos avançados em eletrônica, como está a base física do funcionamento do theremin tal como foi concebido por seu inventor Lev Sergeyevich Termén. Muitos desses instrumentos modernos operam com os mesmos princípios, mas com componentes eletrônicos semicondutores, em vez dos componentes clássicos que desempenhavam as mesmas funções no início do século XX. Destina-se a músicos e leitores com conhecimentos elementares de física, por isso os detalhes técnicos foram simplificados sem perder a justificação do seu funcionamento, ou omitidos quando desnecessários.

Palavras chave: oscilações elétricas, frequência de ressonância, capacitores, indutores

¹ Este artículo se basa en *Physics of the Theremin* de K.D. Skeldon, L.M. Reid, V. McNally, B. Dougan y C. Fulton, American Journal of Physics 66 (11), November 1998. Se ha simplificado el desarrollo de manera que resulten más importantes los aspectos físicos que los electrónicos.

1 INTRODUCCIÓN

En 2020 se cumplieron 100 años de un invento del músico y físico ruso Lev Serguéyevich Termén (Figura 1), popularmente Leon Theremin (1896-1993).



Figura 1. León Theremin ejecutando su instrumento

Se trata de un instrumento musical que asombró a la gente (y aún la asombra) porque se ejecuta la música sin tocar el instrumento, sino solamente acercando y alejando las manos de un par de antenas que tiene el aparato (Figura 2). Con una se varía el tono (la nota musical) y con la otra el volumen del sonido. A este instrumento se lo llama hoy “theremin clásico” y su funcionamiento es puramente electromagnético.



Figura 2. Moderno theremin

Lleva encima el enorme galardón de ser el primer instrumento musical eléctrico. Su funcionamiento se explica completamente con la física del siglo XIX, y corre paralelamente a la invención de la radio, ya que

se basa en las mismas leyes. Hoy la evolución de la electrónica en 100 años ha permitido la construcción de “theremines” que funcionan en base a otros principios físicos. Estos son más sencillos y baratos de construir, como el theremin opto-eléctrico, que funciona variando la intensidad de la luz que llega a un sensor, o acusto-eléctrico que funciona con sensor de proximidad ultrasónico. Se desempeñan igualmente sin contacto del ejecutante con el instrumento, porque la frecuencia (nota musical) se regula acercando o alejando la mano al sensor. En estas notas se explicará la física involucrada en el theremin electromagnético con el diseño clásico, porque es el que tiene más física básica en su exposición. El theremin moderno utiliza circuitos integrados y las variables involucradas en su funcionamiento no son analógicas, sino digitales.

2 EL SONIDO Y LAS VIBRACIONES ELÉCTRICAS

El sonido consiste en vibraciones (oscilaciones) de la materia cuando se producen con determinadas características. Las oscilaciones son pequeños movimientos de ida y vuelta de las partículas que forman la materia que sea (aire, cuerda, madera, metal, membrana, tímpano, etc.). Estas vibraciones pueden ser algo irregulares (*oscilaciones compuestas*). Pero las más importantes (porque son la base de todas las demás) son aquellas en las cuales la partícula se desplaza la misma distancia y demora el mismo tiempo cuando va hacia un lado o hacia el otro. Estas se suelen llamar oscilaciones *armónicas*, o *puras* (nombre poco feliz), u *oscilaciones simples*. Para ejemplificar la diferencia, tenemos las representaciones gráficas del desplazamiento de alguna partícula arbitraria a medida que transcurre el tiempo, como se muestra en la Figura 3.

En las vibraciones simples, el número de idas y vueltas (oscilaciones) que la partícula desarrolla en un segundo se llama *frecuencia* de la oscilación. La unidad de medición es el Hertz (Hz). Así una vibración que realiza 100 oscilaciones en un segundo en un tiene una frecuencia de 100 Hz.

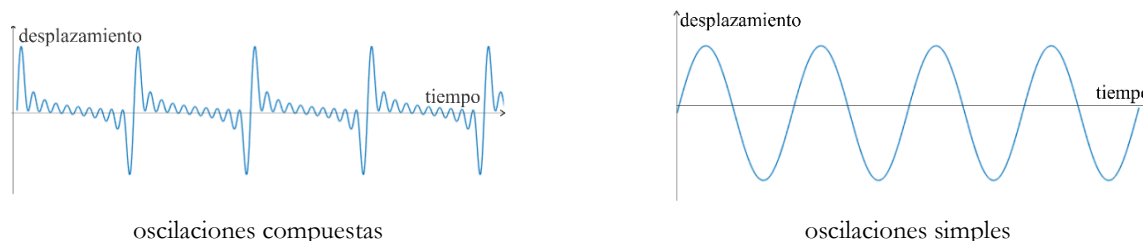


Figura 3. Oscilaciones simples (der.) y compuestas (izq.)

Las vibraciones a las que el oído humano joven y sano es sensible son las que tienen frecuencias, aproximadamente, entre 20 Hz y 20000 Hz. A este intervalo se le llama propiamente “sonido”.

Todo instrumento musical no eléctrico, hoy conocido como “unplugged” (literalmente, desenchufado) genera y transmite el sonido hasta el oído por procedimientos enteramente mecánicos (la transmisión por el aire siempre lo es). Acá tenemos la guitarra acústica, el contrabajo acústico, piano clásico, los vientos, percusiones, etc. Pero el sonido emitido por un parlante llega a él mediante una corriente eléctrica. Las vibraciones mecánicas del parlante son una copia exacta de las vibraciones de la corriente eléctrica. Así que las gráficas de la figura 3 podrían referirse también a valores de corriente o voltaje, en lugar de desplazamientos de partículas de aire, cuerdas, membranas, etc. De forma que el “principio primero” del theremin, como de cualquier instrumento que produzca sonido a partir de la electricidad, es generar una corriente eléctrica que oscile de la forma en que deseamos. Estas oscilaciones eléctricas, si son de frecuencias audibles, al llegar a un parlante o auricular lo harán vibrar mecánicamente y se percibirán en nuestros oídos como sonidos.

3 CIRCUITOS ELÉCTRICOS OSCILANTES

Con la evolución “exponencial” de la electrónica en los últimos 100 años, existen una enorme variedad de circuitos eléctricos que pueden producir corrientes oscilantes, comúnmente llamadas *corrientes alternas*. Nosotros nos referiremos al circuito oscilante clásico (o “analógico”), que es el que se ha utilizado en el theremin desde sus orígenes. En los más modernos aparatos se utilizan elementos más complejos, como los circuitos integrados (el theremin digital).

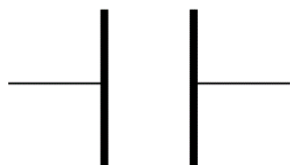
Dos elementos eléctricos son fundamentales para generar las oscilaciones con el método clásico: un capacitor (o condensador) y un inductor (o bobina). Un capacitor consiste en un par de conductores (más

o menos extensos) con cargas eléctricas opuestas y separados por cualquier material aislante. En los esquemas se suele representar con dos barras paralelas (que representan placas) y sus respectivos terminales de conexión al resto del circuito. Un inductor o bobina es un arrollado de muchas vueltas de un alambre conductor muy delgado, con sus terminales de conexión. En la Figura 4 se muestran ambas representaciones. La importancia del capacitor en un circuito eléctrico radica en que es capaz de almacenar cargas eléctricas de signos opuestos en sendas placas (que no tienen que ser necesariamente “placas”). Esto sucede cuando se le aplica una diferencia de potencial V entre ellas (por ej. mediante una pila o batería). La placa conectada al terminal positivo de la fuente adquiere una cantidad de carga Q (positiva) en tanto que la otra placa adquiere una cantidad de carga $-Q$. La corriente de carga dura milésimos de segundo o menos. Aunque la fuente siga conectada, las placas del capacitor están aisladas entre sí y no pueden ser atravesadas por la corriente. En estas condiciones decimos que el capacitor está “cargado” con la carga Q (aunque, de hecho, la carga neta es nula). La magnitud de esta carga depende de la diferencia de potencial aplicada V y de un parámetro positivo C que es propio de cada capacitor, llamado su *capacitancia*. La relación es muy simple:

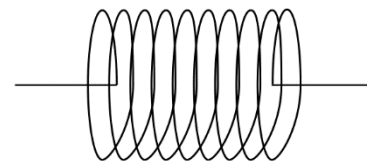
$$Q = CV \quad (1)$$

Cuando la carga se mide en *Coulomb* y la diferencia de potencial en *Voltios* la capacitancia C resulta en *Faradios* (F). Las capacitancias de los capacitores usuales en los circuitos oscilantes son sumamente pequeñas en las unidades de nuestro sistema de medidas. Las más grandes son de algunas milésimas de faradio ($1 \text{ mF} = 10^{-3} \text{ F}$), pasando por millonésimas (microfaradios, $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$), milmillonésimas (nanofaradios, $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$) hasta billonésimas de faradio (picofaradios, $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$). El almacenamiento de carga por parte del capacitor significa un almacenamiento de energía, porque

cuando se descarga a través de sus terminales hacia el circuito devuelve esta energía en forma de corriente



capacitor o condensador



inductor o bobina

Figura 4. Capacitor (izq.) e inductor (der.)

La función del inductor en un circuito es almacenar energía en el campo magnético que se genera un su interior a causa de la corriente que circula. También en este caso, cuando la corriente disminuye la energía almacenada en el campo magnético es devuelta al circuito, reforzando la corriente que está en caída. Entre los extremos del inductor solamente se genera una diferencia de potencial si la corriente está variando. Cuanto más rápidamente varíe, mayor será esta diferencia de potencial. Indicaremos como di/dt la velocidad con la que varía la intensidad de la corriente en la bobina (Amperes por segundo). Entonces la diferencia de potencial (o *caída de potencial*) que se presenta entre sus extremos será:

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

donde el parámetro positivo L depende de la bobina, y se llama *inductancia* de ésta.

Cuando la diferencia de potencial se mide en voltios, la corriente en amperes y el tiempo en segundos, la inductancia resulta en una unidad llamada *Henry* (H). Tendremos también sus submúltiplos en potencias de 10. El más usual es el milihenry ($1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$).

Nuestro objetivo no es deducir ni aplicar las expresiones (1) y (2) a la resolución de problemas prácticos. Simplemente es mostrar la existencia de dos parámetros fundamentales en los osciladores clásicos: la capacitancia C del capacitor y la inductancia L del inductor o bobina. Ambos datos figuran en los dispositivos que se venden en los comercios del ramo.

Cuando un capacitor cargado con cierta carga inicial Q se conecta a una bobina, comienza a tener lugar el extraordinario fenómeno que permite la existencia del theremin (y todos los instrumentos musicales que sintetizan sonido a través de la electricidad): las

eléctrica.

oscilaciones. Esta situación tiene lugar cuando se cierra la llave interruptora S en la Figura 5.

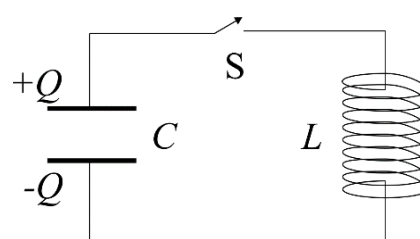


Figura 5. La corriente comienza a oscilar cuando se cierra el interruptor S

Este fenómeno sucede porque al cerrar el circuito, el capacitor comienza a descargarse produciendo una corriente a través de la bobina. La energía que tenía el capacitor la comienza a invertir en la formación del campo magnético de la bobina. Cuando el capacitor se descarga y la corriente comienza a disminuir, el campo magnético de la bobina también lo hace, y esto produce una corriente que refuerza la que venía en caída. Entonces el capacitor es vuelto a cargar, pero con la polarización invertida (el positivo debajo en la Figura 5). Cuando cesa la corriente el capacitor está nuevamente cargado en sentido inverso a la inicial. Así que comienza la descarga con una corriente de vuelta hasta que el capacitor se recarga en la posición original inicial. Se repite “indefinidamente” este proceso, lo que da lugar a la famosa corriente oscilante.

Las leyes conducen a que la frecuencia de esta oscilación está dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

De acá surge la fundamental importancia de las magnitudes L (inductancia de la bobina) y C (capacitancia del capacitor). La corriente eléctrica en el circuito va y viene con esta frecuencia,

describiendo una gráfica en función del tiempo como muestra la Figura 3 en la forma de oscilaciones simples. Si esta frecuencia fuese audible, podría amplificarse para accionar un parlante y escucharse,

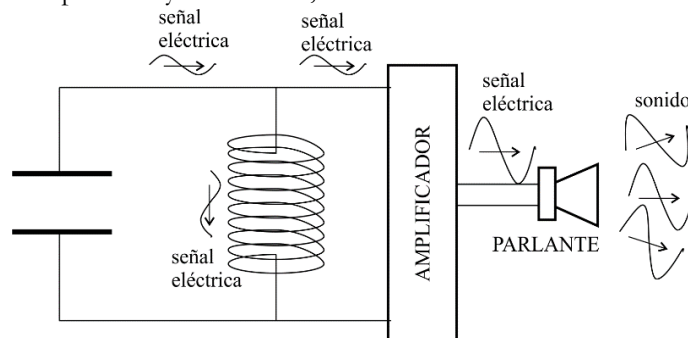


Figura 6. Ilustración esquemática de la transformación de una oscilación eléctrica en sonido

La palabra “indefinidamente” dicha más arriba es inexacta. Se trata de una aproximación a la realidad. La situación descrita supone que no hay pérdidas de energía en el circuito: la energía pasa del capacitor (cuando está completamente cargado) a la bobina (cuando la corriente es máxima) y recíprocamente. Todos los cables conductores de un circuito oponen mayor o menor resistencia al pasaje de la corriente, lo que disipa parte de la energía en forma de calor (o en

forma de ondas electromagnéticas cuando la frecuencia es muy alta). Esto significa que las oscilaciones se van “amortiguando” hasta que, tarde o temprano, se extinguen. La gráfica de la corriente eléctrica en función del tiempo, en lugar de ser como la de oscilaciones simples de la Figura 3, sería parecida a la mostrada en la Figura 7. Estas se llaman *oscilaciones amortiguadas*.

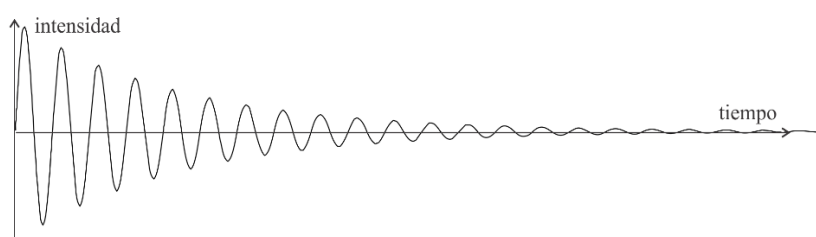


Figura 7. Atenuación de las oscilaciones debida a la disipación de energía en el circuito.

La solución a este problema es reponer, en cada ciclo de la oscilación, la fracción de energía que se pierde. De esta forma, se podrían mantener las oscilaciones simples de la gráfica de la Figura 3. Esto se podría hacer (idealmente) con una disposición como se indica en el circuito de la Figura 8.

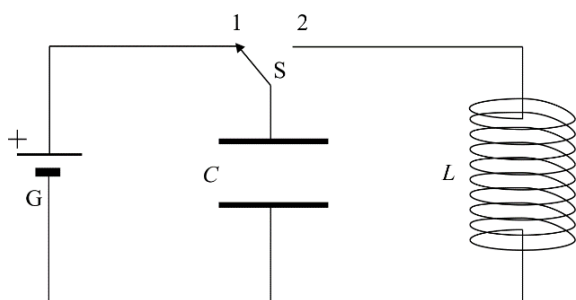


Figura 8. Circuito oscilante con reposición de energía.

El elemento indicado con la letra G en la Figura 8 es un generador de corriente continua (pila, batería, etc.). Cuando la llave S está en la posición 1, el capacitor se carga. Cuando se pasa a la posición 2, el circuito se convierte en el de la Figura 5 y comienza la oscilación. Al cabo de, por ejemplo, una oscilación completa, se pasa la llave a la posición 1 y se vuelve a cargar el capacitor con la carga inicial, reponiendo entonces la pérdida de energía. Así sucesivamente se mantiene la oscilación simple en el circuito LC, a costa de ir extrayendo energía del generador.

Evidentemente que este proceso no se puede hacer manualmente, pero existen ciertos componentes electrónicos que lo hacen automáticamente. En la época de Theremin eran unas válvulas de vacío llamadas *triodos*, hoy sustituidos por unos

componentes de estado sólido mucho más pequeños, compactos y estables llamados *transistores*, inventados en la década de 1950. No analizaremos acá cómo es que el transistor lo hace. Quedemos en que se puede lograr y de esta forma mantener un circuito oscilante compuesto por un capacitor de capacitancia C y un inductor de inductancia L . Se obtiene un corriente oscilante con una frecuencia que depende exclusivamente de estas dos magnitudes, como lo expresa la ecuación (3).

Para hacernos una idea práctica digamos que un inductor típico utilizado en los osciladores tiene valores de inductancia desde 1 nH (nanohenry) hasta unos 10 mH . Si quisiéramos que la oscilación en el circuito LC reprodujera la frecuencia de la nota LA fundamental ($f = 440\text{ Hz}$), con un inductor de 1 mH necesitaríamos un capacitor de capacitancia $C \simeq 140\text{ }\mu F$, de acuerdo con la expresión (3).

4 CAPACITANCIA DEL SISTEMA ANTENA - MANO

Antes dijimos que un capacitor estaba formado por dos conductores cualesquiera separados por un material aislante. Tal es el caso de una antena y la mano de alguien en su proximidad, lo que viene especialmente al caso porque el theremin tiene una antena vertical, que forma un capacitor con el cuerpo del ejecutante (conexión “a tierra”). Al sólo efecto de hacer un cálculo aproximado para dar una idea de su magnitud, daremos la expresión para la capacitancia entre una antena cilíndrica de longitud h y diámetro D , y la mano que se encuentra a una distancia x de la antena. Asumiendo que el ancho de la palma de la mano es del orden de $h/10$, tendremos aproximadamente¹

$$C_A(x) \simeq \frac{2\pi\epsilon_0 h}{10 \ln\left(\frac{4x}{D}\right)} \quad (4)$$

donde ϵ_0 es una constante conocida del electromagnetismo, y la función “ln” indica el logaritmo neperiano de la cantidad entre paréntesis. En (4) se asume que $D \ll x$. Si bien esta expresión es deducida para una antena horizontal, en tanto que la antena que regula la frecuencia en el theremin es vertical, su aplicación igual sirve para obtener la

capacitancia aproximada. Veamos por qué nos interesa este resultado. Se resalta en (4) que esta capacitancia depende de la distancia x entre la mano y la antena.

Suponiendo valores típicos para un theremin, digamos que $h \simeq 0,5\text{ m}$, $D \simeq 0,01\text{ m}$, $x \simeq 0,2\text{ m}$. Haciendo las cuentas en (4) obtenemos para la capacitancia del sistema antena-mano el valor aproximado de $C_A \simeq 0,6\text{ pF}$ (¡menos de una billonésima de faradio!), lo cual es una cantidad muy pequeña. Obsérvese que, cuanto más próxima a la antena está la mano, mayor es la capacitancia. Esto es un comportamiento general de los capacitores, a menor distancia entre ambos conductores, mayor es la capacitancia.

Si al circuito de la Figura 5 le agregamos el capacitor antena-mano, tendremos un capacitor adicional conectado en paralelo con el del circuito. Omitiendo por simplicidad el sistema de realimentación con el transistor, el esquema sería como el indicado en la Figura 9.

De esta forma, la capacitancia total C que determina la frecuencia de las oscilaciones en la expresión (3) será,

$$C(x) = C_0 + C_A(x) \quad (5)$$

Sustituyendo (5) en (3) tendremos como resultado una variación de la frecuencia del circuito oscilante a medida que el ejecutante desplace su mano hacia o desde la antena.

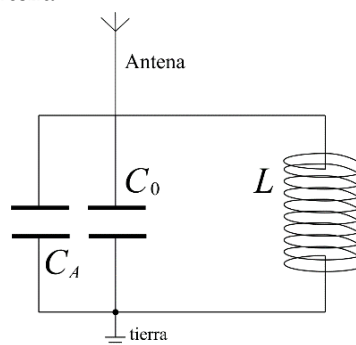


Figura 9. Capacitancia C_A introducida por el conjunto antena-mano en paralelo con C_0

Tendríamos que:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sqrt{L[C_0 + C_A(x)]}} \quad (6)$$

5 EL PROCESO DE HETERODINACIÓN

Viendo la ecuación (6) parece estar resuelto el problema. Tenemos una frecuencia variable con la

¹ *Physics of the Theremin* de K.D. Skeldon, L.M. Reid, V. McNally, B. Dougan y C. Fulton, American Journal of Physics 66 (11), November 1998.

posición de la mano, con lo que podríamos, en principio, tener sonidos para notas musicales. Pero no, no es así. Ya vimos que la capacitancia introducida por la mano próxima a la antena es del orden de los picofaradios ($10^{-12} F$). La frecuencia de oscilación sin el efecto de la mano sería, según (6):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \quad (7)$$

¿Cómo depende la variación δf de la frecuencia f causada por una variación δC de la capacitancia C ? De la expresión (3) (tomando logaritmos y derivando, manteniendo L constante) obtenemos, en valores absolutos,

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{1}{2} \frac{\delta C}{C_0}, \quad (8)$$

donde se han tomado variaciones con respecto a los valores de frecuencia y capacitancia del circuito no perturbado por la mano. Si queremos que la frecuencia f_0 sea audible (digamos, entorno a los 1000 Hz), los valores de L y C no pueden ser muy pequeños. Utilizando la ecuación (3) tendríamos que $LC \simeq 10^{-8} H \cdot F$ (Henry Faradio). Un capacitor tan pequeño como de 1 pF, requeriría una bobina del orden de $L \simeq 10000 H$, la cual no existe (hasta donde yo sé). Una bobina razonablemente pequeña, como para un circuito electrónico sería, por ejemplo, del orden de 10 mH ($10^{-2} H$). En este caso tendríamos que utilizar un capacitor del orden de $C_0 \simeq 10^{-6} F = 1 \mu F$.

Ahora bien, de acuerdo con los cálculos hechos más arriba, la capacitancia C_A , que será la variación δC en la ecuación (8), es del orden del picofaradio ($10^{-12} F$). Utilizando estos resultados en (8), la variación relativa de la frecuencia al poner la mano a una distancia $x \simeq 0,2 m$ de la antena será:

$$\frac{\delta f}{f_0} \simeq \frac{1}{2} \times \frac{10^{-12}}{10^{-6}} \simeq 0,5 \times 10^{-6} \quad (9)$$

Pues bien, ¿a cuánto aspiramos que sea la mínima variación de frecuencia δf para obtener la mayor continuidad posible en los tonos musicales? Pues, como máximo $\delta f \simeq 1 Hz$, para que el oído no detecte “un salto” entre dos notas sucesivas. No queremos que sea como un piano, sino como el violín, que tiene una variación continua de tono. Poniendo este valor en (9) encontramos que la frecuencia f_0 del circuito resonante sin la perturbación de la mano debe de ser del orden de

$f_0 \simeq 2 \times 10^6 Hz$. Esto no es ni de cerca una frecuencia audible (recordar que el máximo llega a los 20000 Hz). En resumen, si queremos que la variación de frecuencia al mover la mano en el theremin sea una frecuencia audible, la frecuencia del circuito oscilante sin la perturbación de la mano debe de ser del orden del megahertz ($1 MHz = 10^6 Hz$). Si bien los cálculos son aproximados, las mínimas frecuencias del oscilador no perturbado por la mano en el theremin nunca pueden bajar de centenares de miles de Hertz. Esto implica que algo hay que hacer para quitarse esta frecuencia f_0 de encima y quedarse solamente con las variaciones de frecuencias δf para que se oiga algo. Esto se logra mediante un proceso común en radiotelefonía, llamo *heterodinación* de señales.

Una señal oscilatoria simple como la presentada en el gráfico de la derecha en la Figura 3 se puede representar matemáticamente como

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi f t) \quad (10)$$

donde A es su *amplitud* (la máxima desviación desde la posición central), f es la frecuencia de la oscilación y t es el tiempo. Esta magnitud s puede referirse a un desplazamiento, un voltaje eléctrico, la intensidad de una corriente eléctrica, etc. Así es que en el circuito oscilante de la Figura 9, el voltaje (o diferencia de potencial) entre un punto como el extremo superior de la bobina y la conexión a tierra se puede escribir como

$$s_1 = A_1 \sin(2\pi f_1 t) \quad (11)$$

donde f_1 es la frecuencia de las oscilaciones dada en la expresión (6), donde la capacitancia ha sido perturbada por la presencia de la mano cerca de la antena del theremin. Esto es,

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_A)}} \quad (12)$$

Como sabemos, esta frecuencia depende de la posición de la mano del ejecutante a través de la capacitancia C_A .

El proceso de heterodinación consiste en utilizar otro circuito igual a éste (igual capacitor y bobina) pero sin antena, que oscilará con la frecuencia dada en (7), que llamaremos f_2 ,

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} \quad (13)$$

De forma que la señal eléctrica en este nuevo circuito la indicaremos como:

$$s_2 = A_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad (14)$$

Estas dos señales, que podrían ser los voltajes de los extremos superiores de las bobinas se pueden mezclar de forma multiplicativa. Existen sencillos circuitos electrónicos que hacen esta operación. Entonces la señal a la salida del multiplicador, a la que llamaremos $p(t)$ será

$$p(t) = s_1(t) \times s_2(t) \quad (15)$$

La figura 10 ilustra este proceso. Sustituyendo en (15) las expresiones (11) y (14), tenemos

$$p(t) = A_1 A_2 \sin(2\pi f_1 t) \sin(2\pi f_2 t) \quad (16)$$

Lo notable de esta expresión, es que verifica la identidad trigonométrica,

$$A_1 A_2 \sin(2\pi f_1 t) \sin(2\pi f_2 t) = \frac{A_1 A_2}{2} \cos[2\pi(f_2 - f_1)t] - \frac{A_1 A_2}{2} \cos[2\pi(f_2 + f_1)t] \quad (17)$$

Esto significa que la señal $p(t)$ a la salida del multiplicador consiste en la suma de dos señales, una de baja frecuencia $f_2 - f_1$, y otra de alta frecuencia $f_2 + f_1$, que podemos llamar

$$s(t) = A \cos[2\pi(f_2 - f_1)t],$$

$$q(t) = A \cos[2\pi(f_2 + f_1)t] \quad (18)$$

donde hemos puesto $A = A_1 A_2 / 2$.

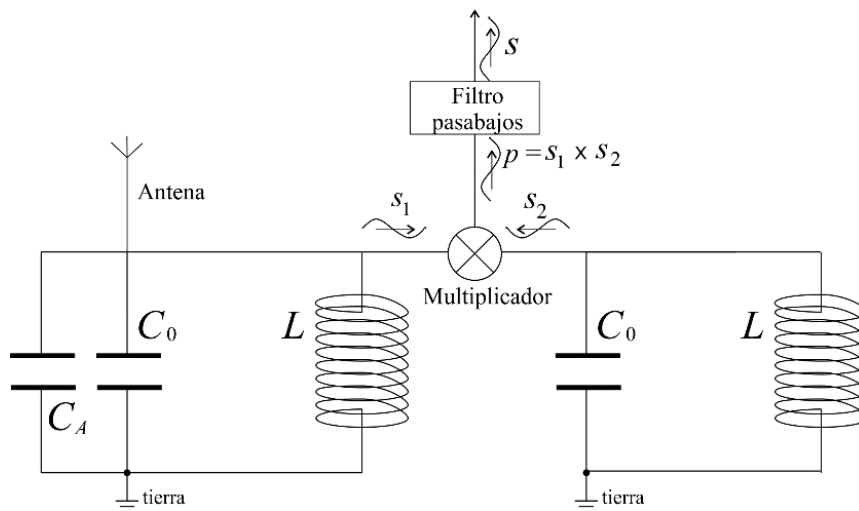


Figura 10. Construcción de la señal heterodina $p(t)$ por el producto de $s_1 \times s_2$ y filtrado para obtener la señal $s(t)$ que tiene la frecuencia de audio.

La señal indicada como $s(t)$ en (18) es la que contiene la frecuencia del sonido audible que se escucha en el theremin. Se mostró antes que la capacitancia C_A (picofaradios) generada entre la antena y la mano es unas mil veces menor que la capacitancia C_0 (nanofaradios) propia del circuito oscilante. Con esta condición de que $C_A/C_0 \ll 1$, hacemos el cociente de (12) sobre (13) y tenemos

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{C_A}{C_0}}} \simeq 1 - \frac{C_A}{2C_0} \quad (19)$$

De donde tenemos que

$$f_2 - f_1 \simeq f_2 \frac{C_A}{2C_0} \quad (20)$$

Recordemos que f_2 es la frecuencia de oscilación del circuito sin el efecto de la mano y la antena, es del orden del megahertz (10^6 Hz), en tanto que el cociente de las capacitancias es del orden de 10^{-3} o 10^{-4} . Entonces la diferencia de frecuencias en (20) está en el rango audible (recordemos, entre 20 Hz y 20000 Hz). La capacitancia C_A varía al acercar o alejar la mano de la antena y con ella la frecuencia del sonido, proporcionándonos una variación continua de tono que pueden recorrer la mayor parte del rango musical.

Podemos afirmar entonces que la señal $s(t)$ en (18) es la que transporta el sonido. Debemos eliminar la otra señal $q(t)$ de alta frecuencia que viene sumada a aquella. Esta tarea es sencilla por la existencia de dispositivos electrónicos comunes y de fácil

construcción, llamados “filtros pasa bajos”, cuya función es precisamente bloquear las altas frecuencias y dejar pasar las bajas. Estos filtros son tanto más eficientes cuanto más separadas estén estas frecuencias, como es el caso. En la parte superior de la figura 10 ilustra la etapa de filtrado de la señal.

La figura 11 muestra el resultado obtenido por Skeldon et al. (*Physics of the Theremin*) mencionado al pie de la primera página. Se señalan las frecuencias correspondientes a la nota LA y sus octavas. Obsérvese cómo aumenta rápidamente la frecuencia cuando se está muy próximo a la antena. Esto permite la característica resaltante del instrumento para ejecutar “vibratos” con pequeños movimientos vibratorios de la mano.

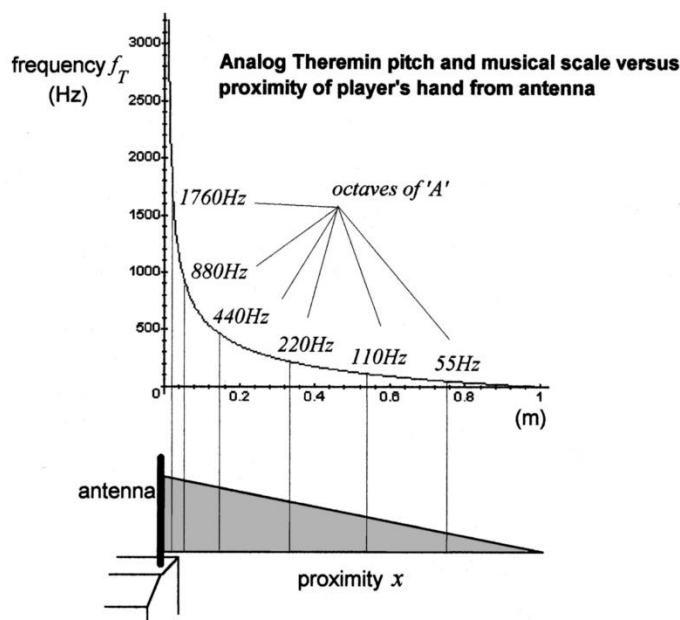


Figura 11. Frecuencia del sonido obtenido en función de la proximidad entre la mano y la antena (Skeldon et al., *Physics of the Theremin*, AJP 66 (11), Nov. 1998)

Como antes, con la finalidad de simplificar todo lo posible la explicación, omitiremos todas las conexiones de alimentación del funcionamiento del circuito, a riesgo de que los ingenieros y técnicos electrónicos se horroricen. La idea es, como ya se dijo, dar un panorama más próximo a la física que a la técnica del tema.

Los componentes y su disposición en el circuito que generan el control del volumen del sonido son idénticos a los utilizados en el circuito dedicado al control del tono. A aquella señal, modulada en frecuencia por la posición de la mano izquierda sobre

6 EL CONTROL DEL VOLUMEN

El control del volumen en el theremin se efectúa variando la capacitancia generada entre la mano (generalmente la izquierda) del ejecutante y una antena horizontal en forma de lazo (Figura 2). Se basa en el mismo principio que el control de tono ya analizado, lo cual significa que el movimiento de la mano produce una señal de frecuencia variable, como la indicada con $s(t)$ en la parte superior de la Figura 10 a la salida del filtro pasa bajos. La idea consiste en utilizar otra señal de frecuencia variable, dependiente de la posición de la mano, para generar un voltaje de amplitud variable. Finalmente usar esta amplitud para amplificar o atenuar la señal $s(t)$, lo que significa aumentar o disminuir su volumen de salida en función del movimiento de la mano sobre la antena horizontal.

el lazo horizontal, la llamaremos *voltaje de entrada* $v(t)$ en la Figura 12. Llamemos V_0 a su máximo valor.

Este voltaje alterno pasa por una resistencia R en serie con un capacitor de capacitancia C . De los cursos básicos de corriente alterna, sabemos que si el máximo de voltaje de la entrada es V_0 y su frecuencia (que depende de la posición de la mano izquierda) es f , entonces el máximo valor del voltaje en el capacitor es,

$$V_C = \frac{V_0}{\sqrt{1+(2\pi fRC)^2}} \quad (21)$$

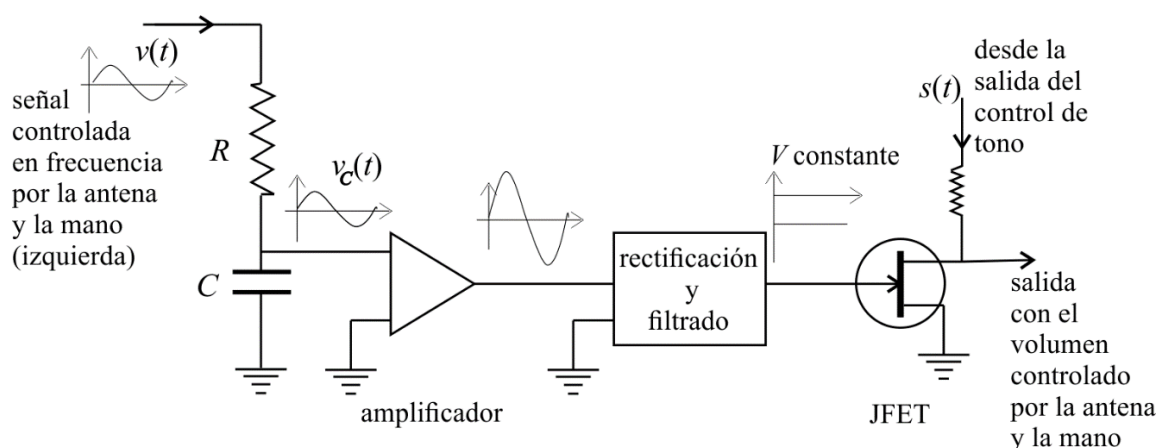


Figura 12. Esquema simplificado del circuito de control de volumen del theremin

Lo interesante a resaltar de la expresión (21) es que el máximo valor del voltaje alterno en el capacitor depende del valor de la frecuencia f de la señal de entrada, la que a su vez depende de la distancia entre la mano y el lazo de la antena horizontal. Acá no nos interesa para nada la frecuencia, sino el valor del pico de voltaje V_C . Por eso el voltaje alterno se amplifica, se rectifica y se lo filtra, para obtener un voltaje constante, proporcional a V_C . Este voltaje constante se utiliza en la entrada (llamada *puerta*) de un sistema de tres terminales, conocido como *transistor de efecto de campo* (junction field-effect transistor, o JFET). Entre los otros dos terminales del JFET se hace pasar la señal de audio que hemos señalado como $s(t)$ en la salida del esquema de la Figura 10. La amplitud de esta señal resulta entonces controlada por el voltaje continuo que se aplica en la puerta del JFET.

En resumen, al acercar y alejar la mano de la antena de lazo horizontal, variamos la frecuencia f de la señal generada en este circuito. De acuerdo con (21) esto varía el valor del voltaje V_C , el cual es utilizado para controlar la amplitud de la señal obtenida del control de tono, generada en el circuito de la antena vertical y representada con s en la Figura 10. Esta variación en la amplitud del sonido se traduce en la variación de su volumen.

7 CONCLUSIONES

A pesar de ser esta una explicación simplificada y semi-cualitativa del theremin, creemos que contiene las ideas físicas fundamentales, sin las complicaciones que serían necesarias para un acabado análisis de su funcionamiento. Las ideas físicas quedarían aún más ocultas si se discutiera el funcionamiento del theremin moderno (digital), el cual utiliza circuitos integrados y compuertas lógicas. Ni siquiera utiliza bobinas para el diseño de los circuitos oscilantes. Por eso titulamos el estudio como del *theremin clásico*. Para una profundización del tema, incluyendo el moderno theremin digital, volvemos a referir el trabajo de Skeldon et al., *Physics of the Theremin*, publicado por la American Journal of Physics, Nro. 66 (11), en Noviembre de 1998.

BIBLIOGRAFÍA

- Skeldon, K.D.; Reid, L.M.; McNally, V.; Dougan B. and Fulton, C. (1998). Physics of the Theremin. *American Journal of Physics* 66 (11), November 1998, <https://doi.org/10.1119/1.19004>
- Holonyak Jr., Nick (1999). Theremin oscillators and oscillations. *American Journal of Physics*, 67, 369 (1999); <https://doi.org/10.1119/1.19267>
- Wheeler, Paul (2004). Musical instrument technology of the 20th century. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 2451 (2004); <https://doi.org/10.1121/1.47822488>