

Diseño e Implementación de un Theremin Ultrasonico

Design and Implementation of an Ultrasonic Theremin

Victor Enrique Dávila Briones¹

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

Resumen— Este trabajo presenta el diseño e implementación de un theremin controlado mediante sensores de ultrasonidos y microcontroladores de 8 bits. Para interpretar música en tiempo real, con objeto a ser utilizado para presentaciones en directo o como instrumento en estudio de grabación.

Abstract— This work presents the design and implementation of a theremin controlled by ultrasonic sensors and 8 bit microcontrollers, in order to compose and perform real time music in a study or in live performances.

Palabras clave— Theremin, sensor de ultrasonidos, tono, volumen, forma de onda, oscilador controlado por voltaje, amplificador controlado por voltaje.

Key words— Theremin, ultrasonic sensor, pitch, volume, waveform, voltage controlled oscillator, voltage controlled amplifier.

I. INTRODUCCIÓN

Los que hayan visto un theremin [1] alguna vez saben que tiene un aspecto extraordinariamente peculiar, que no se asemeja al de ningún otro instrumento musical que existe o haya existido. Por lo general consiste en un gabinete del cual salen dos antenas, una hacia arriba y una hacia la izquierda (desde el punto de vista del ejecutante como se observa en la Fig. 1). La música se produce cuando el intérprete mueve las manos en las proximidades de las antenas, pero sin tocarlas. Una de las antenas controla el tono del sonido mientras que la otra controla su volumen.

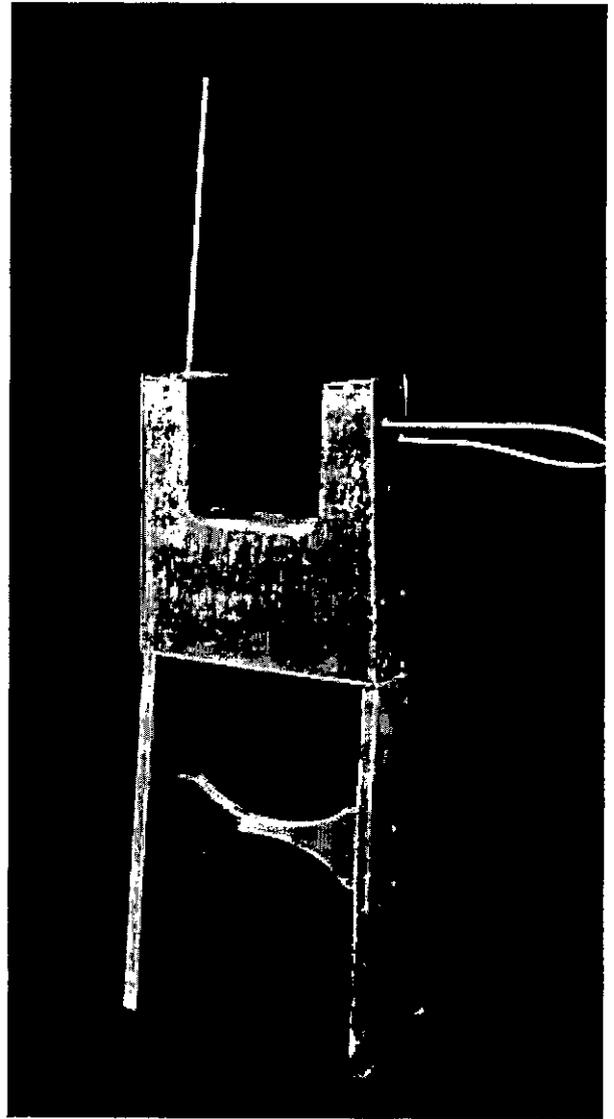


Fig. 1. Theremin soviético construido en 1961 por Lev Termen.

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

Creado en 1920 por el músico e ingeniero electrónico ruso Lev Sergeievitch Termen (más conocido en Occidente como León Theremin), se le considera el primer instrumento musical electrónico [2] del mundo. Sin embargo, la precisión y justeza del theremin requiere mucho esfuerzo de parte del ejecutante: el cuerpo del thereminista debe estar perfectamente equilibrado frente al instrumento, su cabeza completamente inmóvil durante largos períodos, y su control neuromotriz de manos y brazos debe ser perfecto, ya que una ligerísima vibración o un cambio de posición involuntario de los miembros superiores alteran radicalmente el sonido del instrumento. En la Fig. 2, se muestra el circuito eléctrico del theremin cuando está en funcionamiento, las líneas azules representan señal eléctrica mientras que las líneas rojas representan señal electromagnética conformando todo un circuito cerrado y completo.

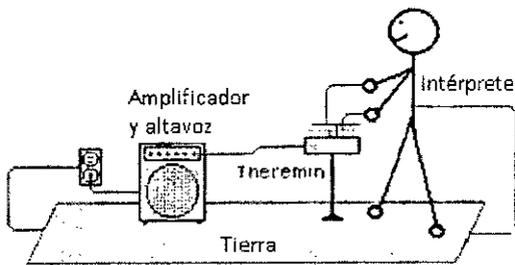


Fig. 2. Esquema que muestra el circuito eléctrico del theremin

El theremin operaba sobre un principio de modulación llamado: oscilación de frecuencia de batido, dos señales eléctricas que eran cercanamente iguales en frecuencia eran mezcladas. La combinación de las dos resultaba en una tercera señal que era igual a la diferencia entre las dos primeras frecuencias. Esta frecuencia audible restante era la frecuencia de batido. Los generadores de señales de radiofrecuencia usados en el theremin estaban en realidad por encima del rango auditivo humano pero la diferencia entre ellas era audible. La frecuencia de uno de los osciladores era fija, mientras que la otra podía ser alterada al mover un objeto, tal como la mano del intérprete, en la vecindad de una antena vertical. Cuando la mano entraba en el campo electromagnético de la antena, la frecuencia del oscilador variable cambiaba, resultando en una correspondiente variación de la frecuencia o tono audible de batido. El tono era controlado al mover la mano hacia adelante y hacia atrás con relación a una antena vertical llamada antena de tono. Además, había una antena de lazo posicionada horizontalmente para controlar el

volumen del sonido. Acercando la mano hasta tocar la antena de volumen, se podía silenciar el tono [3].

II. METODOLOGÍA

Instrumento musical electrónico que funciona acercando y alejando las manos de dos sensores de ultrasonidos [4], los cuales deben cubrir cada uno un rango de distancia de 1 metro aproximadamente. El tono musical se vuelve más agudo conforme se acerque la mano derecha del ejecutante al primer sensor, y conforme se aleje del segundo sensor la mano izquierda del ejecutante el volumen aumentará. Por último, en la salida del instrumento se obtiene una pequeña señal de audio la cual es ingresada a un amplificador de potencia de clase AB o D y altavoces convencionales, tal como se observa en la Fig. 3. Obviamente es primordial diseñar primero una etapa de alimentación que proporcione la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos, por lo que se diseñará una fuente lineal regulada AC-DC. De este modo el instrumento musical podrá energizarse desde cualquier toma de corriente alterna.

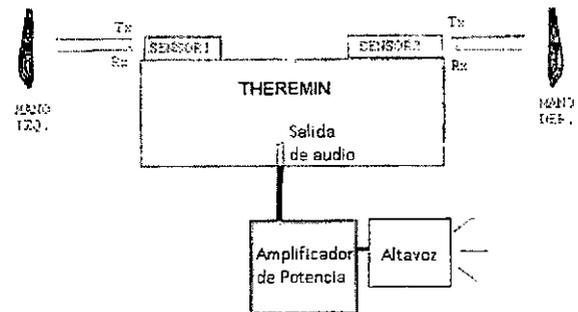


Fig. 3. Aspecto de un theremin controlado por ultrasonidos.

La Fig. 4, muestra el funcionamiento de la versión de theremin propuesta. Es capaz de generar señales de audio de forma de onda triangular o cuadrada. Por consiguiente, al encender el instrumento se escuchará por el amplificador de potencia un tono musical de onda triangular o cuadrada según la posición de un conmutador. El theremin es un instrumento musical monofónico por lo que sólo será capaz de generar un tono musical a la vez, tal como sucede, por ejemplo, con el violín. Con la mano derecha el usuario intérprete controla el tono o frecuencia de la señal de audio, de modo que al alejar la mano derecha disminuye la frecuencia—Fig. 4(a)—, y por el contrario, al acercar la mano derecha apuntando directamente hacia el sensor de tono aumentará la frecuencia—Fig. 4(b). Con la mano izquierda el usuario intérprete controla el volumen o amplitud de la señal de audio, de modo que al

acercar la mano izquierda apuntando directamente hacia el sensor de volumen disminuirá la amplitud de la señal –Fig. 4(c)-, y por el contrario, al alejar la mano izquierda del sensor aumentará la amplitud –Fig. 4(d).

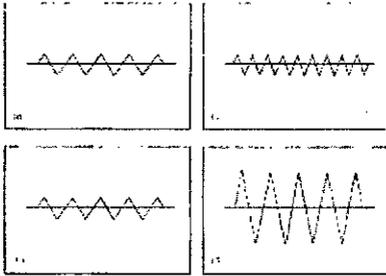


Fig. 4. Señal de audio controlada en frecuencia y en amplitud.

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de bloques completo de nuestro instrumento. Se aprecia que el circuito total del theremin se divide en dos sub-circuitos: el Circuito Generador de Tono y el Circuito Generador de Volumen. En ambos casi todo el trabajo recae sobre el bloque de microcontroladores PIC [4], [5]. Las siglas VCO y ACV corresponden a Oscilador Controlado por Voltaje (Voltage Controlled Oscillator en inglés) y Amplificador Controlado por Voltaje, respectivamente.

Es fundamental resaltar que todo instrumento musical electrónico presenta dos componentes principales: el sintetizador de voz [6], que es la circuitería electrónica donde se generan las señales de audio que escucharemos, y el controlador musical, que es el dispositivo y circuitería asociada que nos permite acceder y manejar las notas musicales para la interpretación. En este caso el controlador musical viene a ser el sensor de ultrasonidos [7] comandado por microcontrolador, mientras que el sintetizador de voz está constituido por los bloques VCO y ACV.

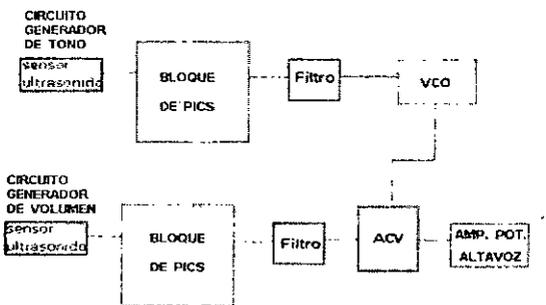


Fig. 5. Diagrama de bloques del theremin ultrasónico.

A. Circuito Generador De Volumen

El diagrama de bloques de la Fig. 6 nos muestra el diagrama de bloques de este sub-circuito del theremin.

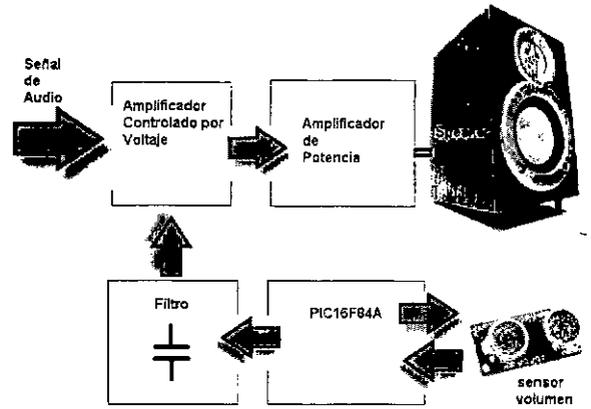


Fig. 6. Diagrama de bloques del circuito generador de volumen.

Lo primero con lo que interactúa el intérprete es el sensor de ultrasonidos. El sensor de ultrasonidos es controlado por un PIC16F84A [8] mediante un programa diseñado fácilmente en lenguaje Assembler, el cual se encarga de enviar el disparo de inicio para el bloque transmisor del sensor, y de recibir la señal PWM proveniente del bloque receptor del sensor, tal como se observa en la Fig. 7. Además de esto, el programa se encarga de sacar por un pin del PIC una señal idéntica a la señal PWM que recibió desde el sensor y la cual se aplicará a la entrada de un filtro pasabajos RC [9], como se observa en la Fig. 8.

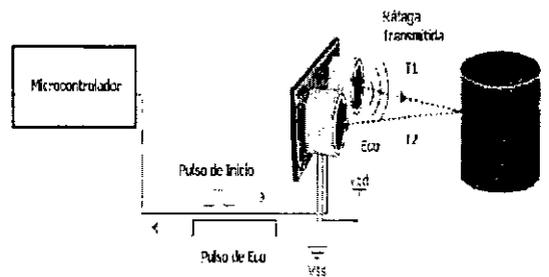


Fig. 7. Modo en que el PIC16F84A controla al sensor de ultrasonidos.

El bloque correspondiente a la etapa de filtrado es muy importante porque nos permitirá controlar a los dispositivos analógicos como el VCO y el ACV, los cuales se controlan con un nivel de voltaje DC variable. El sensor de ultrasonidos mide la distancia relativa al rebote de su onda sonora transmitida, y entrega un ancho de pulso (PWM, sigla de Pulse Width Modulation) proporcional a esa distancia. La Modulación por Ancho de Pulso (PWM) produce formas de onda digitales que pueden utilizarse como convertidor digital-analógico de bajo coste con muy pocos componentes externos. Para convertir la señal PWM a un voltaje analógico DC, un filtro pasabajos RC como el de la Fig. 8 es suficiente.

El procedimiento es el siguiente: el PIC16F84A se encarga de controlar al sensor de ultrasonidos y reproduce el ancho de pulso calculado por este sensor para llevarlo hacia la entrada de un filtro pasa-bajos RC. Con valores de $R=10K$ y $C=10\mu F$ nos aseguramos de eliminar toda la componente AC del PWM (esta señal es muy rica en armónicos impares), obteniéndose a la salida del filtro un nivel de voltaje DC proporcional al ancho del pulso. Ahora todo es cuestión de llevar esta señal analógica (el nivel DC) hacia la entrada del Circuito Silenciador y la salida del mismo se conecta en la entrada de señal del ACV, tal como se observa en la Fig. 9.

- 1) Si el eco que recibe el sensor corresponde a una distancia mayor a 1 metro, el theremin quedará silencioso.
- 2) Si el eco que recibe el sensor corresponde a una distancia menor a 15 cm, el theremin quedará silencioso.
- 3) Si el eco que recibe el sensor corresponde a una distancia comprendida entre 1 m y 15 cm, el theremin sonará, es decir, mostrará una señal de audio en su salida que será escuchada por el amplificador de potencia.

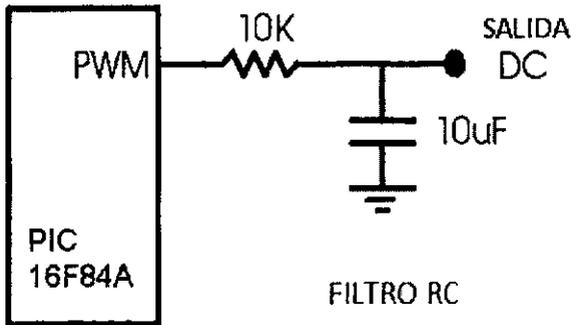


Fig. 8. Filtro Pasa-bajos RC.

La Fig. 10, nos muestra los componentes del Circuito Silenciador. Este bloque tiene la función de determinar el momento en que el theremin sonará y el momento en que quedará silencioso:

El funcionamiento es el siguiente: el PIC16F877A [10] recibe en su entrada analógica el nivel de voltaje proveniente del filtro RC y transforma su valor analógico en su respectivo valor digital; luego determina si este valor se encuentra dentro del rango de distancia permitido para que el theremin suene y conectará el nivel de voltaje del filtro RC a la entrada de señal del ACV [11]. Si, por el contrario, determina que se encuentra fuera del rango permitido, entonces conectará la entrada de señal del ACV a tierra, con lo que no se escuchará ningún sonido por los altavoces. Vemos entonces que este bloque es muy importante porque permitirá dividir las ondas de audiofrecuencia en notas musicales de distinta duración según los deseos del ejecutante.

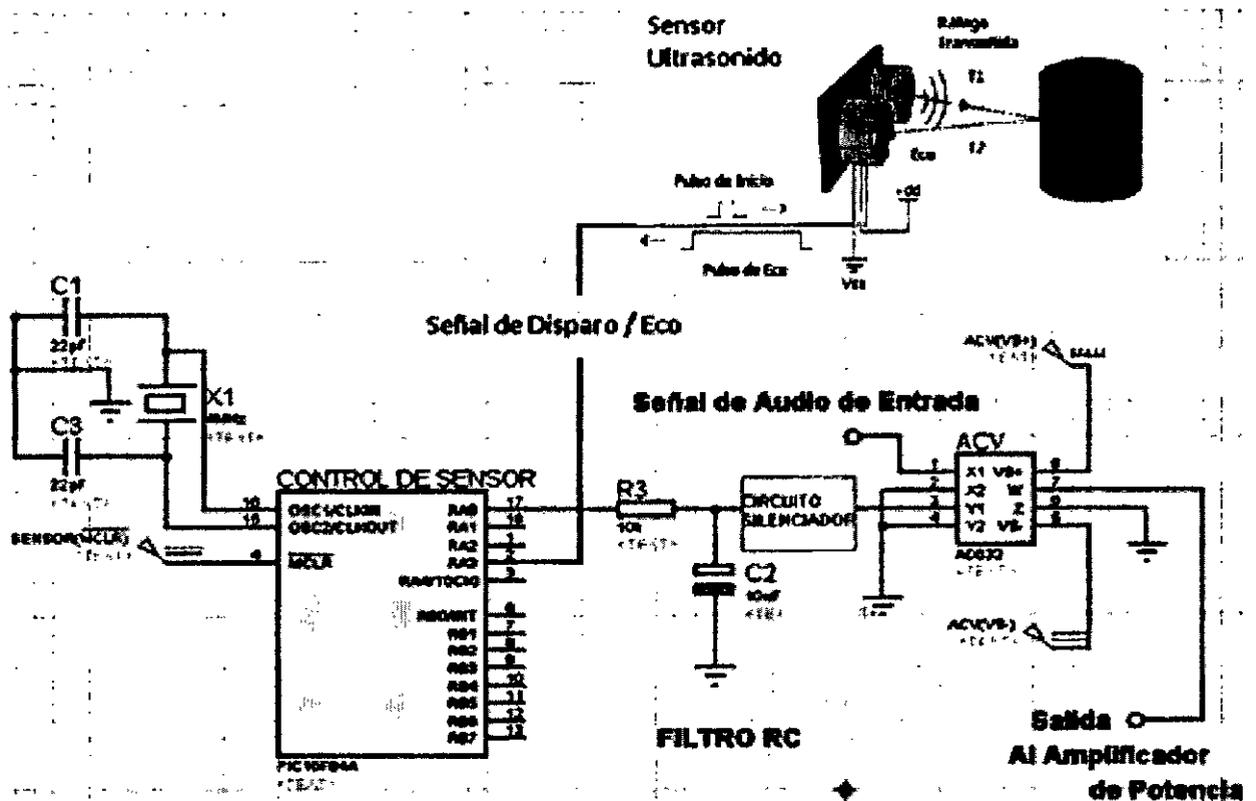


Fig. 9. Diagrama esquemático del circuito generador de volumen.

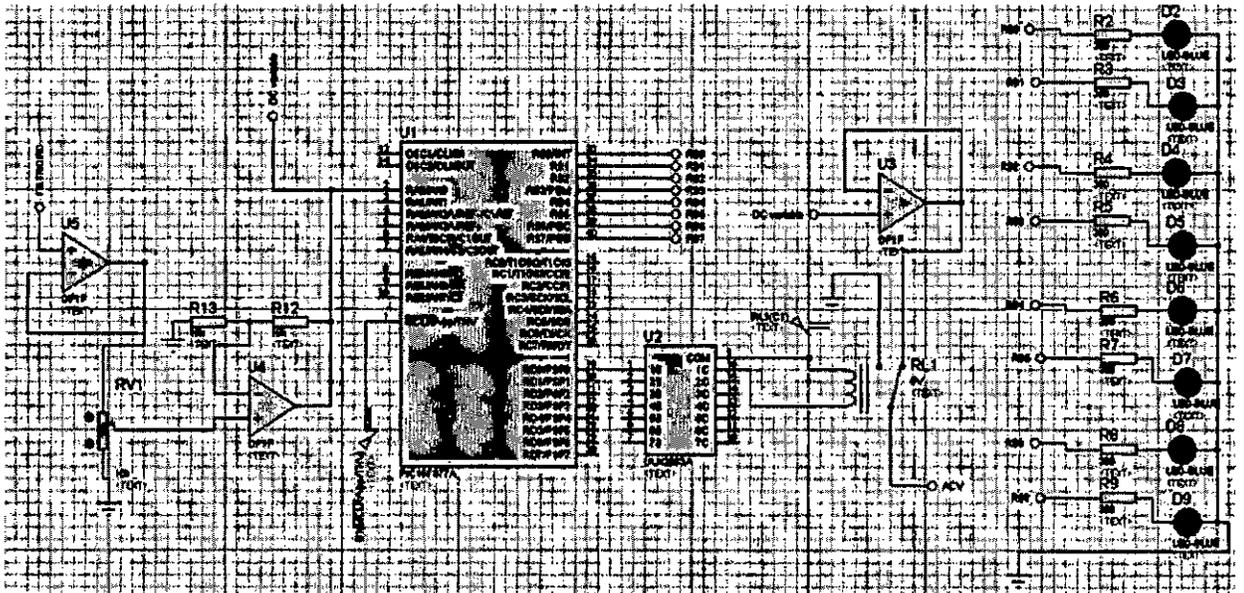


Fig. 10. Diagrama esquemático del circuito silenciador del theremin.

El siguiente bloque corresponde al multiplicador analógico AD633 configurado como Amplificador Controlado por Voltaje (Fig. 11).

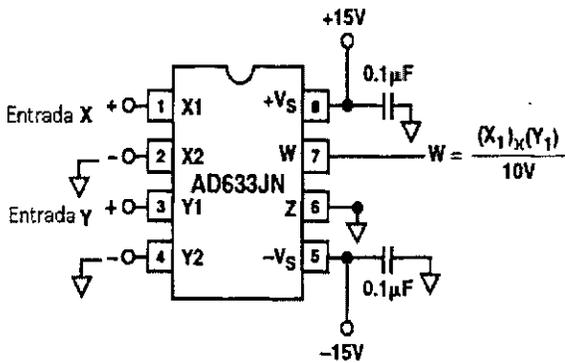


Fig. 11. Configuración del AD633 como ACV.

Las entradas negativas X2 e Y2 van conectadas a tierra. La entrada Z también va conectada a tierra. Las señales de audio triangular o cuadrada ingresan a X1, y la señal analógica DC del filtro RC ingresa por Y1.

De esta forma se obtiene a la salida W (pin 7 del AD633):

$$W = \frac{X1 \times Y1}{10} \text{ Voltios} \quad (1)$$

Donde en (1) Y1 es la señal moduladora del nivel de amplitud la cual aumentará o disminuirá la amplitud de la señal de audio que ingresa por X1. Luego de esto solamente nos resta llevar la salida W a la entrada de un amplificador de potencia de audio, por lo general de clase AB o clase D.

B. Circuito Generador De Tono

El circuito generador de tono contiene muchos componentes semejantes al circuito generador de volumen. De la misma manera que éste utiliza la medición de la distancia en forma de señal PWM, obtenida del sensor de ultrasonidos con el PIC16F84A, para conseguir mediante el filtro pasabajos RC un nivel DC con el cual el intérprete podrá controlar a su voluntad el valor de la frecuencia de la onda triangular o cuadrada a la salida del Oscilador Controlado por Voltaje (VCO). De esta manera el músico ejecutante controla el tono de la señal de audio.

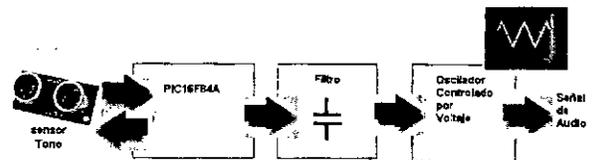


Fig. 12. Diagrama de bloques del circuito generador de tono.

Un VCO es un circuito que proporciona una señal variante de salida (típicamente una forma de onda cuadrada, triangular o senoidal) cuya frecuencia es controlada por un nivel de voltaje DC. El oscilador controlado por voltaje que usamos en nuestro diseño es el LM566 (Fig. 13) el cual es un VCO de propósito general que puede utilizarse para generar ondas cuadradas y triangulares, la frecuencia de las cuales es una función muy lineal de un voltaje de control. La frecuencia es fijada mediante un resistor y capacitor externos, y es variada por un voltaje DC aplicado. En el circuito de la Fig. 15, no puede conectarse directamente el voltaje DC,

proveniente del filtro RC, al pin 5 del LM566 (este pin es la entrada del voltaje de control, VC), sino que debe implementarse primero un Circuito Acondicionador del Nivel de Voltaje (Fig. 14), con objeto de llevar los niveles de voltaje que ingresan a la entrada VC del VCO a sus valores idóneos para obtener el más amplio rango de frecuencias sintetizadas.

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1} \left(\frac{V^+ - V_c}{V^+} \right) \quad (2)$$

Con las siguientes restricciones en (2):

$$2k\Omega \leq R_1 \leq 20k\Omega$$

$$0.75 V^+ \leq V_c \leq V^+$$

$$f_0 \leq 1MHz$$

$$10 V \leq V^+ \leq 24 V$$

En nuestro circuito: $R_1 = 10 k\Omega$, $C_1 = 100 \eta F$, $V^+ = 24 V$, y con estos valores obtenemos:

$$18 V \leq V_c \leq 24 V$$

$$f_0 \text{ máxima} = 500 \text{ Hz.}$$

Esto permite cubrir un rango de 5 octavas de notas musicales aproximadamente.

Se recomienda conectar un condensador de $1 \eta F$ entre los pines 5 y 6 del VCO LM566 para proteger el voltaje de control VC de oscilaciones parásitas que puedan ocurrir durante la conmutación del VCO, además de un capacitor electrolítico de $1 \mu F$ en el pin 8 (el de la alimentación) como protección contra el ruido de alta frecuencia. Finalmente, los pines 3 y 4 del VCO, de donde se obtienen las señales de salida cuadrada y triangular respectivamente, se conectan por medio de un conmutador 2 a 1 hacia la entrada de señal del Amplificador Controlado por Voltaje, ACV. En la Fig. 15 puede apreciarse el diagrama esquemático completo del circuito generador de tono. Fig. 15. Diagrama esquemático del circuito generador de tono.

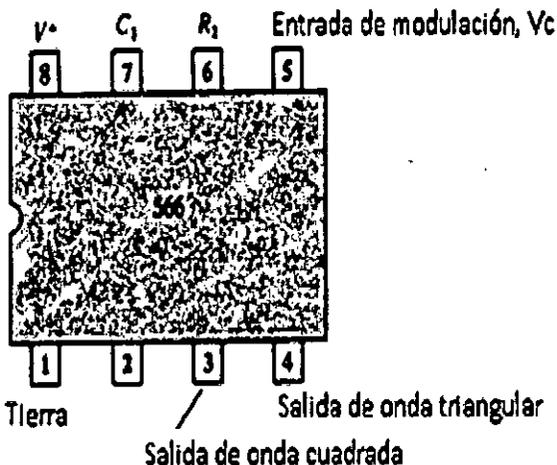


Fig. 13. Identificación de los pines del LM566.

El oscilador del VCO puede ser programado para operar en un rango de frecuencias de razón 10:1 mediante la selección adecuada de un resistor y capacitor externos, y su salida podrá ser modulada mediante un voltaje de control (VC). La frecuencia libre, o frecuencia central de operación, es calculada con la siguiente fórmula:

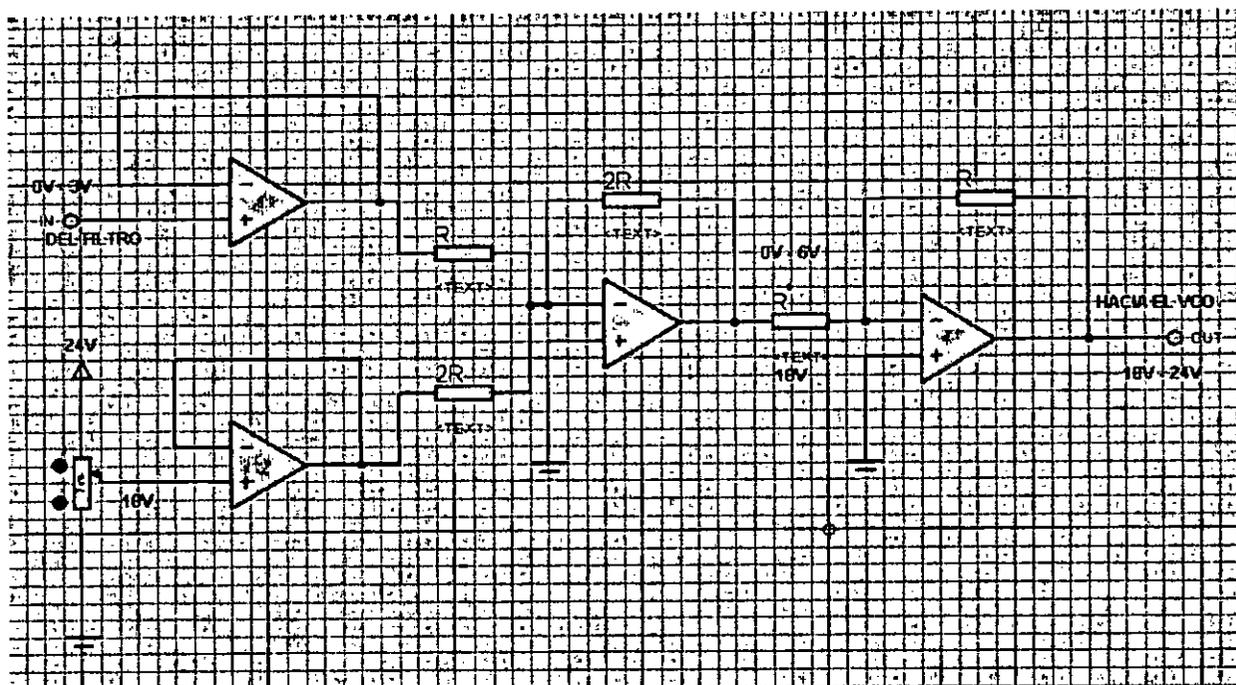


Fig. 14. Circuito acondicionador del nivel de voltaje.

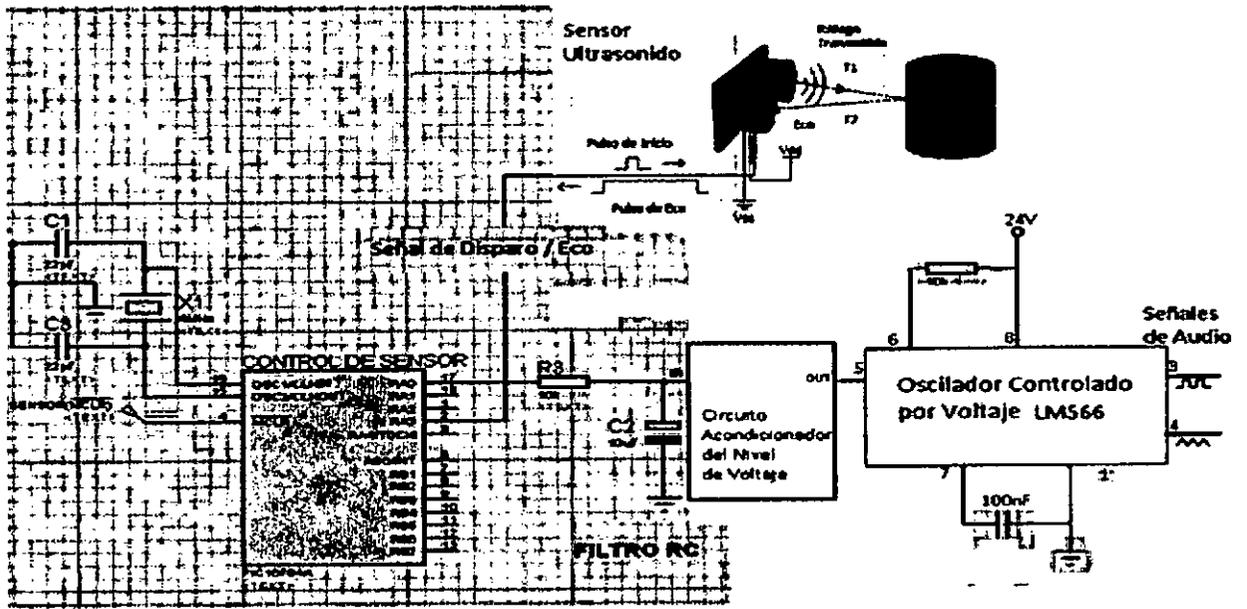


Fig. 15. Diagrama esquemático del circuito generador de tono.

III. RESULTADOS

En la Fig. 16 y en la Fig. 17 puede observarse en la pantalla del osciloscopio una forma de onda triangular en movimiento, la cual aumentaba en frecuencia conforme se acercaba la mano derecha al sensor, y disminuía en frecuencia cuando se la alejaba del mismo.

osciloscopio disminuía gradualmente en amplitud, disminuyendo así el volumen, hasta quedar todo en silencio si la mano izquierda casi tocaba al sensor. El sistema respondió perfectamente bien en todos sus aspectos. En la Fig. 20, se muestra el momento de la implementación del prototipo theremin ultrasónico propuesto, con el cual se realizaron las correspondientes pruebas de funcionamiento.

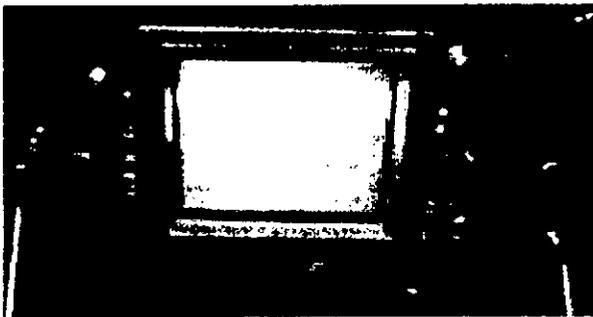


Fig. 16. Señal de audio con tono bajo.

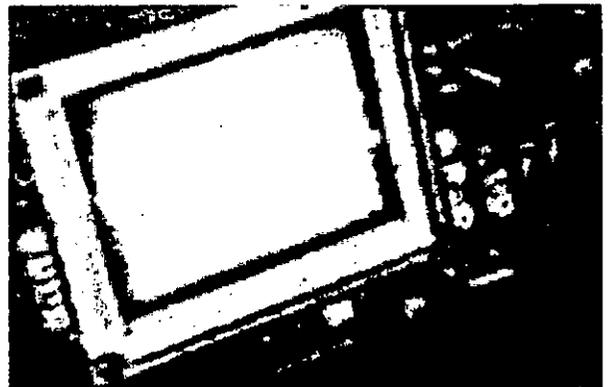


Fig. 18. Amplitud máxima de la señal de audio.

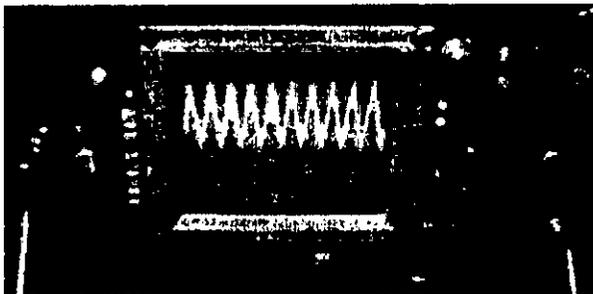


Fig. 17. Señal de audio con tono alto.

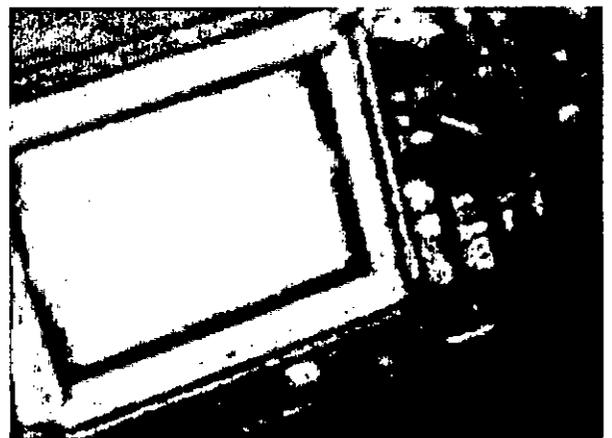


Fig. 19. Disminuyendo la amplitud de la señal de audio.

Del mismo modo en la Fig. 18 la onda triangular aumentaba en amplitud conforme se alejaba la mano izquierda del segundo sensor, aumentando el volumen obtenido en los parlantes de 8 ohm; y en la Fig. 19 se muestra que conforme se acercaba la mano izquierda al sensor la onda en el

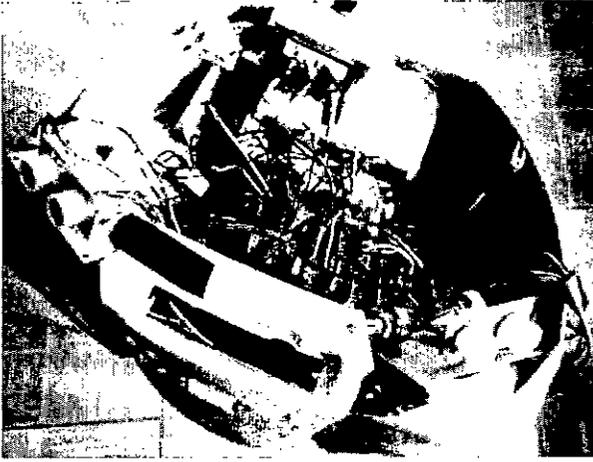


Fig. 20. Vista superior del prototipo theremin ultrasónico.

IV. CONCLUSIONES

Se diseñó y experimentó con el sensor de ultrasonidos para la medición de distancias, de bajo costo y de fácil adquisición en el mercado nacional, pudiendo demostrar su utilidad como un controlador musical estable, seguro y confiable. Se llegó a implementar y probar experimentalmente, con resultados satisfactorios, todas las etapas que se observan en los diagramas de bloques y esquemas.

V. REFERENCIAS

- [1] Martin, Steven M. Theremin: An Electronic Odyssey. Disponible en DVD. 1993
- [2] Holmes, Thom. Electronic and Experimental Music. Routledge. 2ª Edición. 2002
- [3] Radio-Victor Corporation of America. RCA Theremin Notes. 1929
- [4] Angulo Usategui, J. M. Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones. Primera parte: PIC16F84. Mc Graw Hill. 3ª Edición. 2003
- [5] Angulo Usategui, J. M. Microcontroladores PIC. Diseño práctico de aplicaciones. Segunda parte. Mc Graw Hill. 2ª Edición. 2000
- [6] Crombie, David. The Complete Synthesizer: A comprehensive guide. 1984
- [7] Palacios, Enrique. Microcontrolador PIC16F84: Desarrollo de proyectos. Alfaomega. 2ª Edición. 2004
- [8] PIC 16F84A Datasheet. www.microchip.com
- [9] www.theremin.us/Glasgow/glasgow.html: The Glasgow Digital Theremin. 2003
- [10] PIC 16F877A Datasheet. www.microchip.com
- [11] Moog Music Inc. Understanding, customizing and hot-rodding your Etherwave Theremin. 2003