

Principios de funcionamiento del theremin transistorizado de Robert A. Moog

Principles of Operation of Transistorized Theremin built by Robert A. Moog

Víctor Enrique Dávila Briones¹

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Resumen— Este trabajo explica los principios de funcionamiento del theremin transistorizado diseñado por el Dr. Robert Arthur Moog, a partir del diagrama de bloques y circuito esquemático del modelo Etherwave fabricado por Moog Music, Inc.

Abstract— This work explains the operation principles from Dr. Robert A. Moog's transistorized theremin by means of its block diagram and schematic. This device is called Etherwave theremin and it is built by Moog Music Inc.

Palabras clave— theremin, circuito resonante, oscilador, frecuencia, antena, tono, volumen.

Key words— theremin, resonant circuit, oscillator, frequency, antenna, pitch, volume.

I. INTRODUCCIÓN

Primero explicaremos cómo el Etherwave [1] convierte los movimientos de la mano en cambios en el tono y volumen de un sonido musical, para luego ir pasando por cada una de las etapas que comprenden este maravilloso instrumento. Hay varios circuitos resonantes, o circuitos sintonizados, en el Theremin Etherwave. Ya que los circuitos resonantes no son tan comunes o accesibles en la electrónica de hoy como solían serlo, definiremos algunos términos básicos y conceptos que le ayudarán a entender cómo funciona el circuito del Theremin.

Un circuito resonante consiste de un capacitor (a veces llamado condensador) y un inductor (a veces llamado bobina). Un capacitor es un dispositivo que consiste de dos placas conductoras separadas por material aislante como aire o poliéster. La capacitancia de un capacitor depende del tamaño de las placas y de la distancia entre ellas. Un inductor es un dispositivo que consiste en una bobina de alambre a veces envuelta alrededor de un núcleo de hierro o de ferrita. La inductancia de un inductor depende del número y tamaño de las vueltas de alambre

del material del núcleo. Un circuito resonante tiene la propiedad de que su impedancia eléctrica cambia radicalmente dentro de una estrecha banda de frecuencias, la media de las cuales es llamada frecuencia de resonancia del circuito.

II. METODOLOGÍA

Cuando acercas tu mano a la antena del theremin, en realidad estás formando un capacitor variable en el cual la antena es una "placa" y tu mano es la otra. Para las altas frecuencias y muy bajas corrientes de las que nos referimos, tu mano está efectivamente puesta a tierra al estar unida a tu cuerpo, de modo que la antena y tu mano forman un capacitor variable a tierra. Llamamos a esta capacitancia variable capacitancia de la mano. Se incrementa la capacitancia de la mano al acercar la misma a la antena. Normalmente esta capacitancia es menor a 1 picofaradio, lo que es en realidad un valor bastante pequeño de capacitancia. Además de la capacitancia de la mano, la antena del theremin tiene una capacitancia fija a tierra, a la cual llamaremos capacitancia de la antena. La capacitancia de la antena depende principalmente del tamaño de la antena, y por lo general es de 10 a 15 picofaradios. A cada antena se le conecta un inductor grande, que llamaremos bobina de la antena, dentro del theremin. La bobina de la antena, capacitancia de la antena y capacitancia de la mano forman un circuito resonante (ver la Fig. 1).

En el diseño de Moog [2] [3], las frecuencias de resonancia son, aproximadamente, 285 kHz para la antena de tono y 450 kHz para la antena de volumen. En la frecuencia de resonancia o cerca de ella, un pequeño cambio de la capacitancia de la mano produce un gran cambio de toda la impedancia del circuito de antena. Antes de ver el diagrama esquemático, revisaremos las funciones del circuito del Etherwave. La Fig. 2, es un diagrama de bloques que muestra todas las funciones del circuito.

¹ Víctor Enrique Dávila Briones, e-mail: victor_depeche@hotmail.com

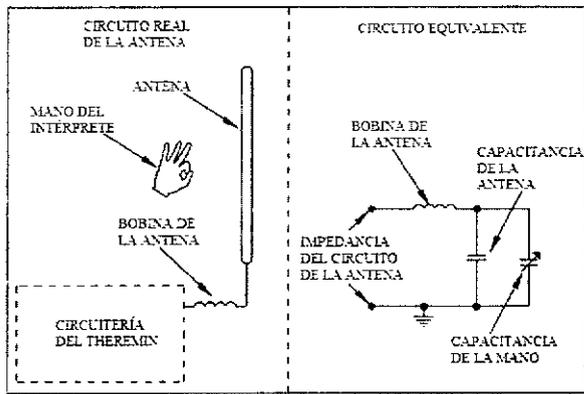


Fig. 1. Circuito equivalente de la capacitancia de la mano.

A. Producción del sonido y control del tono

El sonido del Etherwave es producido en una configuración de circuito que se conoce como oscilador de frecuencia de batido. Éste consiste en dos osciladores de alta frecuencia además de un circuito detector que se encarga de extraer la frecuencia diferencia o frecuencia de batido. Uno de los osciladores de alta frecuencia (llamado oscilador de tono fijo) opera a 285 kHz aproximadamente, mientras el otro oscilador de alta frecuencia (llamado oscilador de tono variable) opera sobre un rango aproximado de 282-285 kHz. En consecuencia, las frecuencias diferencia van desde 0 hasta 3 kHz, lo que casi equivale a tres octavas y media.

El circuito antena de tono va conectado al oscilador de tono variable de tal forma que incrementos de la capacitancia de la mano disminuyen la frecuencia de tono variable hasta en 3 kHz como máximo. Así es como el circuito de antena de tono, en conjunto con el circuito oscilador de frecuencia de batido, posibilitan al intérprete cubrir un rango de tono utilizable de varias octavas sólo con mover la mano a lo largo de una distancia de poco menos de 1 metro.

B. Control del volumen y control del timbre

El circuito antena de volumen consiste de la antena de volumen en sí misma, conectada en serie con varios inductores. Está conectada a la salida del oscilador de volumen, y recibe de éste una señal de alta frecuencia. Cuando el valor de la frecuencia de resonancia del circuito antena de volumen está en (o cerca de) el valor de la frecuencia del oscilador de volumen, una corriente de alta frecuencia fluye a través de los inductores, lo que les induce un voltaje de alta frecuencia en cada uno de ellos. Estos voltajes tienen valor máximo cuando la frecuencia de resonancia del circuito antena de volumen es exactamente igual a la

frecuencia del oscilador de volumen, y disminuyen cuando la frecuencia de resonancia del circuito antena de volumen es disminuida por la adición de la capacitancia de la mano a la capacitancia de la antena de volumen [4]. El circuito antena de volumen también incluye un sub circuito detector, que convierte en voltaje directo a la señal de alta frecuencia que atraviesa uno de los inductores. Este voltaje directo resultante es llamado control de volumen y se encarga de controlar la ganancia de un amplificador controlado por voltaje (ACV). Así, cuando el intérprete acerca una de sus manos a la antena de volumen, el voltaje control de volumen disminuye, la ganancia del ACV disminuye, y la señal de salida de audio es capaz de ir desde máximo volumen hasta un completo silencio. La señal de salida de audio es nivel de línea y puede alimentar la entrada de cualquier amplificador de potencia convencional.

Los controles del panel frontal del Etherwave incluyen cuatro potenciómetros: dos para la afinación de las antenas y dos para el control del timbre. El potenciómetro del CIRCUITO AFINACIÓN TONO ajusta la frecuencia del oscilador de tono fijo en un pequeño rango. De la misma manera, el potenciómetro del CIRCUITO AFINACIÓN VOLUMEN ajusta la frecuencia del oscilador de volumen en un pequeño rango. Estos circuitos proporcionan al intérprete un modo sencillo de afinar las respuestas de la antena durante la interpretación. En los diseños antiguos de theremin estas funciones de afinación estaban implementadas con grandes capacitores variables, los cuales actualmente ya no se encuentran disponibles a precios asequibles.

El ACV está diseñado para, de manera deliberada, distorsionar a la forma de onda de la frecuencia diferencia, añadiendo de este modo un deseable contenido armónico. Los potenciómetros de CONTROL BRILLO y CONTROL FORMA DE ONDA varían las alimentaciones en la entrada del ACV, lo cual cambia la manera de distorsionar a la señal de audio. El primero determina la cantidad de distorsión de la forma de onda y por consiguiente la cantidad del contenido armónico total. El segundo determina los armónicos que serán fuertes y los que serán débiles.

El circuito completo del theremin funciona con 12 voltios y la corriente total de consumo es cerca de 30 miliamperios. En consecuencia la fuente de poder es pequeña y simple, y ésta consiste de un transformador que entrega 14 voltios de alterna y 200 mA hacia dos rectificadores de media onda (diodos 1N4001) y luego hacia dos reguladores de voltaje (LM78L12 y LM79L12).

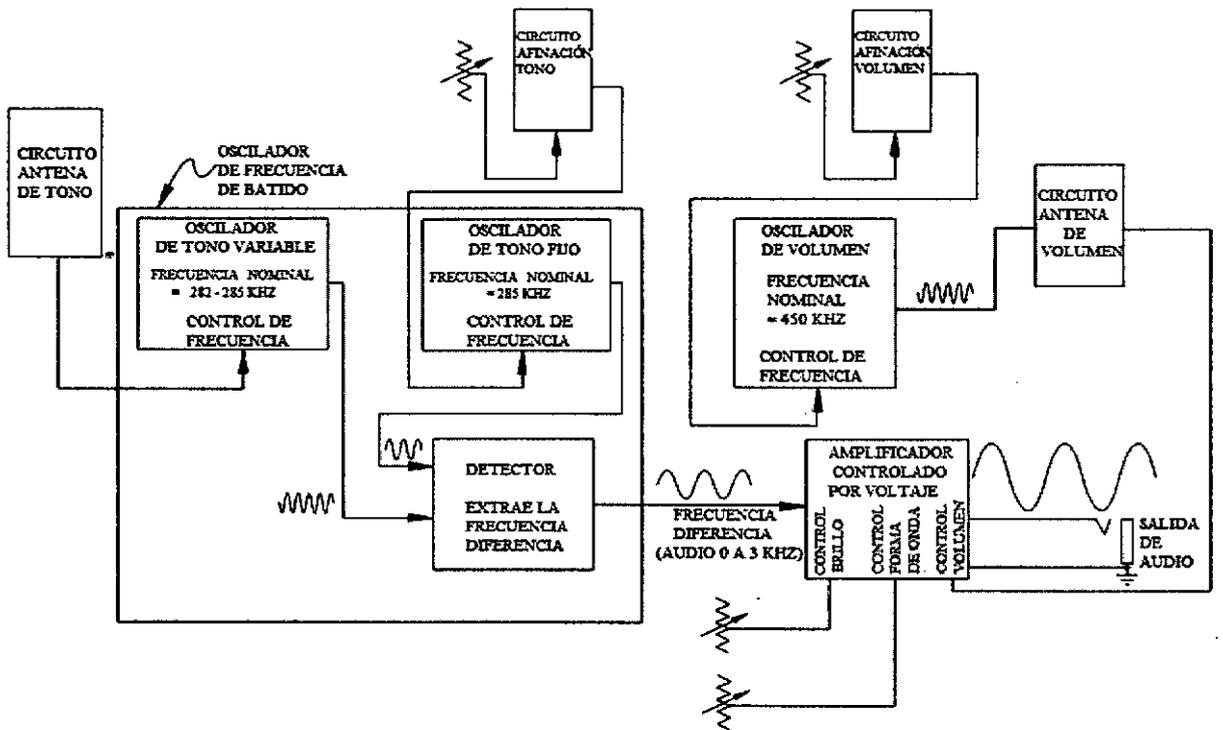


Fig. 2. Diagrama de bloques del theremin Etherwave.

III. RESULTADOS

La Fig. 3, representa el esquema completo del circuito Etherwave, los tres osciladores de alta frecuencia son casi idénticos, las diferencias radican en los valores de los elementos que conforman sus circuitos sintonizados y en la forma en que se ajustan sus frecuencias.

Los circuitos osciladores referidos están conformados por transistores bipolares 2N3904 en configuración de amplificador diferencial [5]. No obstante su uso casi restringido a los circuitos integrados, la configuración de amplificador diferencial presenta ventajas interesantes de diseño, por ejemplo permite amplificar cualquier frecuencia debido a que esta configuración no utiliza capacitores de desacoplo que originen frecuencias de corte al amplificador. La configuración diferencial también permite compensar los cambios en el transistor debidos al tiempo y a la temperatura.

Q1, Q2 y su circuitería asociada comprenden el oscilador de tono variable. La frecuencia de oscilación es determinada principalmente por la frecuencia de resonancia de L5, L12, y C1. Cuando el oscilador de tono variable es afinado de manera apropiada y la mano del intérprete se encuentra lejos de la antena de tono, la frecuencia de resonancia del circuito antena de tono es ligeramente más baja que la del oscilador de tono variable. Ahora, cuando la frecuencia de resonancia del circuito antena es más baja que la del circuito oscilador, la frecuencia del oscilador es empujada hacia arriba. En el caso

de un Etherwave afinado de manera apropiada, la carga por el circuito antena de tono cuando la mano del intérprete se encuentra lejos de la antena de tono eleva la frecuencia del oscilador de tono variable en 3 kHz aproximadamente. Luego, cuando el intérprete acerca su mano a la antena de tono, la diferencia entre la frecuencia de resonancia del circuito de antena y la del circuito oscilador se incrementa, la carga del circuito oscilador debida al circuito antena disminuye y la frecuencia del oscilador cae a su frecuencia natural (sin carga). Esta es la explicación técnica que nos proporciona Moog, aunque también podemos imaginarnos al circuito tanque del oscilador de tono variable y al circuito antena de tono como un único bloque LC que determina la frecuencia de oscilación del oscilador de tono variable, de modo que cuando se acerca la mano a la antena se produce un aumento de la capacitancia y por la fórmula que nos dice que en un oscilador senoidal la frecuencia de oscilación es inversamente proporcional al valor de la capacitancia ($\omega^2 = 1/LC$), se produce en consecuencia la disminución de la frecuencia.

Q3, Q4, y su circuitería asociada comprenden el oscilador de tono fijo, la frecuencia del mismo es determinada principalmente por la frecuencia de resonancia de L6, L13 y C5. Q5 y su circuitería asociada comprenden el circuito de afinación del tono, este circuito forma un "capacitor variable activo" el cual es utilizado para hacer finos ajustes a la frecuencia del oscilador de tono fijo cuando

el instrumento es ejecutado. El potenciómetro del panel frontal P1 ajusta la corriente a través de Q5, variando así su capacitancia activa. Similarmente Q6, Q7 y su circuitería asociada comprenden al oscilador de volumen, cuya frecuencia es determinada principalmente por la frecuencia de resonancia de L11, L14 y C14, más el efecto del capacitor variable activo formado por Q8 y su circuitería asociada. El potenciómetro del panel frontal P2 ajusta la corriente a través de Q8, variando así su capacitancia activa.

C2 y C6 combinan las señales de los osciladores de tono, mientras que D4, R23, R24 y C23 extraen la frecuencia diferencia. Ellos conforman un circuito detector en el cual D4 se encarga de mezclar ambas señales provenientes de los osciladores proporcionándonos una señal compuesta por la frecuencia suma más la frecuencia diferencia, esto gracias a que el diodo es un elemento no lineal. R23, R24 y C23 forman un filtro pasabajo que elimina la componente de alta frecuencia permitiendo que pase solamente la frecuencia diferencia hacia la entrada de la sección "A" del amplificador controlado por voltaje (ACV). C2 y C6 también proporcionan acoplamiento débil entre los dos osciladores de tono, lo cual tiene el efecto de sincronizar a los osciladores de tono cuando sus frecuencias se encuentran muy próximas. Esto tiene el deseable efecto de proporcionar un estable "batido cero". El batido cero es cuando la frecuencia del oscilador de tono variable es exactamente igual a la frecuencia del oscilador de tono fijo, de modo que su frecuencia diferencia obtenida en el circuito detector es cero y por consiguiente no hay señal audible a la salida del instrumento. Así el instrumento, una vez correctamente afinado, estará silencioso cuando el intérprete mantiene su mano lejos del instrumento. La forma de onda de audio en la unión de R23 y R24 es una onda senoidal inclinada con un voltaje pico a pico de aproximadamente 0.8 voltios.

Otro circuito detector consistente de D1, R14 y C12 va conectado en la bobina L7 del circuito antena de volumen. D1 se encarga de rectificar el voltaje en L1 de modo que solamente pase la señal negativa hacia C12 el cual se encargará de filtrar la señal eliminando su componente de alterna. Cuando la frecuencia de resonancia del circuito antena de volumen es igual a la frecuencia del oscilador de volumen (la mano del intérprete se encuentra lejos de la antena), el voltaje directo en la unión de C12 y R14 es aproximadamente -3 voltios y disminuye conforme el intérprete acerca la mano a la antena de volumen. Este voltaje es luego convertido en corriente, la que es utilizada para controlar la ganancia del ACV.

El elemento U3 es un "amplificador operacional de transconductancia dual" [6]. Cada sección puede usarse como ACV o como amplificador operacional programable. La sección "B" se utiliza para convertir el voltaje control de volumen en corriente, la que sirve para controlar la ganancia de la sección "A". La forma de onda de audio (frecuencia diferencia) se aplica entonces a la entrada de la sección "A", en un nivel suficiente para recortarla. Esto tiene el efecto de reformar la forma de onda de la señal de audio desde una onda senoidal casi inclinada a una onda cuasi rectangular, muy similar a la forma de onda del theremin original. El potenciómetro P3 varía la resistencia de entrada de la sección "A", lo que determina en cuánto la forma de onda de audio es recortada. P4 desplaza la alimentación en la entrada de la sección "A", lo que cambia el ancho de la forma de onda y por consiguiente el timbre del sonido. C24 y C26 eliminan los armónicos de alta frecuencia para dar un placentero balance tonal tipo violonchelo. El nivel máximo de audio en el jack de salida es de 0 dBm (0.8 Vrms) aproximadamente.

IV. CONCLUSIONES

Para conseguir que un dispositivo de capacitancia de mano funcione correctamente, debe haber un buen camino que permita que las corrientes de alta frecuencia fluyan a tierra. Bajo ciertas condiciones es necesario un camino a tierra para asegurar una operación estable y un buen color del sonido (Fig. 4). Por esta razón la fuente de poder del Etherwave proporciona una conexión directa a tierra mediante su enchufe de tres terminales. Otra alternativa, de no contar con un sistema de tierra física, es colocar brazaletes conectados a tierra del circuito theremin en las muñecas del intérprete.

Sobre el acoplamiento entre la antena y el oscilador, este diseño de theremin utiliza el sistema con resonador inductivo, logrando optimizar características importantísimas en un instrumento musical, como son el campo de juego y la linealidad [7].

Otra cuestión es el mayor coste que implica la inclusión de grandes bobinas devanadas a mano como puede apreciarse en los diseños originales del inventor ruso Lev Termen; motivo por el cual modelos comerciales como el Etherwave y otros, apuestan por la utilización de pequeños inductores industriales dispuestos en serie: una solución de compromiso entre calidad y precio.

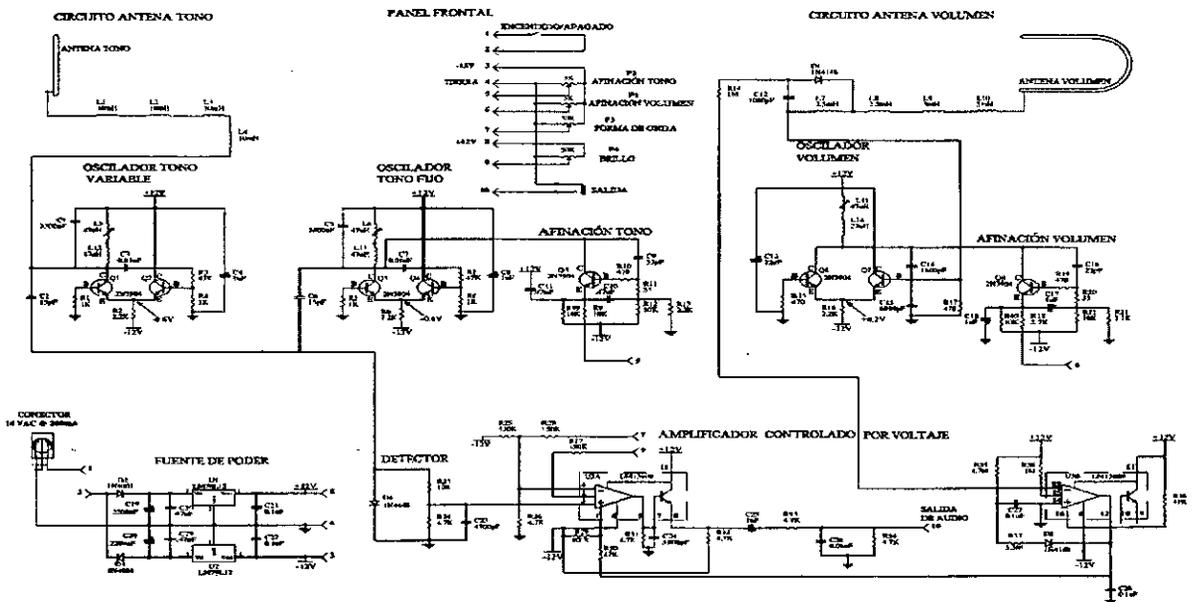


Fig. 3. Diagrama esquemático del theremin Etherwave.

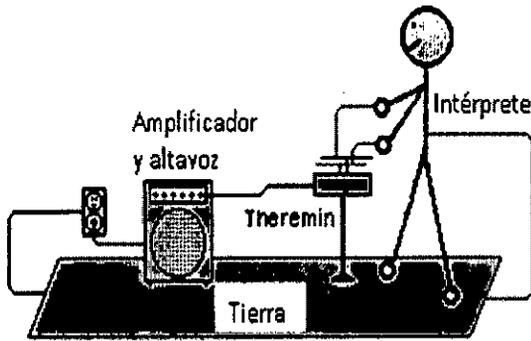


Fig. 4. Circuito eléctrico-electromagnético del theremin.

Técnicamente el timbre depende directamente de los componentes armónicos que acompañen al tono fundamental. El sonido del theremin de Moog (Fig.5), que presenta un diseño análogo al de Lev Termen, es como una voz de soprano en la mitad superior de la tesitura y como un violonchelo en la parte inferior. Esto lo logra a partir de un sistema heterodino convencional, introduciendo luego una “distorsión controlada” en el ACV para ajustar el timbre.

En cuanto al control de volumen, la aparición de dispositivos amplificadores integrados cuya ganancia es variada por medio de una corriente o voltaje de control, ha posibilitado que las configuraciones actuales disminuyan sustancialmente las dimensiones del theremin. En relación a esto el modelo Etherwave utiliza circuitos integrados de transconductancia variable (OTA), como el LM13600, para controlar el volumen y obtener a su vez un instrumento musical de reducidas dimensiones.

Este trabajo ha tenido por objetivo develar los misterios concernientes a la circuitería electrónica que hace posible el “funcionamiento mágico” del theremin. Partiendo del circuito diseñado por el Dr. R. A. Moog para su producto comercial Etherwave, en este trabajo se amplían las explicaciones proporcionadas por el mismo inventor acerca de los principios de funcionamiento que rigen al theremin.

Finalmente, podrá comprobarse que la mayoría de los diseños actuales de theremin que son transistorizados y analógicos siguen los mismos principios de funcionamiento descritos y explicados aquí.

REFERENCIAS

- [1] Moog, Robert A. Understanding, customizing and hot-rodding your Etherwave theremin. Moog Music Inc. 2003
- [2] Fjellestad, Hans. Moog: A Documentary Film. Disponible en DVD. 2004
- [3] Martin, Steven M. theremin: An Electronic Odyssey. Disponible en DVD. 1993
- [4] McKelvey, John P. & Grotch, Howard. Física para ciencias e ingeniería. Tomo II. Primera Edición. Harper & Row Latinoamericana. 1981
- [5] Millman, Jacob & Halkias, Christos. Electrónica Integrada. McGraw-Hill. 1976
- [6] National Semiconductor. LM13600 Amplificador Operacional de Transconductancia. Datasheet 1995
- [7] Balius, Jordi. Cómo diseñar un buen theremin. Theremin Hispano. 2008